ПРОЕКТ «МОРЯ»

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОХИМИЯ МОРЕЙ

ТОМ III

БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ

ВЫПУСК 2

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

Гидрометеоиздат 1994

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА РОССИИ
ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ЛАТВИЙСКИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА

ПРОЕКТ «МОРЯ»

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОХИМИЯ МОРЕЙ

ТОМ III

БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ

ВЫПУСК 2

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

Под редакцией
канд. геогр. наук Ф. С. ТЕРЗИЕВА,
д-ра физ.-мат. наук В. А. РОЖКОВА,
канд. биол. наук Е. Я. РИМША,
И. С. ШПАЕР

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1994

УДК 551.464 : 574.5(265.53)

Редакционная коллегия серии монографий
«Гидрометеорология и гидрохимия морей»:

Ф. С. Терзиев (отв. редактор), Н. П. Гоптарев, В. И. Калацкий, А. И. Симонов,
М. М. Борисенко, В. Е. Бородачев, Д. Е. Гершанович, Г. В. Гирдюк,
А. А. Керимов, Н. Н. Колесниченко, В. А. Рожков, В. Г. Федорей

Освещен широкий круг вопросов по гидрохимии и океанологическим основам формирования биопродуктивности вод Балтийского моря. Содержится подробный анализ закономерностей формирования различных элементов гидрохимического режима: солевого состава, кислорода, водородного показателя, щелочности, биогенных и органических веществ, а также исследуются факторы, их определяющие. Большое внимание уделено влиянию океанологических факторов на формирование биопродуктивности вод, дается оценка оптимальных условий среды обитания организмов моря.

Предназначена для специалистов, занимающихся современными физико-географическими и экологическими проблемами моря, и может быть использована при планировании и проектировании хозяйственных и природоохранных мероприятий в бассейне моря.

Ответственный редактор Ф. С. Терзиев

Отзывы и предложения просьба направлять Государственному океанографическому институту по адресу: 119838, ГСП, Москва, Г-34, Кропоткинский пер., 6.

Книга издана при финансовой поддержке
Министерства науки и технической политики Российской Федерации
и Российского фонда фундаментальных исследований

Г 1805040600-033 Без объявл.
069(02)-94

© Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, 1994 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 5

ЧАСТЬ I. ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

Введение 6

1. Характерные черты океанологических процессов и тенденции трансформации экосистемы моря . . . 7

2. Микроорганизмы 9

2.1. Краткие исторические сведения о микробиологических исследованиях . . . . . —

2.2. Общая численность, биомасса и продукция бактериопланктона. Сезонная динамика и распределение . . . . . —

2.3. Физиологические и таксономические группы микроорганизмов 10

2.4. Взаимоотношение микрофлоры и водных организмов 12

2.5. Патогенные микроорганизмы 13

2.6. Метаболизм бактерий и их роль в процессе самоочищения 14

3. Фитопланктон и первичная продукция . . . .

3.1. Видовой состав и его экологическая характеристика 15

3.2. Распределение 17

3.3. Сезонные сукцессии фитоцена и связи сезонных циклов фито- и зоопланктона 18

3.4. Многолетняя динамика, тенденция развития фитопланктона 19

3.5. Первичная продукция по районам и сезонам —

4. Зоопланктон 20

4.1. Видовой состав и его экологическая характеристика . . . . . —

4.2. Сезонная динамика и распределение . . . 22

4.3. Трофическая структура 27

4.4. Воспроизводство и продукция . . . . . —

4.5. Многолетняя динамика и влияние эвтрофикации 28

5. Нектобентос 29

5.1. Видовой состав и его экологическая характеристика 30

5.2. Особенности распределения и динамика численности 31

5.3. Вертикальные миграции мизид 32

5.4. Морской таракан . . . . . —

6. Зообентос (макрофауна) 34

6.1. Видовой состав, его зоогеографическая и экологическая характеристика . . . . . —

6.2. Биоценозы 37

6.3. Количественная характеристика и распределение 38

6.4. Сезонная и многолетняя динамика 40

6.5. Продукционные процессы 43

7. Ихтиофауна и ее взаимоотношения с окружающей средой. Общая характеристика 44

7.1. Сельдь 46

7.1.1. Краткая история исследований . . . . —

7.1.2. Биология 47

7.1.3. Промысел и состояние запасов 57

7.1.4. Методы прогнозирования запасов и уловов сельди 59

7.2. Шпрот 60

7.2.1. Краткая история исследований . . . . —

7.2.2. Биология 61

7.2.3. Промысел и состояние запасов 76

7.2.4. Методы прогнозирования запасов и уловов балтийского шпрота 78

7.3. Треска 81

7.3.1. Краткая история исследований . . . . —

7.3.2. Биология 83

7.3.3. Промысел и состояние запасов 95

7.3.4. Методы прогнозирования запасов и уловов трески 99

7.4. Речная камбала . . . . . —

7.4.1. Краткая история исследований . . . . —

7.4.2. Биология 100

7.4.3. Промысел и состояние запасов . . . .

7.4.4. Методы прогнозирования запасов и уловов балтийской речной камбалы 104

Список литературы . . . . . —

ЧАСТЬ II. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

8. Состояние исследований и изученность гидрохимического режима Балтийского моря 116

9. Информационная база гидрохимических данных и методы ее статистической обработки 123

9.1. Общая характеристика национальных систем гидрохимических наблюдений, входящих в информационную базу . . . . . —

9.2. Информационная база справочного массива 126

9.2.1. Характеристика базовых станций и критический анализ данных . . . . . —

9.2.2. Характеристика временных рядов гидрохимических данных 127

9.3. Химико-аналитические методы определения гидрохимических показателей и сопоставимость данных информационной базы 138

9.4. Методы статистического анализа 147

10. Общая гидрохимическая характеристика моря и факторы, формирующие его гидрохимический режим 149

10.1. Внешние факторы, формирующие специфику гидрохимического режима . . . . . —

10.2. Общая характеристика гидрохимических условий в верхнем слое моря и определяющие их факторы 151

10.2.1. Факторы, формирующие изменчивость гидрохимических параметров . . . . . —

10.2.2. Термические условия 157

10.2.3. Режим солености 159

10.2.4. Характеристика динамики гидрохимических условий в верхнем слое моря . . 168

10.3. Общая характеристика гидрохимических условий глубинных вод моря и определяющих их факторов 177

10.3.1. Физико-химические, химические и биохимические процессы в глубинном слое моря —

10.3.2. Притоки каттегатских вод и структура глубинного слоя 179

10.3.3. Циклический характер межгодовой изменчивости гидрохимических условий в глубинном слое моря 183

10.3.4. Факторы, формирующие сезонные изменения гидрохимических показателей в глубинном слое моря 189

11. Ионный состав и солевой баланс 197

11.1. Состояние исследований . . . . . —

11.2. Солевой баланс 199

11.3. Современный солевой состав 200

12. Кислородный режим 201

12.1. Кислородный режим верхнего слоя . . . 202

12.1.1. Внутригодовая изменчивость . . . . —

12.1.2. Суточная и короткопериодная изменчивость 218

12.2. Кислородный режим глубинного слоя . . . 220

12.2.1. Межгодовая изменчивость и сезонный аспект динамики кислородных условий . . —

12.2.2. Вертикальное и пространственное распределение кислорода 225

12.2.3. Многолетние изменения кислородных условий 230

13. Карбонатная система 259
13.1. Карбонатная система . . . . . —
13.2. Активная реакция (pH) 265
13.2.1. Общая характеристика факторов, формирующих изменчивость pH . . . . . —
13.2.2. Динамика pH в верхнем слое . . . . . —
13.2.3. Динамика pH в глубинном слое . . . 271
13.2.4. Многолетняя изменчивость pH . . . 280
13.3. Щелочность . . . . . —
13.3.1. Динамика щелочности в верхнем слое 285
13.3.2. Щелочность глубинного слоя 289
13.4. Двуокись углерода. Карбонатное равновесие и общее содержание карбонатов 295

14. Биогенные элементы 306
14.1. Азот 307
14.1.1. Динамика содержания соединений азота в верхнем слое . . . . . —
14.1.2. Динамика содержания соединений азота в глубинном слое 315
14.2. Фосфор 344
14.2.1. Динамика содержания фосфора в верхнем слое 348
14.2.2. Динамика содержания фосфора в глубинном слое 358
14.3. Кремний 360
14.3.1. Динамика содержания силикатов в верхнем слое 361
14.3.2. Динамика содержания силикатов в глубинном слое 366

15. Эвтрофикация 372
15.1. Балансы азота и фосфора 377
15.2. Проявления эвтрофикации в открытых водах 382
15.3. Структурно-функциональная схема и причины эвтрофикации 400

16. Загрязнение 405
16.1. Проблемы охраны среды . . . . . —
16.2. Проблемы химического анализа и сопоставления данных, характеризующих загрязнение 407
16.3. Хлорорганические соединения 409
16.4. Неполярные углеводороды 415
16.5. Тяжелые металлы в среде Балтийского моря 417

Список литературы 423

ПРЕДИСЛОВИЕ

Окраинные и внутренние моря обладают огромными биологическими, минерально-сырьевыми, энергетическими, водными и другими ресурсами, которые используются многими отраслями народного хозяйства. К числу наиболее крупных отраслей относится рыбное хозяйство, морская нефтегазодобывающая промышленность, морской транспорт, гидроэнергетика, гидромелиорация, здравоохранение (рекреация), коммунальное и промышленное строительство на побережье морей. Многим из них для рационального планирования своего развития и его эффективного осуществления требуется всесторонний учет гидрометеорологических и гидрохимических факторов, в первую очередь таких, как колебания уровня моря, ветер и волны, ледовые условия, течения, химическая агрессивность морских вод, солевой состав, биогенные вещества и другие.

Дальнейшее развитие морских отраслей народного хозяйства вызывает острую необходимость разработки принципиально новых, более совершенных путей и форм гидрометеорологического обеспечения на морях, так как одни традиционные формы в виде таблиц приливов, гидрометеорологических карт океанов и морей, ежегодников, ежемесячников и т. п. уже не могут удовлетворить растущие запросы. Необходимо было создать целенаправленную систему обеспечения режимной гидрометеорологической и гидрохимической информацией хозяйственной деятельности на морях. Такая система создавалась в три этапа под общим научно-методическим руководством ГОИНа с участием ААНИИ, ДВНИГМИ, ГГО, морских управлений по гидрометеорологии и ряда мореведческих организаций других министерств и ведомств. Первый этап приурочен к исследованиям прибрежной полосы моря и устьев рек, второй — к шельфовой зоне моря, третий — к открытым районам и морю в целом.

К основным компонентам системы относятся следующие:

1. Серия справочно-кадастровых пособий по 12 морским бассейнам, содержащих режимные и статистические данные по важнейшим элементам гидрометеорологического и гидрохимического режима морей и крупных морских устьев рек, которые широко используются многими практическими и научными организациями.

2. «Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях» (М.: Гидрометеоиздат, 1973), в котором изложены практические приемы расчета характеристик режима на основе натурных данных и теоретических исследований.

3. «Руководство по гидрологическим исследованиям в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях» (М.: Гидрометеоиздат, 1972), содержащее методические рекомендации по организации и проведению полевых изысканий непосредственно в районе проектируемых гидротехнических сооружений.

4. Методы расчета основных характеристик гидрометеорологических элементов на шельфах и открытых акваториях моря, позволяющие определить параметры ветра, волн, уровня, течений, льда при конкретных синоптических условиях и в многолетнем (режимном) плане, изданные в 1975—1983 гг.

5. Серия специализированных справочных пособий по гидрометеорологии и гидрохимии шельфа морей, состоящая из 13 томов, изданная в середине 80-х годов.

В соответствии с заданиями проекта «Моря» научно-технической программы ГКНТ «Мировой океан» 39 организациями Госкомгидромета СССР[1], Минрыбхоза СССР, АН СССР и союзных республик и других ведомств под общим руководством ГОИНа и специализированным научно-методическим руководством ВНИРО (океанологические основы формирования биопродуктивности морей), ГГО (метеорология и климат), ААНИИ (ледовые условия) подготовлена серия монографий «Гидрометеорология и гидрохимия морей». Серия состоит из 10 томов, включающих около 20 выпусков:

том I — Баренцево море;
том II — Белое море;
том III — Балтийское море;
том IV — Черное море;
том V — Азовское море;
том VI — Каспийское море;
том VII — Аральское море;
том VIII — Японское море;
том IX — Охотское море;
том X — Берингово море.

Каждый том состоит, как правило, из двух выпусков: «Гидрометеорологические условия» (вып. 1) и «Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биопродуктивности» (вып. 2). Для акватории некоторых морей подготовлен вып. 3, учитывающий особенности гидрометеорологических и гидрохимических условий моря и его отдельных районов.

В монографиях по единому типовому проспекту освещается широкий круг вопросов по метеорологии и климату, физической океанологии, динамике вод, гидрохимии, океанологическим основам биопродуктивности морей. Существенное внимание уделяется современным и ожидаемым антропогенным изменениям элементов режима. В силу объективных причин — специфики режима морей, степени изу-

[1] В связи с тем что сбор и обработка данных проводились до 1989 г., в работе используются прежние названия страны организаций, учреждений и т. д.

ченности, различного уровня теоретических разработок — в освещении некоторых вопросов по разным морям имеются существенные различия. Однако при разработке научной программы и в процессе выполнения работ перед исполнителями ставилась основная задача — отразить современный уровень знаний гидрометеорологических и гидрохимических условий.

В разделах по метеорологии и климату рассматриваются климатообразующие факторы — радиационные условия, циркуляционные процессы, орография берегов, морские течения, климатическое районирование; режим ветра, местные его особенности, штормы; температура воздуха — средние, экстремальные, характерные значения; аномальные сезоны; влажность воздуха; атмосферные осадки и снежный покров; облачность — общая, нижнего яруса, число дней с ясным, полуясным и облачным небом; опасные и стихийные гидрометеорологические явления — обледенение судов, туманы, метели, град, сильные морозы.

Разделы по физической океанографии содержат характеристики: температурного режима, теплового баланса; ледовых условий, включая условия ледового плавания и физико-механические свойства льда; солености — средняя соленость, соленость в зонах смешения морских и речных вод, многолетняя и сезонная изменчивость, антропогенные изменения солености; плотности — средние значения, сезонные изменения, вертикальное распределение, конвекция; цвета и относительной прозрачности вод; фронтальных зон; водных масс; водного и солевого баланса.

В разделах по динамике вод рассматриваются: средний уровень моря, колебания уровня различных временных масштабов, включая приливы; течения — крупномасштабная геострофическая и ветровая циркуляция вод, сезонная, межгодовая и синоптическая изменчивость течений, циркуляция вод в шельфовых районах моря, приливные течения, ветровые волны, их режимные характеристики, максимальные высоты волн по районам морей и по сезонам.

По гидрохимии морей дается общая характеристика гидрохимического режима и определяющих его факторов, солевой состав морских вод и его трансформация; режим кислорода, его межгодовая, сезонная и суточная изменчивость; водородный показатель (pH); щелочность как показатель смешения и происхождения вод в море, изменение ее под влиянием природных и антропогенных факторов; режим биогенных веществ — минеральных и органических, растворенных и взвешенных соединений кремния, азота и фосфора, характеристика элементов баланса биогенных веществ, антропогенные изменения баланса биогенных веществ.

В разделе «Океанологические основы формирования биопродуктивности», который впервые включен в подобного рода научно-справочные пособия, рассматривается влияние океанологических факторов на формирование биологической продуктивности вод, на воспроизводство, поведение и распределение основных промысловых объектов, дается оценка оптимальных факторов среды для обитания рыб в различные периоды их жизни.

При подготовке данной серии монографий исполнители стремились оптимально использовать имеющиеся натурные данные и современные гидродинамические и физико-статистические методы расчета гидрофизических и метеорологических параметров и характеристик, а там, где это было целесообразно, и полуэмпирические методы расчетов с привлечением натурных данных для оценки адекватности модели и натуры.

В результате исследований по проекту «Моря» уточнены существующие представления о характеристиках гидрометеорологического и гидрохимического режима морей, в частности:

— определены условия формирования режима элементов климата, закономерности их изменения в пространстве и времени и различные вероятностные характеристики;

— получены режимные характеристики ветра и волнения, непериодических колебаний уровня, приливов и льда;

— получены новые поля гидрологических и гидрохимических элементов и характеристики вертикальной структуры вод;

— уточнены данные о солевом составе и электрической проводимости вод морей, которые свидетельствуют о существенной трансформации ионного состава и минерализации речного стока под влиянием антропогенных факторов;

— изучены основные факторы формирования газового режима вод — вертикальная устойчивость, биопродукционные процессы, загрязнение морской среды и др.;

— исследованы механизмы и масштабы, даны оценки возможных изменений гидрометеорологического и гидрохимического режимов при осуществлении крупных водохозяйственных мероприятий, рассмотрена эффективность регулирования режима морей.

В целом настоящая серия монографий представляет собой естественное продолжение и развитие общей системы обеспечения режимной гидрометеорологической и гидрохимической информацией морских отраслей народного хозяйства и обороны страны на морях.

Монографии содержат большой объем фактических многолетних данных, полученных на прибрежных станциях и в экспедициях, и могут быть использованы как справочные материалы по гидрометеорологии, гидрохимии и биопродуктивности морей.

Если в процессе работы появится необходимость в более подробной информации по гидрологии, метеорологии, гидрохимии и загрязнению морей, она может быть получена в ГОИНе или в других НИИ и управлениях по гидрометеорологии по специальному запросу.

Общее научно-методическое руководство исследованиями по проекту «Моря» и по подготовке серии монографий «Гидрометеорология и гидрохимия морей» осуществлялось ГОИНом. Руководство исследованиями по отдельным морям осуществляли: МФ ААНИИ (Баренцево море), Севгидромет (Белое море), ЛО ГОИН (Балтийское море), СО ГОИН (Черное море), ГОИН (Азовское и Аральское моря), БО ЗакНИГМИ (Каспийское море), ДВНИГМИ (Японское, Охотское и Берингово моря).

Подготовка серии монографий «Гидрометеорология и гидрохимия морей» выполнена под общим руководством научного руководителя проекта «Моря» канд. геогр. наук Ф. С. Терзиева. Ответственные исполнители работ канд. геогр. наук Н. П. Гоп-

тарев, д-р физ.-мат. наук В. И. Калацкий, д-р геогр. наук А. И. Симонов (ГОИН), д-р геол.-минер. наук Гершанович (ВНИРО), канд. геогр. наук В. Е. Бородачев (ААНИИ), д-р геогр. наук М. М. Борисенко (ГГО).

Данная монография состоит из двух частей. Часть I «Океанологические основы формирования биологической продуктивности» подготовлена коллективом авторов Балтийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства, кроме главы «Микроорганизмы», которая написана научным сотрудником Института биологии Академии наук Латвии В. А. Юрковской. Авторами отдельных разделов являются: введение — Е. Я. Римш, гл. 1 — А. К. Юрковский и Е. М. Костричкина, гл. 3 — Б. Я. Калвека, гл. 4 — Е. М. Костричкина, Р. Я. Лине и Л. Л. Сидревиц, гл. 5 — Г. М. Швецова, гл. 6 — Е. М. Костричкина, гл. 7 — общая характеристика Е. Я. Римш, п. 7.1 — Б. К. Евтюхова, Э. А. Оявеер, Е. Ф. Трауберга, М. Е. Феттер, А. К. Наглис, А. П. Давидюк, В. Г. Беляшова, Г. Г. Корнилов, К. М. Лишева и Т. Д. Райд, п. 7.2 — Р. А. Апс, Ф. Г. Швецов, Г. Б. Грауман, М. Л. Стародуб и Н. М. Кондратьева, п. 7.3 — И. А. Лаблайка, М. Н. Лишев, Э. Я. Кондратович, Т. Д. Баранова, Г. Б. Грауман, Д. В. Узарс, М. А. Пликш и В. В. Ипатов, п. 7.4 — М. Я. Витиньш, И. В. Лебедева и Г. Б. Грауман.

При подготовке монографии авторы использовали результаты собственных исследований, а также литературные источники.

Часть II «Гидрохимические условия» подготовлена в Санкт-Петербургском отделении Государственного океанографического института (кроме гл. 16, выполненной в Институте экологии и морских исследований Академии наук Эстонии). Главы 8—10, 12 и 13 написаны И. С. Шпаер, при этом пп. 9.2.2 и 12.3.3 в соавторстве с И. Г. Яковлевым, а пп. 10.2.2 и 10.2.3 в соавторстве с Н. В. Мякишевой. Авторами гл. 11 являются Л. Б. Друмева и А. Е. Михайлов, гл. 14 — О. П. Савчук и М. О. Арсенчук (текст) и И. С. Шпаер (справочные материалы), гл. 15 — О. П. Савчук, гл. 16 — М. А. Симм, А. Ф. Талвари и Х. И. Янковский.

Научное редактирование гл. 8 и 9 выполнено А. Е. Михайловым, гл. 10—12 и 16 — О. П. Савчуком.

Статистические исследования проведены на основе информационной базы ВНИИГМИ—МЦД, подготовленной Н. Н. Михайловым, а программное обеспечение для ее корректировки, дополнения и подготовки к статистическому анализу разработано Е. А. Орловым. Разработка программ и расчет статистических характеристик осуществлены Т. Е. Чуриловой и М. И. Чуевым. Табличные и графические материалы подготовлены А. Б. Константиновой, Е. К. Баяндиной и М. В. Карягиным.

ЧАСТЬ I. ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

ВВЕДЕНИЕ

Балтийское море относится к бассейну Атлантического океана и является крупнейшим внутриматериковым морем севера Европы. Площадь Балтийского моря 422,6 тыс. км^2, объем 20 080 км^3. Море сравнительно мелководно, средняя глубина 48 м, максимальная — 459 м.

История Балтийского моря связана с многократными изменениями солености, температуры и других важнейших абиотических факторов, а также с образованием и исчезновением связей с соседними морями — Северным, входящим в бореальную область, и Белым, входящим в арктическую область. Все это наложило глубокий отпечаток на формирование фауны и флоры Балтийского моря.

Характерной чертой современной Балтики является сильно пониженная соленость вод (вследствие большого стока пресных вод и ограниченной связи моря с океаном) и большая неоднородность вертикального и горизонтального распределения солености, температуры и содержания кислорода по акватории моря, что в свою очередь является одним из главных факторов, определяющих особенности распределения и формирования животного и растительного мира. Основу современной фауны и флоры Балтийского моря составляют морские, солоноватоводные, пресноводные, бореальные, арктические, реликтовые, биполярные и космополитические виды, относящиеся к трем экологогеографическим комплексам — бореально-атлантическому, арктo-балтийскому (реликтовому) и пресноводно-солоноватоводному. Многие из них (морские и пресноводные организмы) фактически обитают на границах своего ареала. Большинство из этих представителей относятся к эвригалинным и эвритермным формам. Относительно стеногалинные морские виды в Балтийском море отсутствуют или их распространение ограничено лишь западной, наиболее соленой частью моря. Однако в целом флора и фауна Балтики имеют явно выраженный морской характер. Будучи совсем молодым морем, возникшим лишь в конце ледникового периода, оно не смогло создать эндемических, т. е. только ему свойственных родов и видов морских гидробионтов, отличаясь в этом отношении от более древних морей, подобных Северному.

Важным фактором, ограничивающим проникновение в Балтийское море морских и пресноводных гидробионтов, является соленость, а бореальных и арктических — температура воды. Эти же факторы являются определяющими в распределении гидробионтов по акватории моря. В соответствии с ними наибольшее число морских и бореальных видов отмечается в западной и южной частях моря, пресноводных — в заливах либо вблизи устьев рек. Холодолюбивые организмы, особенно ледниковые реликты, наиболее многочисленны в центральных районах моря и заливов, где они населяют зоны (слои воды), связанные с холодным промежуточным слоем, или верхнюю часть глубинной зоны моря; в заливах они обитают в основном в глубоководной зоне. В условиях разобщения глубоководных районов у относительно стенотермных холодолюбивых видов формируются популяции животных, например, амфиподы. Общей закономерностью для морских форм гидробионтов является снижение их численности по мере удаления от Датских проливов на северо-восток, обусловленное уменьшением солености воды. Одной из характерных особенностей фауны и флоры Балтийского моря является общая видовая бедность, но в то же время высокая их продуктивность, т. е. высокая эффективность утилизации продукции на различных трофических уровнях. В частности, промысловая рыбопродуктивность Балтийского моря в последние годы составляет 27 кг/га, что дает право отнести его к числу высокопродуктивных рыбопромысловых морских водоемов Мирового океана.

По рыбному населению Балтийское море относится к сельдево-тресковым водоемам и благодаря своему выгодному географическому положению и особенностям природных условий играет важную роль в рыбопромысловом потенциале нашей страны и других государств, расположенных на его берегах. Общий вылов рыбы в 80-х годах достиг около 0,9 млн т. Высокие вкусовые качества промысловых рыб, близость промысла к крупным районам потребления, возможность быстрой доставки свежей рыбы для снабжения населения и широкая сеть перерабатывающих предприятий обусловили особую заинтересованность прибалтийских стран в местном рыболовстве.

Настоящее научно-справочное пособие является первой попыткой осветить в доступной форме для широкого круга специалистов различных отраслей народного хозяйства основные особенности биопродукционных процессов Балтийского моря, т. е. осветить экологические и биоценотические взаимосвязи в сообществах бактериопланктона, фитопланктона, зоопланктона, нектобентоса, зообентоса и рыб с физико-химическими факторами среды, влияние гидрометеорологического и биогенного режимов на динамику численности и распределение морских гидробионтов по сезонам и районам моря, слоям воды.

При написании данного пособия авторы преследовали две главные цели. Во-первых, в пределах ограниченного объема изложить основные сведения об океанологических основах биологической продуктивности Балтийского моря. Во-вторых, на примере конкретных новейших научных материалов показать существующую тесную взаимосвязь процессов формирования биоресурсов и изменчивости абиотических и биотических факторов среды в сезонном, годовом и многолетнем аспектах. Это обусловило как последовательность, так и содержание излагаемого материала.

1. ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ТЕНДЕНЦИЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ЭКОСИСТЕМЫ МОРЯ

Живые организмы в природе находятся в постоянном взаимодействии с абиотическими (физическими, химическими) факторами среды, не только приспосабливаясь к ним, но в процессе своей жизнедеятельности оказывая существенное влияние на физико-химические процессы в среде. В результате живой и косный (неживой) компоненты функционируют как единое целое, образуя экосистему.

Химические элементы, в том числе заключенные в биологических объектах экосистемы, циркулируют в биосфере по характерным более или менее замкнутым путям из внешней среды в организм и обратно, совершая биогеохимический цикл. Однако в реальных условиях в процесс функционирования экосистемы часть вещества и энергии из данного круговорота веществ может выходить, перемещаясь в другие экосистемы.

Специфическими особенностями, присущими экосистеме Балтийского моря, являются, с одной стороны, сильное влияние пресноводного стока, с другой — притоков трансформированных североморских вод.

Динамика распределения биогенных веществ в Балтике тесно связана с особенностями гидрологии моря. Концентрация фосфора и кремния возрастает ко дну ввиду плотностной стратификации водных масс, обусловливающей относительную изолированность глубинных вод, аккумуляцию фосфатов и силикатов в придонных слоях. Однако высокие концентрации биогенных веществ у дна губоководных впадин имеют и другую причину. При ослаблении водообмена с Северным морем в придонных слоях исчезает кислород и происходит интенсивное перераспределение соединений фосфора и азота из донных отложений в воду. Но одновременно при низких концентрациях кислорода имеет место денитрификация — восстановление нитратов до молекулярного азота, т. е. выход азота из продукционно-деструкционного цикла. Поэтому отношение содержания нитратов к фосфатам в хемоклине низкое, что существенно для сукцессии фитопланктона в Балтике, в том числе для летнего массового размножения сине-зеленых. Специфическое для Балтийского моря явление — «дождь» флокул терригенных веществ, уносящих с собой на дно фосфаты. Соосаждение фосфатов с гуминовыми веществами создает встречный, компенсационный диффузионному поток биогена, перемещающий его из хемоклина на дно. Этим усиливается направленный вниз транспорт фосфора, осуществляемый в процессе сцементации остатков организмов, что может являться одной из наиболее важных причин высокого содержания элемента в донных отложениях Балтики. Стратификация вод Балтики, обусловливаемая соотношением объемов речного стока и соленых водных масс, поступающих из Северного моря, изменчива. Этим, в свою очередь, определяются межгодовые изменения потока вещества через галоклин. Послойное перераспределение биогенных веществ активизируется гидродинамическими процессами в глубинах моря. Мощный фактор — это адвекция каттегатских вод. Вторжение водных масс по активному глубинному слою интенсифицирует обменные процессы в зоне высоких градиентов концентрации солей. Особенно эффективно эта зона «пробивается» в районах, где глубинное течение сталкивается со склонами впадин. Наиболее интенсивный направленный вверх поток веществ имеет место при сочетании по времени подтоков по придонному и глубинному активному слоям. Адвекция каттегатских вод усиливает неравномерность выхода биогенных веществ в верхний слой как по акватории моря, так и в течение года. Основной фон создается комплексом других факторов локализирующего действия. Спорадическая смена аэробных и анаэробных условий глубинных вод формирует межгодовые циклы динамики биогенов в застойных впадинах. Они обусловливаются периодичностью интенсивности и направленности обмена между донными отложениями и водой и между слоями, а также биохимических и физико-химических процессов в самой водной толще. Межгодовые циклы происходят на фоне периодических (сезонных) изменений, наблюдаемых во всей водной толще впадин. Наиболее гармоничными являются изменения в верхнем слое. С углублением горизонта периодический компонент динамики биогенов вычерчивается менее ярко. Количественный уровень межгодовых циклов определяет в конечном счете многолетнюю тенденцию. С 1961 по 1985 г. в среднем ежегодно увеличивалось содержание фосфатов в хемоклине. Зимнее обогащение фосфором верхнего слоя моря началось в 1969-70 г. До 1981 г. просматривался неуклонный рост количества нитратов в хемоклине. До конца 70-х годов повышалось зимнее количество нитратов в верхнем слое Балтики. Многолетний рост количества фосфатов и нитратов в хемоклине — антропогенный фактор, усиливающий тенденцию обогащения фосфором и азотом верхнего слоя Балтики в период интенсификации массообмена. Межгодовые циклы содержания фосфора и азота в Балтике можно объяснить природными процессами.

Большое значение для Балтики имеют эвриокийные формы. В отдельных его районах к ним присоединяются менее эвриокийные элементы флоры, которые отражают специфическую картину сообщества, его продуктивность и происходящие в течение года сукцессии. Годовой цикл фитопланктона и его продуктивность соответствуют аналогичным процессам бореального моря, при этом определяющую роль играют освещенность, наличие биогенных веществ и стабильность вод. В отдельных районах моря могут возникать отклонения от генерального хода развития фитопланктона вследствие дополнительного поступления биогенов, наличия особых гидрологических условий или вследствие различий в продолжительности вегетационного периода. Для собственно Балтики выявлен рост массы и продуктивности фитопланктона как следствие все возрастающего поступления биогенов с речными водами и из атмосферы.

Известно, что продуктивность моря определяется количеством питательных веществ, вступающих в биогеохимический цикл. Под воздействием солнечной энергии с помощью хлорофилла растительные организмы утилизируют биогенные вещества и синтезируют пищевой материал для растительно- и де-

тритоядных беспозвоночных, которые в свою очередь служат кормом для животных более высоких трофических уровней. Эти отношения сложны и взаимосвязаны. Так, в процессе весенней сукцессии фитопланктона в Балтийском море происходит не только смена в системе связей «биогены — фитопланктон», но и изменяется видовой состав фитопланктона, что в свою очередь оказывает существенное влияние на размножение планктонных ракообразных. Уменьшение численности мелкого зоопланктона обычно совпадает со снижением количества ихтиопланктона (шпрота). Установлены также связи между сроками вылупления личинок некоторых видов рыб и ритмами размножения отдельных видов рачкового планктона.

Вместе с тем, выделяя метаболиты, зоопланктон оказывает влияние на динамику биогенных веществ. В частности, известно, что в Балтийском море мочевина используется фитопланктоном в качестве пищи и в летний сезон является важным источником пополнения вод солями азота.

Концентрация биогенных веществ в фотосинтетическом слое определяет уровень развития фито- и зоопланктона. По мнению многих исследователей, биогенами, лимитирующими развитие фитопланктона в Балтийском море, могут быть как фосфор, так и азот. С начала 60-х до начала 80-х годов были установлены четкие прямые зависимости между концентрацией биогенов (как пищевого фактора) и количеством зоопланктона. При этом в связи с изменением под влиянием эвтрофикации соотношения в воде содержания азота и фосфора и более быстрого накопления в среде фосфора, чем азота, значение азота в последние годы усилилось.

Пространственная неоднородность распределения биогенных солей определяет неравномерность распределения планктона, а наличие апвеллингов способствует формированию зон повышенной биопродуктивности. Такие зоны обычно наблюдаются в районах Гданьского залива, Слупского желоба, юго-восточного и северо-восточного склонов Готландской котловины. Заметное влияние на вынос биогенных веществ не только в прибрежной зоне, но в отдельные годы в открытых районах моря оказывают также прибрежные апвеллинги, возникающие в результате ветровой деятельности. Например, в августе 1982 г. под влиянием сильных и длительных северо-восточных ветров у восточного побережья сформировался мощный апвеллинг, влияние которого, судя по зоопланктону, явно прослеживалось на значительной площади центрального района моря.

Особенности режима моря, определяющие распределение животных и растений по его акватории, оказывают существенное влияние и на их экологию. Примером может служить планктонный рачок *Pseudocalanus elongatus B.* Имея широкое распространение от Норвежского до Гренландского моря на западе до Японского моря на востоке, встречаясь у побережья США и в Черном море, он является типичным неритическим видом, населяющим поверхностные воды. В Южной Балтике в условиях термической и соленостной стратификации он обитает преимущественно в средних слоях воды, а в более опресненной восточной части моря является наиболее массовым видом глубоководной зоны. В еще более опресненный Рижский залив он заносится с балтийскими водами, но в нем не размножается. В результате температурный и соленостный оптимумы у него в Балтийском море снижены по сравнению с другими морями.

Другим следствием низкой солености является уменьшение размеров и снижение темпа роста морских организмов. Так, максимальный размер *Mytilus edulis* у берегов Англии достигает 150 мм, в Кильской бухте — 110 мм, в Восточной Балтике — 45 мм, в Рижском заливе — 31 мм.

Многолетние колебания климата и режима моря оказывают значительное влияние на его биоту. В периоды осолонения оно выражается в усилении роли и повышении численности морских видов, в годы опреснения — солоноватоводных и генеративно-пресноводных; в теплые периоды повышается значение тепловодных (бореальных) форм, при похолодании — бореально-арктических и арктических. Изменение соотношения видов сказывается в свою очередь на биоценотических связях. Примером может служить взаимоотношение трески и шпрота (хищник — жертва). В зависимости от состояния запасов, распределения этих рыб мгновенная смертность шпрота от выедания треской изменяется по сезонам от 0,02 до 1,07, а среднегодовая — от 0,21 до 0,75.

В Рижском заливе неблагоприятное воздействие промысла в сочетании с усиленным выеданием треской привело к резкому сокращению запасов бельдюги. Наблюдалась тенденция к уменьшению количества других кормовых объектов трески (морского таракана, понтопорей), вызванная не только естественными океанографическими причинами, но усугубляемая выеданием треской. Можно полагать, что уменьшение количества ракообразных могло снизить пресс этих животных на молодь моллюска — *Macoma baltika*, которую они поедают. Это было дополнительным положительным фактором, способствующим увеличению количества макомы в зонах глубин, где эти ракообразные обитают.

Важным экологическим фактором в экосистеме Балтийского моря в последние десятилетия становится антропогенное загрязнение. Повышение биогенного стока с суши вызвало рост концентрации биогенных веществ в фотическом слое и, как следствие этого, увеличение биологической продуктивности. В частности, это выразилось в возрастании количества планктона и зообентоса, ускорения темпа роста планктоноядных рыб. Произошли изменения в структуре сообществ беспозвоночных и их распределении. Увеличение количества органического вещества усилило окислительно-восстановительные процессы, что повлекло за собой увеличение потребления кислорода и, как следствие этого, расширение площадей заморных зон в глубоководных впадинах.

Таким образом, существующие зависимости параметров среды между собой, среды и организмов, биоценотические связи организмов полностью подтверждают тесную взаимосвязь отдельных элементов экосистемы Балтийского моря и в настоящее время широко используются в практике океанологического и рыбопромыслового прогнозирования.

2. МИКРООРГАНИЗМЫ

В поле зрения морской микробиологии входят следующие объекты исследования: бактерии — одноклеточные микроскопические организмы, включающие круглые, цилиндрические и извилистые формы, плесневые грибы и актиномицеты — одноклеточные и многоклеточные организмы, образующие ветвящееся тело (мицелий) и имеющие сложные органы плодоношения; дрожжи — сумчатые грибы, отнесенные к одноклеточным организмам; фаги — ультрамикроскопические паразиты бактерий, актиномицетов и других микроорганизмов; вирусы — возбудители разнообразных болезней человека, животных и растений. Кроме небольших групп фото- и хемоавтотрофных бактерий, основная часть микроорганизмов — гетеротрофы.

2.1. Краткие исторические сведения о микробиологических исследованиях

Первое сообщение о бактериях Балтийского моря появилось в конце XIX в. [14]. Затем до 50-х годов XX в. микробиологические работы в Балтийском море проводились с большими перерывами и носили эпизодический характер. В 1911—1912 гг. были начаты и в 1920—1924 гг. продолжены исследования микробиологических процессов и санитарного состояния в восточной части Финского залива, в так называемой Невской губе. В 1930—1931 гг. впервые изучалась западная часть Финского залива [123].

Микробиологические исследования в Балтийском море значительно расширились начиная с 60-х годов и продолжаются до настоящего времени. В этот период возобновилось исследование Финского залива [58, 138], начато изучение Рижского залива [68], зал. Куршю Марес [193], Кильского залива и фьордов [401], прибрежной зоны [219, 293, 301] и открытой части Балтийского моря [478].

Новые данные о бактериальном населении открытых вод Балтийского моря получены во второй половине 70-х годов [14, 337, 340]. Во время 1—3-й советско-шведских комплексных экспедиций на НИСП «Муссон», «Эрнст Кренкель» и НИС «Аю-Даг», проведенных соответственно в 1976, 1978 и 1979 гг., изучалась микрофлора и ее активность по всей акватории Балтики [14, 62, 182, 196, 217]. Основательно и в разных аспектах исследована микрофлора и микробиологические процессы в Кильской бухте. Основное внимание уделено изучению роли микроорганизмов в самоочистительных процессах [248, 401, 452], микробиологической активности бактерий [258, 276, 306, 323, 325], санитарному состоянию и таксономическому составу бактерий [259, 401], грибов и дрожжей [401, 467].

В Рижском заливе, кроме систематических наблюдений за количеством и распределением микроорганизмов в прибрежной зоне южной части [68] и по акватории залива [4], большое внимание уделено изучению роли микроорганизмов в самоочищении вод от нефтяного загрязнения [122, 155]. Микрофлора донных отложений Балтийского моря по сравнению с бактериопланктоном изучена в меньшей степени. Имеются отдельные сообщения о серном цикле и распределении сульфатредуцирующих бактерий в седиментах [221, 293, 310, 478], о прикрепленных к песчинкам бактериях [502], о метаболической активности бентосных бактерий [258, 299, 400] и о количественном распределении отдельных физиологических групп микроорганизмов [3, 221, 478].

2.2. Общая численность, биомасса и продукция бактериопланктона. Сезонная динамика и распределение

Общая численность бактерий в воде исследованных областей Балтийского моря варьирует в широких пределах: в Финском заливе от 0,26 до 2,30 млн [123, 219], в Рижском заливе от 0,82 до 9,90 млн [4, 68], в зал. Куршю Марес от 0,8 до 14,1 млн кл/мл [161], в Кильской бухте и в фьордах от 1,2 до 6,8 млн кл/мл [399, 451, 509], вдоль береговой линии от 0,12 до 4,32 млн кл/мл [4, 219], в открытых водах Балтийского моря от 0,05 до 6,14 млн кл/мл [2, 14, 182, 220]. Наиболее низка численность и биомасса бактериопланктона в зимний период: соответственно 0,05—1,23 млн кл/мл и 8—180 мг/м^3. При зимней гомотермии [2, 182, 245, 337] микроорганизмы по всем горизонтам водной толщи распределены сравнительно равномерно (рис. 2.1 *а*). При летней температурной стратификации вод наиболее богатым бактериальным населением является верхний слой 0—30 м (рис. 2.1 *б*) [2, 14, 217, 222, 245, 337, 424]. Под термоклином концентрация бактерий снижается в 4—10 раз. Отмечается тенденция к повышению плотности микробного населения в придонных слоях воды. Наиболее развиты микробиоценозы в районах моря, прилегающих к Датским проливам, в Арконской и Борнхольмской [182] и Готландской впадинах [2, 337], в прибрежных водах заливов [68, 123, 161, 451] и др.

Отмечены суточные колебания количества бактерий с максимальными значениями в утренние и вечерние часы и минимальными — в часы максимальной солнечной радиации [14, 480].

Из морфологических форм палочковидные бактерии составляют в открытом море 38—75 % [222], в Рижском заливе — 85—95 % [4]. Объем палочковидных бактерий составляет в Рижском заливе 0,21 мкм^3 [4], в открытых водах Балтийского моря зимой 0,17 мкм^3 и летом 0,77 мкм^3 (по данным автора), в прибрежных водах Швеции 0,12—0,24 мкм^3 [364]. Средний объем кокковидных бактерий в Рижском заливе равен 0,12 мкм^3 [4], в открытых водах — 0,07 мкм^3 зимой и 0,15 мкм^3 летом (по данным автора). Биомасса палочковидных бактерий составляет 88—98 % общей массы микроорганизмов [222]. Изменения концентрации бактериальной биомассы в пространстве и времени соответствуют изменениям общего количества бактерий (табл. 2.1). Принимая среднее значение бактериальной биомассы равным летом 460 мг/м^3 [14], зимой 40 мг/м^3 [182], можно полагать, что биомасса микроорганизмов в Балтийском море составит соответственно 10,0 и 0,89 млн т.

Летом в районе Готландской впадины время генерации бактерионейстона (в слое 0—2 см) равняется 10 ч, бактериопланктона (в слое 0—0,5 м) — 18 ч. Суточная продукция составляет в среднем соответственно 965 и 380 мг/м^3 [14]. В районе Аскё

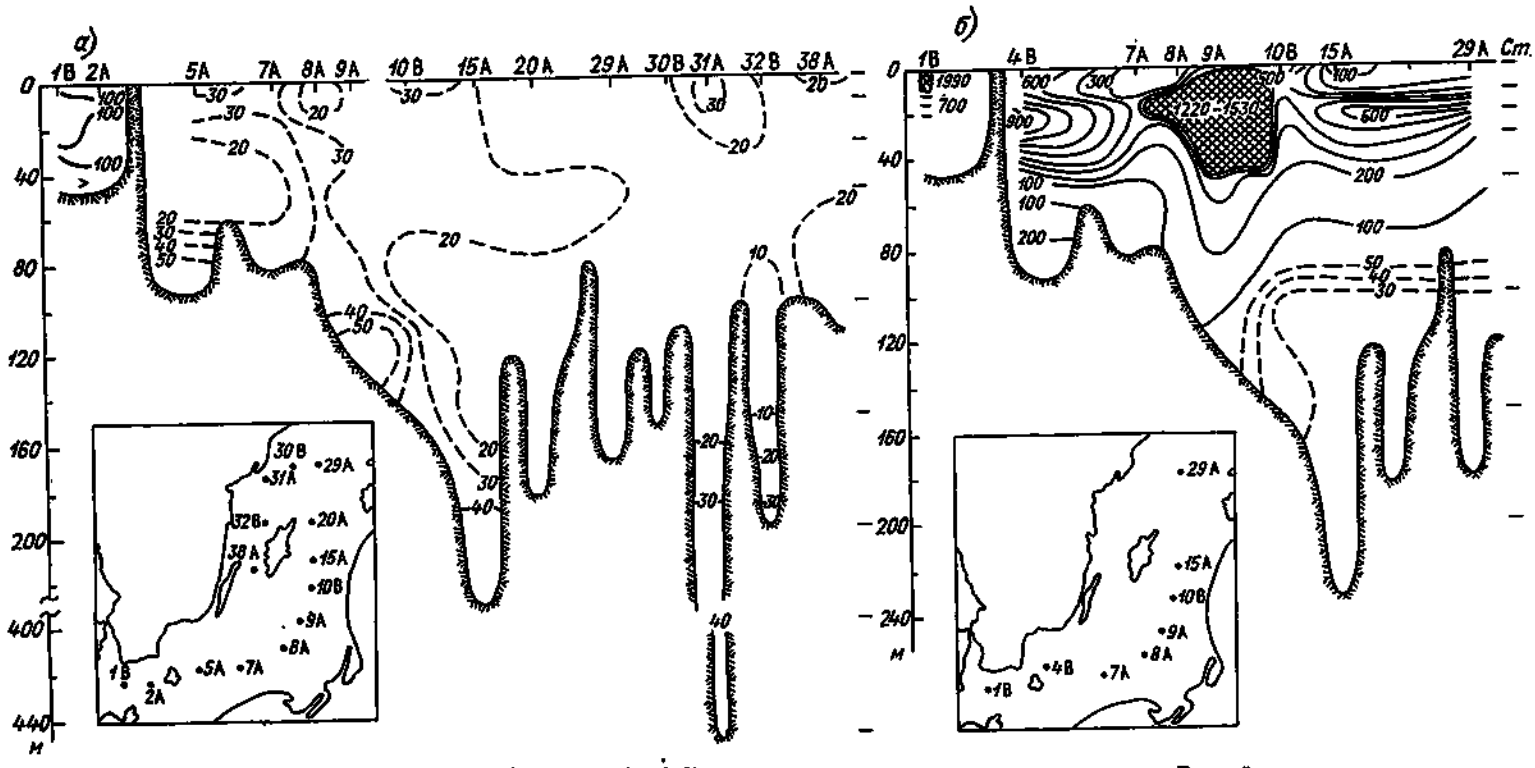


Рис. 2.1. Распределение бактериальной биомассы (мг/м³) в водном слое на продольном разрезе Балтийского моря в марте (*а*) и августе (*б*) 1978 г., по [337].
С правой стороны нанесены горизонты отбора проб; штриховкой показаны области резких градиентов биомассы.

(прибрежные воды Швеции) время одной генерации бактерий составляет 34—68 ч, суточная продукция — 44—90 мг/м³, годовая — 28 г/м³ [14].

Зимой в районе Арконской впадины бактериальная продукция составляет 80 мг/(м³·сут), а в проливе между островами Эланд и Готланд — 200 мг/(м³·сут) [182].

В Рижском заливе удвоение бактериальной биомассы проходит летом за 13,5 ч, осенью за 22,1 ч [4]. В прибрежных водах Балтийского моря время генерации бактерий в среднем составляет летом 34 ч, осенью 80 ч, зимой 165 ч, суточная продукция — летом 650 мг/м³, зимой 35 мг/м³ [2].

В эвтрофированном районе южной части Балтийского моря бактериальная продукция составляет 18 %, в открытой части моря — 24 % первичной продукции [364].

2.3. Физиологические и таксономические группы микроорганизмов

Большая часть пресноводных бактерий, внесенных с речными и сточными водами в морские, отмирает при солености воды 50 ‰. Их места занимают представители солоноватых и морских вод [452]. Изменяется также пропорциональное соотношение различных физиологических групп [325].

В пелагиали Балтийского моря доминируют галофильные бактерии, которые максимального развития достигают при солености 10—25 ‰. Их развитие ингибируется как пресной водой, так и истинной морской водой с соленостью 35 ‰ [245, 401, 452].

Более высокую толерантность к солености проявляют грибы. Многие их виды встречаются в раз-

Таблица 2.1

Соотношение проб (%) с различной биомассой в воде Рижского залива и Балтийского моря

Месяц и год	Число проб воды	Биомасса, мг/м³							Источник
		1—10	11—100	101—250	251—500	501—750	751—1000	более 1000	
Рижский залив									
X 1980	53	0	54	27	19	0	0	0	[4]
VIII 1981	102	0	54	34	7	4	1	0	
Балтийское море									
X 1977	76	0	0	15	32	35	17	1	[2]
III 1978	186	6	82	12	0	0	0	0	
VIII	96	0	25	20	20	15	6	14	
VI 1979	61	0	20	13	18	20	13	16	
X—XI	30	0	3	47	47	3	0	0	
IX—X 1980	60	0	0	2	12	7	17	22	Данные автора
VIII 1983	72	0	0	2	4	7	4	83	
III 1984	82	0	31	56	13	0	0	0	

ных районах моря. Особенно много представителей низших грибов порядка Chytridiales и Saprolegniales [245, 322]. В эстуариях Балтийского моря выделены грибы, включая дрожжи, классов Ascomycetes и Deuteromycetes [245, 467]. В Финском заливе напротив г. Таллинна выделены грибы трех классов — Deuteromycetes, Ascomycetes и Zygomycetes [13]. Среди грибов класса Ascomycetes обнаружены в очень большом количестве только представители Saccharomycetaceae. Способность микроорганизмов быстро адаптироваться к новым экологическим факторам природного или антропогенного характера и высокая биохимическая активность являются основой индикации загрязнения в море с помощью микрофлоры. Индикаторной микрофлорой выбраны следующие физиологические группы микроорганизмов — сапрофитные, нефтьокисляющие, липолитические, парафинокисляющие, ксилолокисляющие, фенолокисляющие, а также бактерии, окисляющие бенз(а)пирен (БП) и полихлорированные углеводороды (ПХБ).

Летом концентрация сапрофитной микрофлоры колеблется в пределах 10^2—10^6 кл/мл [2, 14, 182, 217]. Распределение сапрофитных бактерий меняется довольно четко по районам: по мере продвижения от Готландской впадины к северу происходит уменьшение численности микроорганизмов [14]. Повышение количества сапрофитов наблюдается также на загрязненных участках прибрежной зоны моря и заливов [5, 401 .

Зимой по центральному разрезу Балтийского моря концентрация сапрофитных бактерий на 2—5 порядков меньше, чем летом, и составляет 0,001—10 % всего микробиоценоза [182]. Годовой цикл изменений количества гетеротрофов в воде в западной и северной частях Балтийского моря указывает на четко выраженную сезонность [245]. В Кильской бухте первый пик максимума численности гетеротрофов-сапрофитов наблюдается весной, второй — в конце лета или осенью (рис. 2.2). Сапрофитные бактерии, изолированные в открытой части моря в летний период, принадлежат к родам *Micrococcus,*

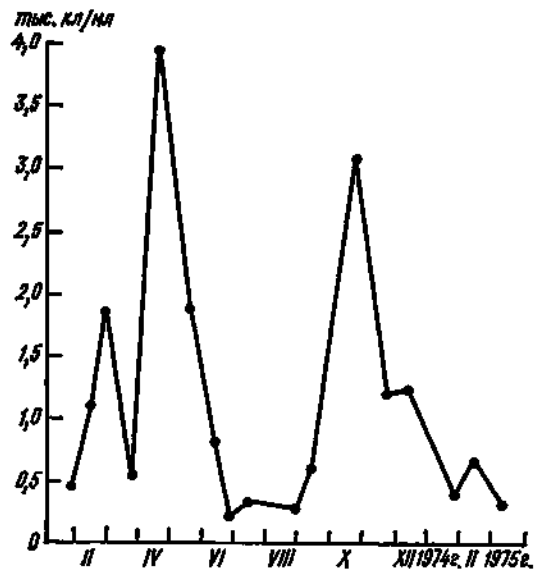


Рис. 2.2. Годовой ход численности гетеротрофных бактерий в центральной части Кильской бухты, по [451].

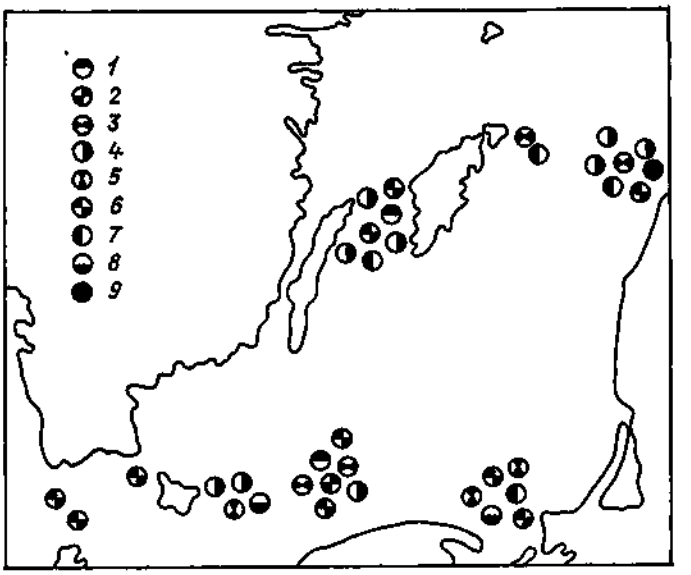


Рис. 2.3. Распределение таксономических групп микроорганизмов в открытой части Балтийского моря (июнь 1976 г.), по [14].

1 — Micrococcus; 2 — Flavobacterium; 3 — Microbacterium; 4 — Bacillus; 5 — Arthrobacter; 6 — Pseudomonas; 7 — Citrobacter; 8 — Mycobacterium; 9 — Aerococcus.

Flavobacterium, Pseudomonas, Mycobacterium, Microbacterium, Citrobacter, Aerococcus, Bacillus, Arthrobacter [14, 182]. Наиболее распространенными таксономическими группами являются микроорганизмы родов *Pseudomonas* и *Micrococcus* (рис. 2.3). Определено, что 80 % изолированных сапрофитных культур развиваются в присутствии нефтяных углеводородов [14, 182]. В Кильской бухте временами повышается численность бактерий вида *Agrobacterium* [232]. Авторадиографическим методом выявлено, что бактериальная популяция загрязненных кильских вод способна усваивать целый ряд лабильной и токсической субстанции (табл. 2.2).

Таблица 2.2

Доля (%) физиологических групп бактерий в гетеротрофной популяции в Кильской бухте (среднее за 1973—1975 гг.), определенная авторадиографическим методом (Хоппе, цит. по [245])

^{14}C-субстрат	Кильский фьорд		Кильская бухта	
	вода	седименты	вода	седименты
Глюкоза	100	100	100	100
Фруктоза	93	100	100	—
Ксилоза	77	91	74	81
Галактоза	41	66	40	59
Сахароза	95	100	91	88
Лактоза	71	75	68	73
Мальтоза	86	—	79	—
Глюкозамин	90	—	—	—
Растворимый крахмал	95	100	99	100
Ацетат натрия	94	90	93	82
Глицерин	83	—	93	—
Глюколовая кислота	34	30	31	13
Мочевая кислота	28	23	29	33
Аспарагиновая кислота	97	—	97	—
Жиры	18	37	25	41
Фенол	21	66	14	24
ДДТ	11	1	3	3
Рибофлавин	34	40	23	44

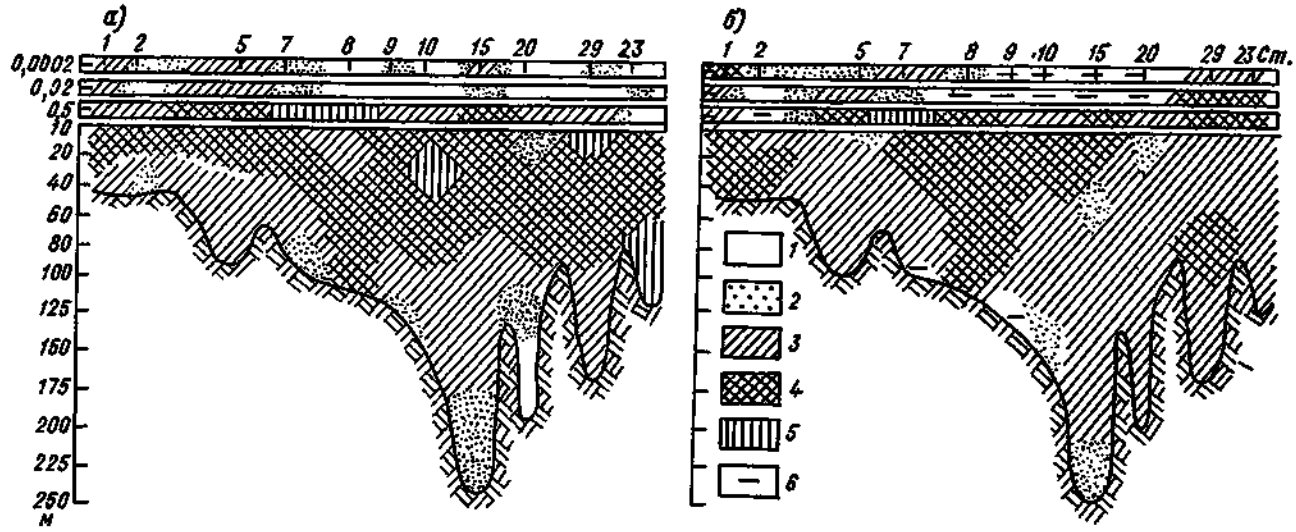


Рис. 2.4. Вертикальный профиль парафинокисляющей (*а*) и БП-окисляющей (*б*) микрофлоры (кл/мл) по осевому разрезу Балтийского моря (июнь 1979 г.), по [217].

1) 0; *2*) 10—99; *3*) 100—999; *4*) 1000—9999; *5*) 10000—99999; *6*) нет данных.

На участках моря, загрязненных нефтью, много нефтьокисляющих и соляровое масло окисляющих бактерий [14, 112, 155].

Концентрация нефтьокисляющих бактерий в открытых водах Балтийского моря меняется в пределах 10—10^4 кл/мл с максимальной плотностью в поверхностном слое [14]. Их вертикальное и пространственное распределение носит характер явной пятнистости.

Впервые в практике летом 1976 г. проведено изучение группы ксилолокисляющих бактерий [14]. Они распространены в основном в приповерхностном микрогоризонте моря и составляют 0,1—0,01 % числа сапрофитов [14, 182]. Распределение ксилолокисляющих бактерий зимой более локальное — в районе Готландской впадины и в южной части Балтики [182]. В прибрежных водах Балтийского моря ксилолокисляющие бактерии найдены в количестве 10^2—10^3 кл/мл [219], в Рижском заливе — 10—10^3 кл/мл, что составляет 0,01—30 % количества сапрофитов [155].

Характер распределения численности парафинокисляющих бактерий (10—10^4 кл/мл) соответствует картине вертикального профиля общей численности микроорганизмов и сапрофитных бактерий (рис. 2.4). Это свидетельствует о том, что большая часть микроорганизмов способна окислять парафиновые углеводороды [217].

Липолитические бактерии, участвующие в трансформации расщепленных нефтепродуктов, обнаружены главным образом на разделе фаз вода—воздух, в области термоклина и в полуметровом слое [14, 155], численность липолитической микрофлоры в водах Центральной Балтики находится в пределах 0—10^6 кл/мл [14], в Рижском заливе — 10—10^6 кл/мл [155] и составляет от общего числа микроорганизмов 0,1—1,0 и 0,001—1,0% соответственно.

Углеводородокисляющие бактерии, изолированные в Рижском заливе, принадлежат к родам: *Pseudomonas, Pseudobacter, Bacterium, Micrococcus, Achromobacter, Mycobacterium.* Наиболее распространены микроорганизмы родов *Pseudomonas* и *Mycobacterium* [155].

Распределение ПХБ-окисляющих бактерий зимой носит очаговый характер. Эти микроорганизмы приурочены в основном к приповерхностному микрогоризонту и придонным слоям воды [182]. Летом ПХБ-окисляющие бактерии широко распространены, их численность колеблется в пределах 10—10^5 кл/мл (рис. 2.5). Наибольшая концентрация этих бактерий отмечена в районе Готландского бассейна и в области Датских проливов [217], т. е. в том же регионе, где наибольшее содержание ПХБ [217]. Практически на всех обследованных станциях Балтийского моря обнаружены БП-окисляющие и БП-толерантные микроорганизмы. Численность БП-окисляющих бактерий зимой колеблется в пределах 10—10^3 кл/мл [182], летом — 10—10^4 кл/мл (см. рис. 2.4). Содержание БП-толерантных микроорганизмов выше, чем БП-окисляющих, в среднем на 1—2 порядка [217].

Анаэробные условия, присутствие органических веществ и сульфатов способствуют развитию сульфатредуцирующих бактерий в воде и в седиментах [221, 248, 293, 310, 401, 478]. Однако численность сульфатредуцирующих бактерий в донных отложениях может превысить их число в воде до 200 тыс. раз [248, 478].

Исследования в Кильском фьорде, в Гданьской бухте и в Финском заливе показывают, что количество целлюлозоразрушающих бактерий достигает максимума в осенние месяцы [380, 451, 497], мочевину разлагающих бактерий — в зимние месяцы [451].

2.4. Взаимоотношение микрофлоры и водных организмов

Многообразные связи популяций в биоценозах подразделяются на прямые и косвенные. В первом случае наблюдается непосредственный контакт между особями взаимодействующих популяций, во втором — адаптация к результатам жизнедеятельности друг друга. Большую роль во взаимодействиях популяций играют биохимические реакции, реализующиеся через выделение в воду метаболитов. В северной части Балтики экскреция внеклеточных продуктов фотосинтеза достигает 45 % [363], в Кильской бухте 2—21 % всего ассимилированного углерода [325]. Чистая бактериальная продукция в се-

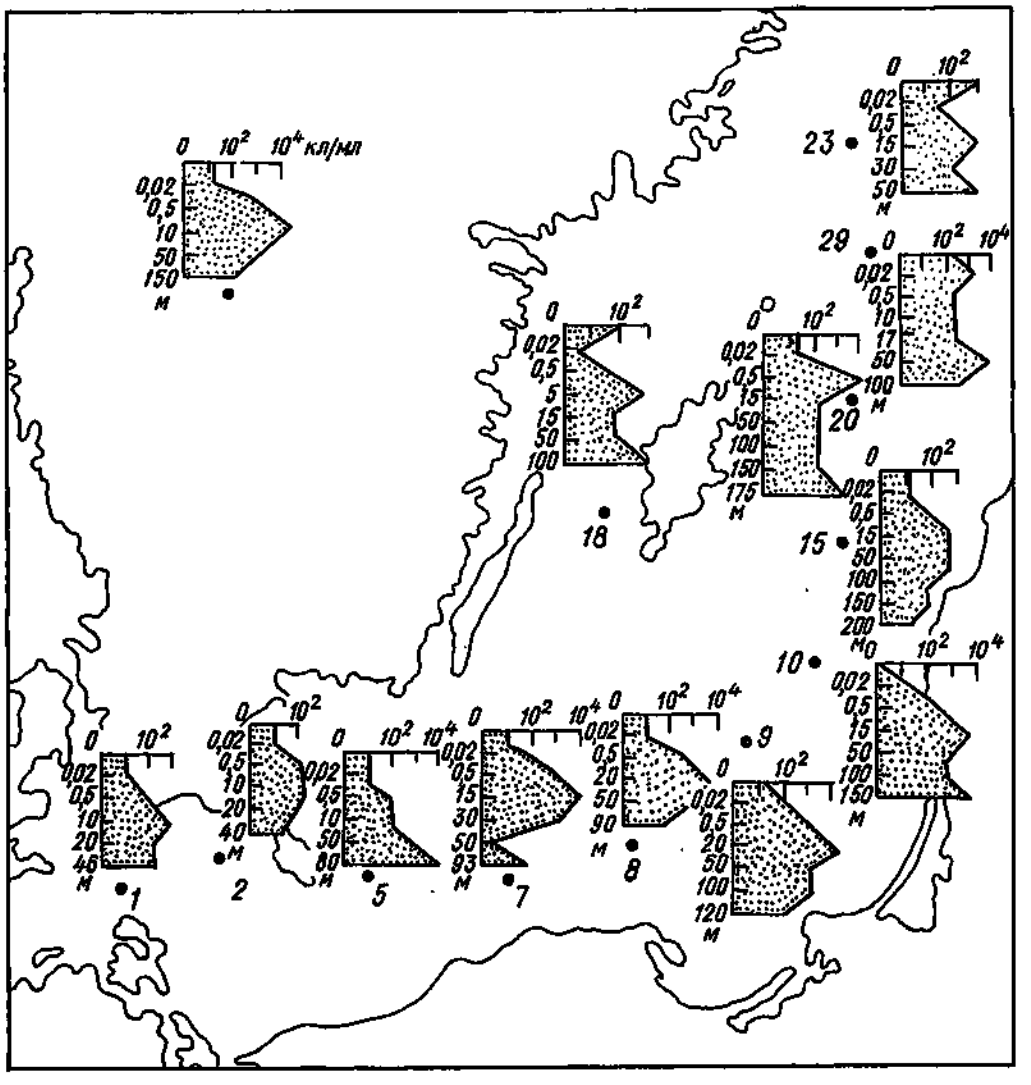


Рис. 2.5. Распределение ПХБ-окисляющих микроорганизмов (кл/мл) по осевому разрезу Балтийского моря (июнь 1979 г.), по [217].

верной части Балтики может составить 29 г С/м³ или 25 % продукции фитопланктона [245, 363]. Бактерии Балтийского моря могут ассимилировать за 1 ч 8,0—17,5 % [325], за 24 ч 0,0—88,7 % всех выделенных метаболитов [245]. Прижизненные выделения водорослей — один из основных источников питания бактерий. В определенных этапах развития фито- и бактериопланктона наблюдаются как четко выраженный положительный характер [222, 337], так и тенденция обратной связи [440]. В сезонном цикле численность гетеротрофных бактерий достигает максимальных значений во время массового отмирания фитопланктона [245].

Метаболиты, выделенные во время активного развития водоросли *Chlorella*, оказывают ингибирующее действие на *Escherichia coli* [453].

Во взаимоотношениях между бактериями в слизи и клеткой-хозяином *Microcystis aeruginosa* прослеживается мутуализм [453].

Бактерии, в меньшей мере грибы, играют важную роль в пище мобильных и сессильных животных, которые живут на дне моря и в седиментах. Возрастание эвтрофикации сильно влияет на повышение роли гетеротрофных бактерий в пищевой цепи [245].

Растения и животные Балтийского моря заражаются разными болезнями, которые вызывают бактерии, грибы или вирусы. В Балтийском море широко распространены факультативные и облигатные паразиты, относящиеся к низшим грибам [245, 467]. Миксомицета *Labyrinthula* вызывает заболевание водорослей *Zostera marina*. *Labyrinthula coenocystis* паразитирует на высших водорослях [245].

Заболевания рыб вызывают гриб *Ichthyosporidium hoferi* и бактерии *Vibrio anguillarum* [245]. Последние могут вызвать массовую гибель угрей.

2.5. Патогенные микроорганизмы

Фекально-бытовые сточные воды являются основным источником патогенных микроорганизмов. Различные серотипы *Escherichia coli* часто являются причиной гастроэнтеритов. Обнаружение *E. coli* в морской воде или в воде эстуариев указывает на недавнее фекальное загрязнение. Размножение *E. coli* в воде происходит редко, но какой-то определенный период они могут выжить. *E. coli* была найдена в воде и донных отложениях Кильской бухты [401, 452]. Однако в открытых водах Балтики кишечная палочка практически не обнаружена [478]. В прибрежных водах Рижского залива в районе от Колки до Пярну коли-индекс был равен: в апреле 23 тыс.; в мае — 0,9—2,3 тыс., в августе — 2,3—23,8 тыс., в сентябре—октябре — 0,28 тыс. [5].

ствии *н*-алканов повышается на 20—40 %. Активно ассимилируется гексадекан — 40—70 % внесенного количества. Слабо усваиваются бактериями ароматические углеводороды (*о*-ксилол, толуол, нафталин, метилнафталин, фенантрен) — в среднем 2—3 % внесенного количества [155]. Высокие концентрации ароматических углеводородов в среде снижают активность микробиологических процессов — удлиняется время генерации и уменьшается продукция бактерий (рис. 2.7).

Бенз(а)пирен в Балтийском море широко распространен во всех элементах экосистемы. Практически по всей акватории Балтийского моря обнаружены БП-толерантные и БП-окисляющие микроорганизмы [217].

Культуры, изолированные из воды и грунтов Балтийского моря, разрушают от 8 до 74 % БП. Активность культур по окислению БП возрастает в условиях соокисления с глюкозой.

Интенсивный процесс биотрансформации нефти, БП и ПХБ в Балтийском море вызван распространением гетеротрофной микрофлоры, адаптировавшейся к присутствию в морской среде этих соединений.

3. ФИТОПЛАНКТОН И ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКЦИЯ

Впервые фитопланктон Балтийского моря в отечественных исследованиях изучался во время Русской Балтийской экспедиции в 1908—1909 гг. [94]. Исследования носили в основном систематическо-флористический характер. Позднее работы получили экологический уклон и охватывали лишь Финский залив [76]. Отечественные исследования фитопланктона открытой части Балтийского моря и его заливов развернулись со второй половины 40-х годов и носили в основном экологический характер [125, 126, 128].

С 1960-х годов и до наших дней отечественными и зарубежными учеными продолжаются исследования по инвентаризации региональных флор отдельных групп планктеров и фитопланктона в целом, по оценке планктической продуктивности, ее динамике и выявлению факторов, обусловливающих сезонные явления в планктоне [74, 95, 235, 236, 260, 282, 283, 349, 350, 352, 417, 419, 420, 455].

Закономерности пространственно-временно́й динамики фитопланктона Балтийского моря, вопросы его изученности представлены в ряде обзорных работ [75, 170, 311, 351, 391].

Много работ посвящено вопросам экологии основных видов фитопланктона [235, 236, 274, 284, 351, 417], особенно явлению цветения сине-зеленых водорослей и изучению азотфиксации [70, 324, 366, 388, 418, 422].

В последние годы больше внимания уделено исследованию первичной продукции планктона [99, 230, 236, 338, 471], взаимоотношений фито- и зоопланктона [89, 300], а также влиянию эвтрофикации на фитоценоз и первичную продукцию Балтийского моря [338, 389, 413].

3.1. Видовой состав и его экологическая характеристика

Важнейшей особенностью Балтийского моря является его сравнительно низкая соленость, которая ограничивает развитие как морских, так и пресноводных видов. Поэтому качественный и количественный состав фитопланктона в нем обеднен. В видовой состав фитопланктона Балтийского моря входят морские эвригалинные, пресноводные эвригалинные и настоящие солоноватоводные формы. Более подробно и точно отношение организмов фитопланктона к солености можно выразить по системе галобов (рис. 3.1) [482]. Принадлежность некоторых видов к той или иной группе галобов показана в табл. 3.1.

Среди часто встречающихся и определяющих продуктивность видов в Балтийском море можно выделить около 100 таксонов фитопланктона, распространенных по всей акватории моря, при этом 60 % этой численности составляют мезо- и олигогалобные, а 40 % — полигалобные формы. Это преимущественно диатомовые водоросли и динофлагелляты — группы, формирующие основную часть видового состава фитопланктона Балтийского моря.

Балтийские полигалобы являются морскими по происхождению, однако, обладая большой эвригалинностью в сторону приспособления к пониженной солености, они обитают вместе с мезогалобами и в этих условиях развиваются иногда в массе (плейоэвриг. *Achnanthes taeniata, Sceletonema costatum,* мезоэвриг. *Goniaulax catenata*, мезо- до мейоэвриг. *Actinocyclus octonarius*, мейо- до мезоэвриг. *Coscinodiscus granii*).

Мезогалобы или солоноватоводные виды в Балтийском море сравнительно стеногалинны или слабо эвригалинны, но некоторые из них характеризуются сильной эвригалинностью (*Chaetoceros da-*

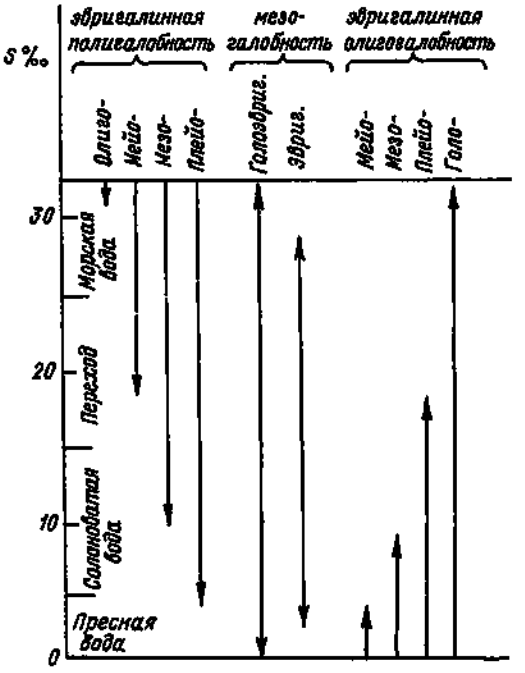


Рис. 3.1. Распределение солевой толерантности обитателей солоноватых и соленых вод по системе галобов, по [435].

Сравнительно часто в прибрежных водах Балтийского моря встречаются сальмонеллы — *Salmonella tuphi* и *S. paratuphi* [245]. Патогенные микроорганизмы выживают дольше в седиментах, чем в водном слое. В седиментах могут концентрироваться споры патогенных клостридий *Clostridium perfringens, Cl. novyi* и *Cl. septicum*, которые вызывают газовую гангрену (Бонд (1967), цит. по [245]). Присутствие клостридий в воде оценивается как старое фекальное загрязнение. Иногда инфекцию могут вызвать галофильные виды *Vibrio*, например *Vibrio alginolyticus*, который вызывает воспаление среднего уха (Гранвениц, Каррингтон (1973), цит. по [245]). В прибрежных водах западной части Балтийского моря найдены паразитные формы низших грибов [13]. В береговых песках в местах рекреации найдены бактерии, вирусы и грибы, которые вызывают заболевания кожи [245].

2.6. Метаболизм бактерий и их роль в процессе самоочищения

Микробные формы очень лабильны и их взаимоотношения со средой обитания необыкновенно тесные. Присутствие специфических поллютантов, например мочевины, углеводородов, фенолов, БП, ПХБ и других, способствуют росту тех микроорганизмов, которые могут использовать эти субстанции как единственный источник углерода [14, 155, 182, 452 и др.]. Количество и активность микробных популяций меняются в зависимости от количества и качества внесенного загрязнения. Температура и степень загрязненности воды влияют на скорость ассимиляции аминокислот (табл. 2.3). Ускоряется она на загрязненном участке моря с апреля по октябрь.

Сезонность наблюдается также в потреблении бактериями растворенного органического углерода (рис. 2.6). Во время весеннего цветения лишь малая доля первичной продукции найдена во фракциях бактерий и экскреций. Летом эти же фракции содержат большую часть ассимилированного углерода [363, 364].

Таблица 2.3

Время размножения сообществ микроорганизмов на смеси аминокислот в зависимости от температуры в загрязненном Кильском фьорде (глубина 2 м) и на относительно чистом центральном участке Кильской бухты (глубина 10 м) (Гоке (1977), цит. по [245])

Дата	Кильский фьорд		Кильская бухта	
	°С	ч	°С	ч
28 II 1974 г.	3,7	32,5	3,0	101,0
21 III	4,4	10,0	4,4	238,0
18 IV	8,6	3,1	6,8	33,5
16 V	10,9	2,5	8,7	56,9
11 VI	12,8	3,6	12,3	24,3
10 VII	16,7	5,1	16,5	12,0
29 III	17,7	2,9	17,5	18,6
12 IX	16,5	4,6	15,7	26,5
24 X	10,5	2,7	10,4	16,6
21 XI	7,5	28,3	7,5	47,0
10 XII	6,5	22,2	6,5	119,0
23 I 1975 г.	5,3	25,6	5,1	47,6
12 II	3,6	12,4	3,7	103,0
10 III	5,5	23,8	3,3	22,7

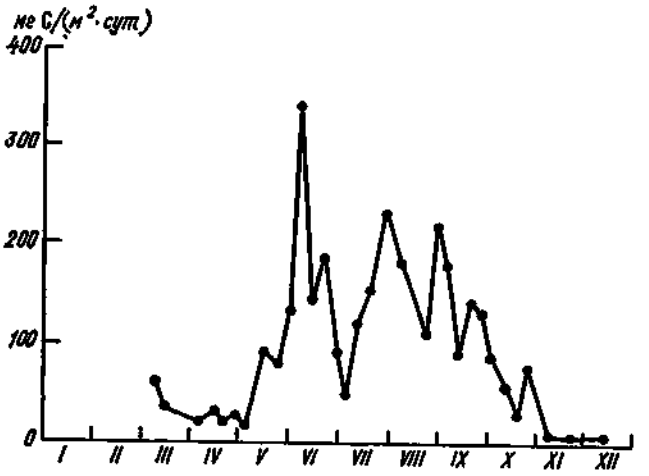


Рис. 2.6. Сезонные изменения потребления углерода бактериями в северной части Балтийского моря (район Аске), по [363].

Разрушение нефти и ее продуктов в основном осуществляется микроорганизмами по типу окислительной ассимиляции. На участках, загрязненных нефтью, особенно много бактерий, окисляющих углеводороды нефти [14, 58, 112, 155, 381 и др.]. На 1 м² поверхности Балтийского моря при оптимальном термическом и газовом режиме скорость микробного окисления нефти приблизительно равна 0,03—0,12 мг в сутки. За вегетационный период бактерионейстон Балтийского моря может окислить 1200—5000 т нефти [196]. Эффективное разрушение нефти наблюдается при ее низких концентрациях в среде [385]. В воде Гданьской бухты при температуре воды 20 °С в течение 4 недель разрушается 32—61 % нефти при начальной концентрации 0,5 г/л или 24—46 % нефти при начальной концентрации 2,5 г/л. Через 8 недель в идентичных условиях разрушается соответственно 44—73 и 41—70 % нефти. При низкой температуре воды активность микрофлоры значительно снижается [196, 401]. Наиболее легко и интенсивно в морской среде микроорганизмами окисляются нормальные парафины [155]. Бактериальная продукция при воздей-

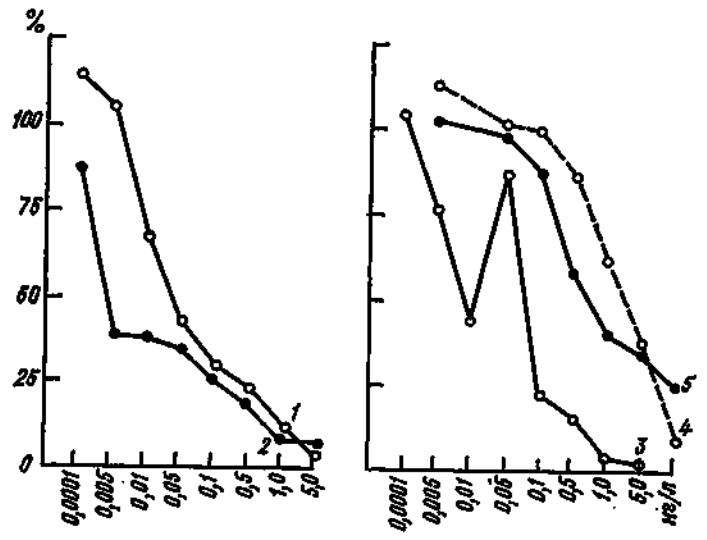


Рис. 2.7. Бактериальная продукция Рижского залива (% контрольной продукции) в присутствии фенантрена (*1*), нафталина (*2*), метилнафталина (*3*), *о*-ксилола (*4*) и толуола (*5*) (мг/л), по [155].

Таблица 3.1

Экологическая характеристика видов, определяющих продукцию фитопланктона (с изменениями по [351])

Вид	Объем клетки, м³	Источник	Отношение к солености	Отношение к температуре воды	Географическое распространение	Период вегетации
Aphanizomenon flos-aquae Breb. ex Born et Fhah.	8000—12 000 * 190 6000	[349]	Олигогалоб плейоэвригалинный, оптимум развития при 5 ‰ [498]	Оптимум развития при температуре верхнего слоя воды (0—10 м) более 15 °С, исключительно эвритермный вид [128]	Все Балтийское море	Круглогодично Лето (массовое развитие)
Nodularia spumigena Mert. in Jüng.	120 000—180 000 *	[349]	Олигогалоб, плейоэвригалинный	Оптимум развития при температуре более 17—18 °С	Все Балтийское море	Лето (вызывает цветение воды)
Sceletonema costatum (Grev.) Cl.	55 000 *	Данные Б. Я. Калвеки				
	1000—3000 77—850 1000 230	[349] [283] [390] Данные Б. Я. Калвеки	Полигалоб, плейоэвригалинный, оптимум развития при 26,5 °С [274]	Эвритермный вид, оптимум развития при 3,4 °С [274]	Все Балтийское море, космополит	Весна [125, 284]
Thalassiosira baltica (Grun. in Cl. et. Grun.) Ostenf.	10 000—18 000 30 000—100 000 37 000	[349] [390] Данные Б. Я. Калвеки	Мезогалоб, оптимум развития при 8 ‰ [274]	Эвритермный вид, оптимум развития при 2,8 °С [274]	Все Балтийское море, проливы Каттегат и Скагеррак, Северное море, Аравийское море	Весна, осень [128]
Coscinodiscus granii Gough	200 000 570 000 300 000	[349] [283] [390]	Полигалоб, мейо-до мезоэвригалинный	Эвритермный вид, оптимум развития при 3—10 °С	Все Балтийское море, Атлантический и Индийский океан	Круглогодично [351] (максимум развития осенью [284])
Cyclotella caspia Grun	500	[349]	β-мезогалоб, оптимум развития при солености ниже 10 ‰	Эвритермный вид	Все Балтийское, Каспийское и Аральское моря	Весна, конец лета и осень [419]
Detonula confervaceae (Cl.) Gran	300 300—950	[349] [283]	Полигалоб, мейо-до мезоэвригалинный, оптимум развития при 29,4 ‰ [274]	Холодноводная форма, оптимум развития при 0,1 °С [274]	Западная часть Балтийского моря, космополит	Весна
Rhizosolenia alata Brightw.	22 000 7200—39 000	[349] [283]	Полигалоб, мезо-до мезоэвригалинный, оптимум развития при 21,8 ‰ [274]	Оптимум развития при 15,4 °С [274]	Западная часть Балтийского моря до Дарсского порога, космополит	Лето (единично в весеннем и осеннем планктоне)
Chaetoceros wighamii Brightw.	165—6300 1000 950	[283] [390] Данные Б. Я. Калвеки	Мезогалоб (β-мезогалоб), сильно эвригалинный вид	Эвритермный вид	Все Балтийское море, особенно в центральной и восточной частях, космополит	Весна (наблюдается цветение [351, 284])
Chaetoceros danicus Cl.	1800 1000	[283] [390]	Мезогалоб, сильно эвригалинный, оптимум развития при 6—7 ‰	Эвритермный вид	Все Балтийское море, особенно в центральной и восточной частях, космополит	Круглогодично (максимум развития весной [284])
Chaetoceros eibenii (Grun.) Meun. ex V. H.	3000 *	[349]	Полигалоб, мезо-до плейоэвригалинный	—	Западная и центральная части Балтийского моря, космополит	Лето и осень [351]
Chaetoceros holsaticus Schütt	2000—3000 * 500 800 1600	[349] [283] [390] Данные Б. Я. Калвеки	Мезогалоб, оптимум развития при 14,2 ‰ [274]	Оптимум при 2,4 °С [274]	Все Балтийское море, особенно центральная часть, Северное море, Северная Атлантика, Индийский океан	Весна
Achnanthes taeniata Grun. in Cl. et Grun	200—350 400 500 750	[349] [283] [390] Данные Б. Я. Калвеки	Полигалоб, плейоэвригалинный	Арктическая холодноводная форма, стенотермная, оптимум развития при 2—5 °С [126]	Все Балтийское море, северные моря	Весна [284]

Продолжение таблицы 3.1

Вид	Объем клетки, мкм³	Источник	Отношение к солености	Отношение к температуре воды	Географическое распространение	Период вегетации
Ceratium fusus (Ehr.) Duj.	30 000—37 000 14 000—25 000	[349] [283]	Полигалоб, мезоэвригалинный, оптимум развития до солености 9,21 ‰ [349]	—	Западная и центральная часть Балтийского моря до Готландского моря, космополит	Осень [351]
Ceratium tripos (O. F. Müller) Nitzsch	100 000 92 000—145 000	[349] [283]	Полигалоб, мезоэвригалинный	—	Западная часть Балтийского моря до Дарсского порога, космополит	Осень [351]

* Объем колоний или трихом.

nicus, Ch. holsaticus, Melosira nummuloides, Thalassiosira baltica, Bacillaria paxillifer, Synedra tabulata, Dinobryon balticum).

Олигогалобы или пресноводно-солоноватоводные виды (пресноводные по происхождению) обладают способностью обитать в слабо соленой воде. Эвригалинность у них идет в сторону приспособления к повышенной солености (мейоэвриг. *Dictyosphaerium pulchellum*, мезоэвриг. *Oocystis pelagica, Pediastrum boryanum*, плейоэвриг. *Scenedesmus quadricauda, Aphanizomenon flos-aquae, Nodularia spumigena, Cyclotella meneghiniana, Diatoma elongatum*, плейо- до голоэвриг. *Navicula cryptocephala*, голо- до плеойэвриг. *Cocconeis placentula*).

Виды, относительно близкие по экологии и происхождению, образуют специфические комплексы, которые отличаются по характеру их годового развития. В фитопланктоне Балтийского моря выделяются три эколого-географических комплекса [125]:

— морской эвригалинный холодноводный арктического происхождения;

— морской эвригалинный и эвритермный бореального происхождения;

— солоноватоводный умеренно тепловодный пресноводного происхождения.

Арктический комплекс в основном выражен весной и достигает максимума развития в апреле — начале мая при оптимальной температуре воды 2—5 °С. Ведущими видами являются *Achananthes taeniata, Melosira arctica, Nitzschia frigida, Navicula vanhöffenii, N. granii, Goniaulax catenata* и др.

Морской бореальный комплекс наибольшее развитие получает весной и осенью при температуре воды от 3—4 до 8—10 °С. Комплекс характеризуют виды *Sceletonema costatum, Thalassiosira baltica, Chaetoceros holsaticus, Ch. wighamii, Ch. danicus, Coscinodiscus granii, Peridinium pellucidum, Peridinium achromaticum, Ebria tripartita.*

Пресноводно-солоноватоводный комплекс с преобладанием таких форм, как *Aphanizomenon flos-aquae, Nodularia spumigena, Gomphosphaeria lacustris, Diatoma elongatum, Oocystis submarina* и другие, достигают максимального развития в период биологического лета.

По сезонной динамике и роли в фитопланктоне Эдлер [284] делит доминирующие виды на весенние, летние, осенние и виды, встречающиеся круглогодично (*Chaetoceros danicus, Actinocyclus octonarius, Aphanizomenon flos-aquae, Ebria tripartita* и *Thalassiosira baltica*).

Экологическая характеристика наиболее важных видов фитопланктона показана в табл. 3.1.

3.2. Распределение

Закономерности регионально-зонального распределения фитопланктона Балтийского моря определяются неоднородностью среды в отношении солености и температурного режима, а большие региональные различия в общей биологической продуктивности моря — неравномерным распределением минеральных питательных солей.

При выходе из Бельтов и Эресунна в Балтийском море происходит сокращение числа морских форм, причем это не в полной мере восполняется увеличением количества пресноводных видов [75, 125, 351]. В западной части Бельтов встречаются почти исключительно морские формы, которые приносятся из Северного моря (Biddulphia pulchella, Chaetoceros atlanticus, Ch. laciniosus, Peridinium brevipes и др.). В море Бельтов отмечаются уже более эвригалинные виды — *Cerataulina pelagica, Ditylum brightwelli, Rhizosolenia alata, Dinophysis hastata* и др. Район Дарсского порога является восточной границей их распространения. К востоку от Дарсского порога в собственно Балтийском море встречаются виды, имеющие широкую экологическую валентность — *Aphanizomenon flos-aquae, Chaetoceros danicus, Ch. holsaticus, Ch. wighamii, Thalassiosira baltica, Peridinium pellucidum, Dinophysis baltica* и др. [282, 284, 351, 455].

В Финском, Ботническом и Рижском заливах, в бодденах и эстуарных районах фитопланктон представлен лимническими формами, которые выносят соленость до 5 ‰ (*Microcystis aeruginosa, Oscillatoria limnetica, Cyclotella kuetzingiana, C. stelligera, Melosira granulata, Stephanodiscus hantzschii, Ankistrodesmus falcatus, Dictyosphaerium pulchellum* и др.) [68, 352, 417, 420].

Значительное влияние на формирование видового состава фитопланктона (в сторону усиления его морского характера) оказывают периодические вторжения каттегатских вод [260, 350].

Кроме солености, региональное распределение видов фитопланктона определяется температурными условиями. Типы распределения экологических комплексов фитопланктона показаны на рис. 3.2.

Морской арктический комплекс распространяется по всему Балтийскому морю и достигает максимального развития в северо-восточной части и особенно в Рижском и Финском заливах [282, 420]. Морской бореальный комплекс наиболее многочислен в Юго-Западной Балтике, а также в заливах и эстуарных районах. Пресноводно-солоноватоводный комплекс распространен по всему морю, но макси-

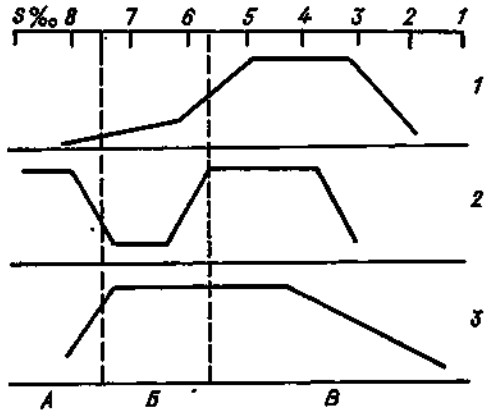


Рис. 3.2. Пространственное распределение комплексов фитопланктона в Балтийском море, по [125].

1 — арктический; *2* — бореальный; *3* — пресноводно-солоноватоводный; *А* — Западная Балтика; *Б* — Центральная Балтика; *В* — Рижский залив.

мум развития его наблюдается в открытой Балтике и в центральной части больших заливов.

Важную роль в распределении фитопланктона (особенно диатомовых и сине-зеленых) по районам моря играют биогенные вещества и соотношение их отдельных компонентов, а по вертикали — свет. Верхние слои воды (особенно 0—15 м) всегда богаче фитопланктоном качественно и количественно, и фотосинтезирующая деятельность водорослей, имеющая максимум в дневные часы, приурочена к этим слоям; при этом фитопланктон верхнего слоя значительно богаче в прибрежных районах, чем в открытых [74]. Вместе с тем встречаются и такие формы, которые обитают по всей толще воды (*Thalassiosira baltica, Coscinodiscus granii*).

Летнее цветение фитопланктона обычно охватывает верхний 10—15-метровый слой (редко до 20—25 м), весеннее цветение наблюдается до больших глубин [70, 260, 351]. Количество фитопланктона уменьшается с глубиной.

3.3. Сезонные сукцессии фитоцена и связи сезонных циклов фито- и зоопланктона

Развитие фитопланктона в Балтийском море носит ярко выраженный сезонный характер. Это проявляется не только в том, что биомасса фитопланктона имеет три отчетливых пика (основной — весенний, летний и менее интенсивный осенний), но и в сукцессиях видового состава водорослей. Ввиду значительной вытянутости Балтийского моря в широтном направлении имеет место горизонтальная и вертикальная последовательность фенологических явлений. Между Южной Балтикой и Ботническим заливом разница в фенологически однородных биологических процессах достигает около 2 мес [75, 128, 236, 300, 311, 351, 420, 455].

Соответственно внутригодовым изменениям климата в Балтийском море выделено четыре сезона (биологические зима, весна, лето, осень [128]) и семь стадий годовой сукцессии фитопланктона (зимняя, весенний пик, начало лета, летний минимум, летний максимум, осенний период и поздняя осень [320]).

Биологическая зима характеризуется низкими биомассами и незначительным видовым разнообразием фитопланктона, который в основном представлен разнородными по экологии видами, встречающимися круглогодично — *Chaetoceros danicus, Actinocyclus octonarius, Aphanizomenon flos-aquae, Ebria pripartita, Thalassiosira baltica* [282, 284, 311, 320 455], в северных районах и Финском заливе — также и *Goniaulax catenata* [420]. Вследствие слабого использования водорослями в это время происходит накопление биогенных солей.

Весной с увеличением солнечного освещения, появлением достаточной стабильности водных масс начинается весенний биологический сезон, характеризующийся интенсивным развитием диатомовых водорослей. Весенняя вспышка фитопланктона в Бельтах и Арконском районе наблюдается в марте, в Борнхольмском — в апреле, в Готландском районе, Рижском и Финском заливах — в конце апреля — начале мая.

В юго-западной части моря она начинается массовым развитием диатомовых *Achananthes laeniata, Chaetoceros danicus, Ch. holsaticus, Ch. wighamii, Sceletonema costatum, Thalassiosira baltica* [351], в центральном, северном и восточном районах моря к ним присоединяется динофлагеллята *Goniaulax catenata* [282, 311, 320, 420]. Наиболее интенсивное весеннее цветение наблюдается в заливах.

В начале биологического лета биомасса водорослей постепенно уменьшается по мере истощения биогенов. Популяция, состоящая в основном из диатомовых, распадается [351]. В северной части Балтийского моря доминируют динофлагелляты, многие из которых являются частично гетеротрофами [320]. Период летнего минимума отмечается при максимальной солнечной радиации и минимальном содержании биогенов. Наибольшим обилием в этот период характеризуются динофлагелляты *Dinophysis acuminata, D. norvegica, D. lachmannii, Peridinium brevipes, P. pellucidum, Prorocentrum balticum*, сине-зеленые *Aphanizomenon flos-aquae, Anabaena spp., Nodularia spumigena, Gomphosphaeria lacustris*, диатомовые *Diatoma elongatum, Chaetoceros danicus, Ch. wighamii* [75, 282, 311, 320, 351, 420]. По Халлфорсу и Ниеми [311], относительно высокой численности могут достигать зеленые водоросли (*P. Oocystis, Pediastrum, Scenedesmus*) и мелкие флагелляты. В море Бельтов летний минимум продолжается до июля включительно.

Стадия летнего максимума наступает при максимальной температуре и устойчивой стратификации воды. Для этой стадии характерно массовое развитие сине-зеленых водорослей, отдельные виды которых (*Aphanizomenon flos-aquae, Nodularia sp., Anabaena lemmermannii*) способны ассимилировать атмосферный азот [70, 282, 311, 320, 351, 420].

Летний фитопланктон Восточной Балтики характеризуется значительным видовым разнообразием и носит выраженный лимнический облик [391]. Максимум развития фитопланктона в Бельтах наблюдается в конце июля — начале августа [75, 351], в Центральной и Северной Балтике — в августе — начале сентября. Причиной возникновения цветения сине-зеленых считают низкое соотношение минеральных форм азота и фосфора [426].

Биологическая осень начинается при условии выравнивания температуры водных масс по вертикали. Вертикальное перемешивание воды способствует

выносу биогенных элементов из глубинного слоя в эвфотический, что и определяет второй максимум развития диатомовых водорослей [311]. В Бельтах осень начинается в конце сентября — начале октября цветением Ceratium и некоторых диатомовых (*Cerataulina pelagica, Ditylum brightwelli, Rhizosolenia setigera* и др.). Менее интенсивно с развитием *Actinocyclus octonarius, Coscinodiscus granii, Chaetoceros danicus, Aphanizomenon flos-aquae* происходит осеннее цветение фитопланктона в Арконском, Борнхольмском и Готландском морях [282, 351]. В Северной Балтике и больших заливах обильно развиваются виды р. *Chaetoceros, Gomphosphaeria lacustris*, а поздней осенью — диатомовые *Actinocyclus octonarius* и *Coscinodiscus granii* [320, 420]. Осень заканчивается уменьшением биомассы фитопланктона вследствие интенсивного конвективного перемешивания водных масс.

Развитие сукцессий фитопланктона влияет на зоопланктонное сообщество через регуляцию интенсивности размножения видов, которое в свою очередь связано с наличием мелких форм фитопланктона. Уменьшение количества мелкого диатомового планктона весной вызывает снижение интенсивности размножения копепод, что в пелагической экосистеме ведет далее к уменьшению обеспеченности пищей личинок пелагофильных рыб, снижению интенсивности нереста [89].

3.4. Многолетняя динамика, тенденция развития фитопланктона

В первой половине XX в. Балтийское море, вероятно, было олиготрофным водоемом [304].

К концу 60-х годов произошел переход к мезотрофному уровню. В это время на слабо и умеренно загрязненных органикой участках прибрежных вод отдельных районов (Эстония) начинает заметно увеличиваться видовое разнообразие фитопланктона, летняя биомасса водорослей и изменяется ранговое распределение видов. В более загрязненной (полисапробной) зоне фитопланктон беднеет качественно и количественно [39].

Биологические последствия эвтрофирования Балтики в 70-х годах в прибрежных водах выражаются как тенденция к увеличению биомассы фитопланктона [503], изменению продуктивности [389] и соотношения между отдельными видами и группами водорослей в сообществе планктона [389, 503]. Виды, менее устойчивые к эвтрофикации, заменяются видами более устойчивыми. Усиливается цветение фитопланктона. Примером влияния эвтрофикации на продуктивность фитопланктона может служить северная часть Финского залива, где в сильно эвтрофированной прибрежной зоне первичная продукция достигает 120 г С/(м²·год), в эвтрофированной внутренней части — 80 г С/(м²××год), а в умеренно эвтрофированной внешней части залива — 40 г С/(м²·год) [389]. За последние 10 лет произошло повышение годового уровня производимой продукции вследствие возросшей эвтрофикации также в прол. Эресун [283, 302] и в открытой части Балтийского моря [421].

В 1968—1981 гг. авторами отмечено увеличение средней концентрации хлорофилла «а» в поверхностных водах в летний сезон от 28,9 мг/м² (1968—1976 гг.) до 51,2 мг/м² (1977—1981 гг.) и возрастание показателей первичной продукции [413]. Отмечается усиление цветения сине-зеленых водорослей [324]. Бесспорно значение азотфиксации для первичной продукции фитопланктона и для баланса соотношения N : P в воде [366, 428]. Однако огромное количество сине-зеленых приводит к появлению большой массы детрита и растворенных органических веществ, вызывающих повышение потребления кислорода для их минерализации.

В связи с усилением процесса океанизации начиная с 30-х годов в Балтийском море отмечается продвижение морских видов в центральную часть моря и появление переселенцев из Северного моря.

Таковы последствия изменений водного режима Балтийского моря (под воздействием естественных причин и эвтрофикации), отмеченные в фитопланктонном сообществе к началу 80-х годов.

3.5. Первичная продукция по районам и сезонам

Доля годовой продукции фитопланктона в Балтийском море составляет 0,21 % общего количества продукции, производимой в Мировом океане [338]. Предварительная оценка годовой продукции фитопланктона в отдельных районах Балтийского моря показана в табл. 3.2.

Сезонный цикл первичного продуцирования определяется наличием световых, биогенных условий, стабильности вод и проявляется во всех районах Балтийского моря. Только в зоне проливов вследствие их небольшой глубины и значительной динамики водных масс он имеет иной характер [338].

Весной в собственно Балтийском море органическое вещество продуцируется интенсивно, но этот период сравнительно короткий и ограничивается быстрым расходом питательных солей на фотосинтез. Летом продуцируется 40—46 % годового количества углерода. Осенью интенсивность фотосинтеза по сравнению с летом уменьшается [338, 470, 471]. Наиболее интенсивно утилизируется первичная продукция зоопланктоном в летний сезон, тогда как весной — лишь частично [300].

Таблица 3.2

Средний уровень первичной продукции и ее общее количество (цит. по [338])

Область моря (площадь, км²)	Масса первичной продукции г С/(м²·год)	Общее количество продукции, 10^6 т С/год
Каттегат (22 000)	90,4	1,99
Море Бельтов (19 109)	120,0	2,29
Эресунн (1243)	107,0	0,13
Арконское море (16 673)	100,0	1,86
Борнхольмское море (38 990)	90,0	3,51
Гданьский бассейн (25 600)	125,0	3,20
Готландское море (125 950)	95,0	11,97
Финский залив (29 571)	70,0	2,07
Приполярная часть Ботнического залива (36 804)	18,0	0,66
Ботническое море (64 537)	70,0	4,52
Аландское море (5496)	93,0	0,51
Архипелаг (9042)	57,0	0,52
Рижский залив (18 096)	80—100 (оценка)	1,62
Всего	416 141	34,85

В северных районах Балтийского моря наблюдается только один основной (летний) максимум первичного продуцирования [235, 441]. Общее количество ассимилированного углерода в открытых районах Балтийского моря составляет $34{,}85 \cdot 10^6$ т, а с учетом продукции в прибрежной зоне ($15{,}73 \times \times 10^6$ т С/год) — приблизительно 50 (50,38) млн т.

По количеству первичной продукции приполярную часть Ботнического залива следует рассматривать как олиготрофный район [10—30 г С/(м²·год)], Ботническое море и Финский залив — как мезотрофный [30—70 г С/(м²·год)], а остальные части Балтийского моря — как эвтрофные районы [70—200 г С/(м²·год)] [33].

4. ЗООПЛАНКТОН

Первые сообщения по фаунистике и зоогеографии Балтийского моря принадлежат М. Зенгеру [67]. Значительный вклад в изучение зоопланктона Балтики в конце XIX — начале XX в. внесли Апштейн [239], Гензен, Краефт [350], Нордквист [423] и др. Работы этих ученых пополнили и уточнили сведения о видовом составе, распределении зоопланктона, биологии и экологии отдельных видов и в целом носили инвентаризационный, фаунистический характер. Значительную роль в развитии планктонологических исследований сыграла Русская Балтийская экспедиция 1908—1909 гг. под руководством О. Гримма, где работы по зоопланктону были выполнены А. И. Крабби [94].

В 20—30-х годах нашего столетия в планктонологии продолжает интенсивно развиваться экологическое направление, здесь следует упомянуть работы В. М. Рылова [169], М. Ф. Соколовой [180], Великангаза [498], Рийкои [454], Таубе [493]. В 40-х годах известны исследования В. Маньковского [60, 61], А. Ремане [71] и др.

В 50—60-е годы планктонологические исследования получили дальнейшее развитие. Важную роль при этом сыграла экспедиция по комплексному изучению биологии и промысла Балтийского моря, организованная ВНИРО. Для этого периода характерны работы экологического плана и среди них ряд исследований обобщающего характера [131, 271, 384, 461 и др.]. Особое место среди них занимают работы И. И. Николаева [131, 130, 134 и др.], который приблизил зоопланктонные исследования на Балтике к рыбохозяйственным целям. Со второй половины 60-х и в 70-е годы широко известны исследования экологического и продукционного характера Акефорса [227, 229, 231 и др.].

1970—80-е годы характеризуют новый этап в изучении зоопланктона, выразившийся в значительном расширении направлений работ, переходу к экосистемным исследованиям. Кроме многочисленных работ экологического характера [98, 100, 124, 177—179, 271, 272, 385, 386, 483 и др.], появляются исследования по моделированию экосистемы Балтийского моря и ее подсистем [290, 329 и др.], интенсивно развиваются работы продукционного характера [231, 273, 367 и др.], по многолетней динамике численности и прогнозированию запасов зоопланктона [80, 82, 87, 88 и др.]. Изучается влияние антропогенного загрязнения на зоопланктонное сообщество, а также токсикологическое и трофическое направления [40, 81, 82, 87, 88, 385, 386 и др.].

4.1. Видовой состав и его экологическая характеристика

Современный планктон Балтийского моря сформировался под влиянием значительных изменений климата в прошедшие геологические эпохи: чередования периодов потепления и похолодания, опреснения и осолонения. В связи с этим зоопланктонное сообщество в Балтийском море по происхождению неоднородно и включает реликты Иольдиева моря, морскую фауну, представляющую собой сильно обедненную атлантическую фауну шельфовых районов, пресноводную фауну (наиболее эвригалинные ее виды) и типичную солоноватоводную фауну (табл. 4.1).

По сравнению с другими морскими водоемами видовой состав зоопланктона из-за пониженной солености обеднен, лишь в эстуарных районах он обогащается за счет эвригалинных пресноводных форм (табл. 4.2).

По мере продвижения с юго-запада на северо-восток количество морских видов уменьшается, а солоноватоводных — возрастает. Нижней границей распространения морских видов является соленость 6—7 ‰, а верхней границей пресноводных форм — 3—4 ‰.

Значительное влияние на видовой состав зоопланктона открытой части Балтийского моря оказывают притоки каттегатских вод, приносящие планктон из Северного моря. Эти организмы являются временными обитателями на Балтике и распространение большинства из них ограничено зоной проливов. Дальше Арконского и Борнхольмского бассейнов они обычно не заходят. Особый интерес представляют *Sagitta elegans baltica, Oithona similis*, с помощью которых можно проследить пути продвижения каттегатских вод в восточной (и северо-восточной) части моря (табл. 4.3).

Не менее важным фактором формирования видового состава является приток пресных вод. В годы повышенного пресноводного стока в Балтийском море расширяются границы обитания солоноватоводных и генетически пресноводных видов. Особенно велико влияние пресноводного стока в эстуарных районах, где состав зоопланктона сильно зависит от объема речного стока, сгонно-нагонных явлений и носит либо солоноватоводный, морской, либо пресноводный характер.

Основной фон планктона в открытых районах моря составляют преимущественно морские и в меньшей степени солоноватоводные виды — *Pseudocalanus elongatus, Temora longicornis, Acartia spp., Centropages hamatus, Bosmina coregoni maritima, Podon spp., Evadne nordmanni, Synchaeta spp., Fritillaria borealis, Aurelia aurita.* Сходный состав зоопланктона в Гданьском заливе. В более опресненных Рижском и Финском заливах доминируют солоноватоводные виды — *Eurytemora hirundoides, Acartia bifilosa, Limnocalanus grimaldii, Bosmina coregoni maritima, Podon polyphemoides, Synchaeta spp., Keratella spp.* В сильно опресненных Куршском и Вислинском заливах зоопланктон состоит

Таблица 4.1

Основные зоогеографические комплексы и их представители в зоопланктоне в Балтийском море

Ледниковые реликты		Виды		
пресноводного происхождения	морского происхождения	морские эвригалинные	пресноводные эвригалинные	солоноватоводные
Limnocalanus grimaldii, Mysis oculata relicta	*Mysis mixta*	*Aurelia aurita, Acartia longiremis, A. tonsa, Pseudocalanus elongatus, Temora longicornis, Oithona similis, Centropages hamatus, Evadne nordmanni, Fritillaria borealis, Pleurobrachia pileus, Sagitta spp.*	*Keratella, spp., Daphnia spp., Leptodora kindtii, Chydorus spp., Diaptomus spp., Mesocyclops leucarti, Brachionus spp., Filina spp.*	*Acartia bifilosa, Eurytemora hirundoides, Synchaeta spp., Bosmina coregoni maritima*

Таблица 4.2

Количество видов зоопланктона в разных районах Балтийского моря

Часть Балтийского моря	Район		Источник
	прибрежный	открытый	
Южная Балтика	34	43	[141]
Восточная и Северо-Восточная Балтика	31	30 28 42	Данные авторов
Северная Балтика	14		[124, 315]
Гданьский залив	32		[483, 492]
Рижский залив	132	50	[98]
Финский залив	242	56	[27]

Примечание. Во всех районах, кроме Финского залива, не учтены простейшие, а в Южной Балтике, кроме того, организмы, заносимые притоком каттегатских вод из Северного моря.

Таблица 4.3

Список видов-индикаторов притока каттегатских вод в Южной, Восточной и Северо-Восточной Балтике

Регион	Таксон	Источник
Южная Балтика	*Melicertum octocostatum, Halitholus cirratus, Sarsia tubulosa, Hybocodon prolifer, Rathkea octopunctata, Phialidium hemisphaericum, Steenstrupia nutans, Ectopleura dumortieri, Rosacea plicata, Tomopteris helgolandica, Tomopteris kefersteini, Eupagurus hernhardus, Meganyctiphanes norvegica, Calanus finmarchicus, Centropages typicus, Eucalanus elongatus, Metridia lucens, Macropsis slaberi, Oikopleura dioica, Sagitta setosa, Sagitta elegans elegans, Gastrosaceus spinifer, Oithona similis, Elektra pilosa, Calanus helgolandicus*	[141]
Восточная Балтика	*Oithona similis, Sagitta elegans baltica*	[84]
Северо-Восточная Балтика	*Oithona similis*	[84]

преимущественно из пресноводных видов, лишь в устьевой части, подверженной влиянию вод открытого моря, встречаются также морские формы. Наиболее многочисленными здесь являются *Euchlanis, Keratella, Brachionus, Filina, Bosmina, Chydorus, Daphnia, Leptodora, Mesocyclops, Diaptomus.* В прибрежных районах моря вдали от источников пресных вод в зоопланктоне преобладают морские и солоноватоводные виды.

Таблица 4.4

Оптимальные значения температуры и солености для основных видов зоопланктона в Юго-Восточной, Восточной и Северо-Восточной Балтике [178]

Таксон	Температура, °С	Соленость, ‰
Pseudocalanus elongatus	3,5—6,0	7,5—18,0
Temora longicornis	6,0—14,0	7,0—8,0
Acartia spp.	6,0—16,0	7,0—8,0
Centropages hamatus	8,0—16,0	7,0—8,0
Oithona similis	4,0—5,0	10,0—16,0
Bosmina coregoni maritima	16,0—18,0	7,0—7,5
Podon spp.	6,0—16,0	7,0—8,0
Evadne nordmanni	6,0—12,0	7,0—8,0
Synchaeta spp.	4,0—10,0	7,0—8,0
Fritillaria borealis	5,0—7,0	7,0—8,0
Pleurobrachia pileus	3,0—5,0	7,5—9,0
Sagitta spp.	4,0—5,0	14,0—18,0
Aurelia aurita	6,0—16,0	6,0—7,5
Cyanea capillata	3,0—8,0	7,5—10,0
Halitholus cirratum	3,0—6,0	10,0—12,0

Важным фактором сезонных изменений видового состава зоопланктона является температура, стимулирующая развитие тепло-, умеренно- или холодноводных видов. Оптимальные значения температуры и солености для основных видов показаны в табл. 4.4.

По отношению к температуре и солености среди планктеров выделены эври-, олиго-, мезо- и политермные виды, а по отношению к солености — гипо-, эвригалинные и высоко эвригалинные формы (табл. 4.5).

В основу деления балтийского зоопланктона на экологические комплексы отечественными исследователями положен принцип В. Г. Богорова о том, что планктон в море связан с определенными водными массами [84, 134, 141]. Выделяются три основных экологических комплекса зоопланктона: тепловодный планктон верхней зоны, включая термоклин; холодноводный планктон промежуточной зоны, связанный с холодноводным промежуточным слоем, включая галоклин; солоноводный планктон глубоководной зоны впадин [132]. Первые два комплекса связаны с собственно балтийскими водами, последний — находится под влиянием притока соленых каттегатских вод. Планктон верхней зоны в це-

Таблица 4.5

Классификация основных видов зоопланктона по температуре воды и солености [227]

По температуре	По солености		
	Гипогалинные (2—8‰)	Эвригалинные (6—35‰)	Высоко эвригалинные (2—35‰)
Эвритермные	*Eurytemora spp.*	*Aurelia aurita, Podon leuckarti*(?)	*Evadne nordmanni*
Олиготермные (до 10 °С)	*Limnocalanus grimaldii, Mysis relikta*	*Pleurobrachia pileus, Acartia longiremis, Centropages hamatus*(?), *Temora longicornis*(?), *Pseudocalanus elongatus, Mysis mixta, Fritillaria borealis*	—
Мезотермные (10—15 °С)	—	*Podon leuckarti*(?), *Temora longicornis*(?)	*Podon polyphemoides, P. intermedius*(?)
Политермные (более 15 °С)	*Bosmina coregoni maritima, Keratella spp.*	—	*Podon intermedius*(?)

Примечание. *Oithona similis* встречается при солености более 9 ‰, *Halitholus cirratus* — более 10 ‰, *Acartia bifilosa* — при 5—8‰.

лом характеризуется большей теплолюбивостью и солоноватостью, чем относительно холодноводный и более «морской» планктон промежуточной зоны. Планктон глубоководной зоны соленолюбивый, отличается большой выносливостью по отношению к дефициту кислорода, малым видовым разнообразием.

Основные экологические комплексы подразделяются на более мелкие группировки, поскольку виды, слагающие комплекс и имеющие общие характерные для комплекса черты, все же различаются по отношению к факторам среды. Экологическая структура зоопланктона показана в табл. 4.6, а роль отдельных группировок в планктоне и их сезонная динамика — в табл. 4.7.

4.2. Сезонная динамика и распределение

Принадлежность Балтийского моря к умеренному климатическому поясу с четко выраженными внутригодовыми изменениями климата обусловливает сезонные явления в планктоне.

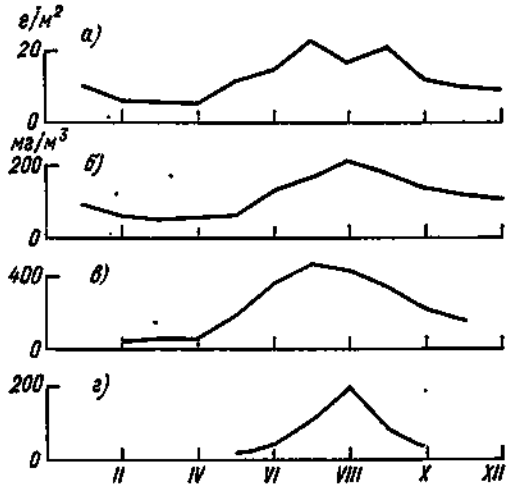


Рис. 4.1. Сезонная динамика биомассы зоопланктона в различных районах Балтийского моря.

а — Южная Балтика, 1949—1969 гг., по [365]; *б* — Центральная Балтика, 1950—1960 гг., по [130]; *в* — Рижский залив, 1960—1983 гг., *г* — северная часть Ботанического залива, 1975 г., по [494].

Зимний биологический сезон обычно длится с декабря по март, в северных районах он длиннее. Для этого сезона характерно значительное обеднение качественного и количественного состава зоопланктона. Его основу (по численности) составляют эвритермные и с пониженным оптимумом температуры копеподы. Биомасса зоопланктона зимой достигает годового минимума, причем ее снижение по сравнению с осенью в заливах происходит сильнее, чем в море (табл. 4.8).

Для распределения зоопланктона в зимний сезон характерно поднятие холодноводных видов в поверхностные слои, увеличение количества зоопланктона в центральных районах по сравнению с прибрежными, сравнительно равномерное распределение по акватории (в открытой части моря). Типы вертикального распределения в зависимости от суровости зим показаны в табл. 4.9.

Весенний биологический сезон длится в среднем с начала апреля до первой половины июня, причем в южных районах отмечается сдвиг на более ранние, в северных — на более поздние сроки. Через 2—3 недели вслед за развитием фитопланктона активизируется размножение копепод, фритилларии, позднее — коловраток и кладоцер (эвритермных).

В зависимости от температуры воды в первой или второй половине мая наблюдается годовой максимум численности науплиев копепод, а в конце мая — начале июня — коловраток (синхет). Состав зоопланктона в весенний сезон показан в табл. 4.8.

Общие численность и биомасса зоопланктона весной по сравнению с зимой увеличиваются. Темпы роста биомассы зависят от сроков размножения, условий роста и развития зоопланктона, тесно связанных с температурой воды и обеспеченностью пищей. Поэтому заметное увеличение биомассы в южных районах моря начинается уже в апреле—мае, а в восточных и северо-восточных — в мае—июне (рис. 4.1). В первую половину весны более высокие биомассы отмечаются в открытой части моря, а во вторую половину — в прибрежной. На устьевых взморьях Восточной Балтики биомасса зоопланктона к концу весны может уже превышать 1 г/м³ (взморье р. Венты) [69]. Темпы роста биомассы от зимы к весне в Рижском заливе выше, чем в открытых районах Балтики.

Таблица 4.6

Экологические комплексы и группировки зоопланктона в Балтийском море [86, 134, 141]

Регионы	Зона	Комплекс	Группировка	Основные виды зоопланктона
Собственно Балтика (открытые районы)	Верхняя (от поверхности до нижней границы термоклина)	Тепловодный	Морские эвригалинные эвритермные виды	*Temora longicornis, Acartia longiremis, Centropages hamatus, Pseudocalanus elongatus juv., Evadne nordmanni, Podon leuckarti, Fritillaria borealis, Bivalvia larv., Aurelia aurita*
			Солоноватоводные эвритермные виды	*Eurytemora hirundoides, Acartia bifilosa*
			Солоноватоводные виды с повышенным оптимумом температуры	*Bosmina coregoni maritima, Podon intermedius, P. polyphemoides*
			Солоноватоводные умеренно тепловодные виды	*Synchaeta baltica, S. monopus*
			Пресноводные виды	*Keratella spp.*
	Промежуточная (от нижней границы термоклина до нижней границы галоклина)	Холодноводный	Морские эвригалинные эвритермные виды	*Temora longicornis, Acartia longiremis, Pleurobrachia pileus, Fritillaria borealis, Polychaeta larv.*
			Морские эвригалинные виды с пониженным оптимумом температуры	*Pseudocalanus elongatus* (старшие копеподиты и взрослые)
			Морские эвритермные виды с повышенным оптимумом солености	*Oithona similis, Sagitta spp.*
			Солоноватоводные умеренно тепловодные виды	*Synchaeta baltica, S. monopus*
			Солоноватоводные виды с повышенным оптимумом температуры	*Bosmina coregoni maritima*
	Промежуточная	Холодноводный	Ледниковые реликты	*Limnocalanus grimaldii, Mysis mixta*
	Глубоководная (от нижней границы галоклина до дна)	Солоноводный	Морские эвритермные виды с повышенным оптимумом солености	*Oithona similis, Sagitta spp., Oikopleura dioica, Cyanea capillata, Halitholus cirratus*
			Морские эвригалинные виды с пониженным оптимумом температуры	*Pseudocalanus elongatus* (V копеподитная стадия и взрослые)
			Морские эвригалинные эвритермные виды	*Temora longicornis, Acartia longiremis, Pleurobrachia pileus, Polychaeta larv.*
Крупные заливы (Рижский, Финский, Ботнический)	Верхняя (от поверхности до нижней границы термоклина)	Тепловодный	Солоноватоводные эвритермные виды	*Eurytemora hirundoides, Acartia bifilosa*
			Солоноватоводные умеренно тепловодные виды	*Synchaeta baltica, S. monopus*
			Солоноватоводные виды с повышенным оптимумом температуры	*Bosmina coregoni maritima, Podon intermedius, Balanus larv., Bivalvia larv.*
			Морские эвригалинные эвритермные виды	*Temora longicornis, Acartia longiremis, Evadne nordmanni*
			Пресноводные виды	*Keratella quadrata, K. cochlearis, Daphnia spp., Mesocyclops spp.* и др.
	Нижняя зона (от нижней границы термоклина до дна)	Холодноводный	Ледниковые реликты	*Limnocalanus grimaldii, Mysis oculata relicta*
			Солоноватоводные эвритермные виды	*Eurytemora hirundoides, Acartia bifilosa*
			Морские эвригалинные виды с пониженным оптимумом температуры	*Pseudocalanus elongatus*
Мелководные заливы (Куршский, Вислинский)	Смешанная (от поверхности до дна)	Тепловодный	Пресноводные виды	*p. p. Euchlanis, Keratella, Brachionus, Filina, Bosmina, Chydorus, Daphnia, Leptodora, Mesocyclops, Diaptomus*
			Морские эвригалинные виды	*Evadne nordmanni*
			Солоноватоводные эвригалинные эвритермные виды	*Eurytemora hirundoides, Acartia bifilosa*

Примечание. В Восточной и Северо-Восточной Балтике в группировку эвритермных видов с повышенным оптимумом солености входят *Oithona similis, Sagitta elegans baltica.*

Важными факторами пространственного распределения зоопланктона весной являются температура воды и физиологическое состояние организмов. Поэтому наибольшее его количество в это время наблюдается в южной части моря, где теплее и размножение начинается раньше. В вертикальном распределении зоопланктона отмечаются один или два максимума биомассы. После теплых и среднесуровых зим и умеренно теплых весен при интенсивном размножении большей части популяций формируется один максимум биомассы в верхнем 25-метровом слое. После холодных зим чаще образуются два

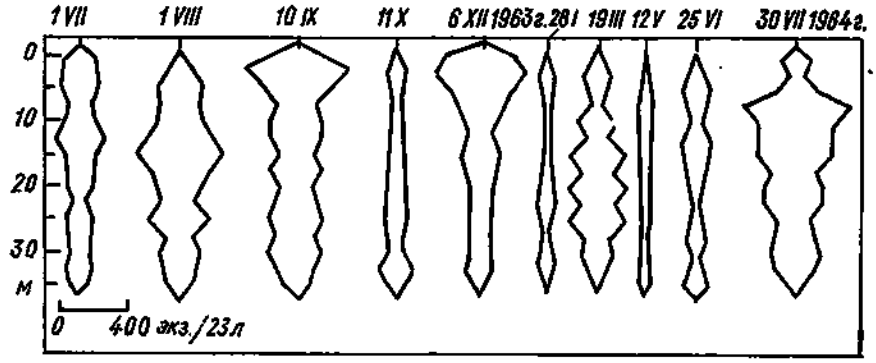


Рис. 4.2. Микрораспределение общей численности зоопланктона в районе Аске, по [228].

максимума в слое 0—25 м, где идет интенсивное размножение планктона, и глубже 50 м, где скапливаются еще не созревшие особи (табл. 4.9).

Однако при более детальном изучении микрораспределения выявляется более сложная картина распределения, зависящая от микроструктуры и динамики вод в конкретном районе (рис. 4.2).

В разгар летнего сезона планктон приобретает лимнические черты, усиливается роль солоноватоводных и пресноводных видов. В открытой части моря доминируют псевдокаланус, темора, акарции, босмина, подоны; в Рижском и Финском заливах — босмина, эвритемора, акарции, кителлы, синхеты (см. табл. 4.8). В сильно опресненных малых заливах (Вислинский, Куршский и другие) и прибрежной зоне в районах устьев рек преобладают пресноводные формы.

Общая биомасса зоопланктона летом достигает годового максимума (см. табл. 4.8). Пик развития зоопланктона в Южной Балтике может наблюдаться в мае—сентябре [385], в Восточной и Северо-Восточной — чаще в августе.

Уровень развития зоопланктона летом определяется обеспеченностью пищей и термическим режимом [80]. Поэтому более высокие биомассы зоопланктона наблюдаются в прибрежной зоне, мелководных заливах, а в открытых районах моря — на участках выноса в верхний слой богатых питательными веществами глубинных вод.

Летнее распределение зоопланктона по акватории моря обусловлено особенностями распределения фитопланктона, связанного с размещением питательных веществ в трофогенном слое, их выносом из глубоководных впадин под влиянием адвекции каттегатских вод, процессов диффузии и сгонно-нагонных явлений, формирующих прибрежные апвеллинги. Имеет значение и вторичное перераспределение биогенных веществ под действием ветров. Примером может служить распределение зоопланктона, показанное на рис. 4.3.

Таблица 4.7

Сезонная динамика экологических группировок зоопланктона (% общей численности в данном слое) в Юго-Восточной, Восточной и Северо-Восточной Балтике [86]

Месяц	Слой		Экологическая группировка						
	взятия проб, м	гидрологический	1	2	3	4	5	6	7
Февраль	0—25	Холодный слой зимней воды	53	47	—	—	+	—	—
	25—50	То же	52	48	+	—	+	—	—
	50—75	Переходный, включая галоклин	36	62	2	—	+	—	—
	75—100	Глубинный	22	53	25	—	+	—	—
Май	0—25	Поверхностный, включая термоклин	82	+	—	+	18	+	+
	25—50	Холодный промежуточный	89	5	—	1	5	—	—
	50—75	Холодный промежуточный, включая галоклин	60	31	6	+	3	—	—
	75—100	Глубинный	52	41	3	—	4	—	—
Август	0—25	Поверхностный, включая термоклин	19	4	—	74	3	+	—
	25—50	Холодный промежуточный	70	17	+	3	10	—	+
	50—75	Холодный промежуточный, включая галоклин	56	38	—	6	+	—	+
	75—100	Глубинный	14	79	1	6	+	—	—
Октябрь—ноябрь	0—25	Слой осенней конвекции	84	5	—	1	10	—	+
	25—50	То же	83	13	—	1	3	—	+
	50—75	Переходный, включая галоклин	61	38	—	+	1	—	—
	75—100	Глубинный	30	70	+	—	+	—	—

Примечание. Обозначения группировок: 1 — морские эвригалинные эвритермные виды, 2 — морские эвригалинные виды с пониженным оптимумом температуры, 3 — морские эвритермные виды с повышенным оптимумом температуры, 5 — солоноватоводные умеренно тепловодные виды; 6 — пресноводные виды; 7 — ледниковые реликты.

Знаком плюс («+») отмечена средняя численность вида менее 1 экз/м³.

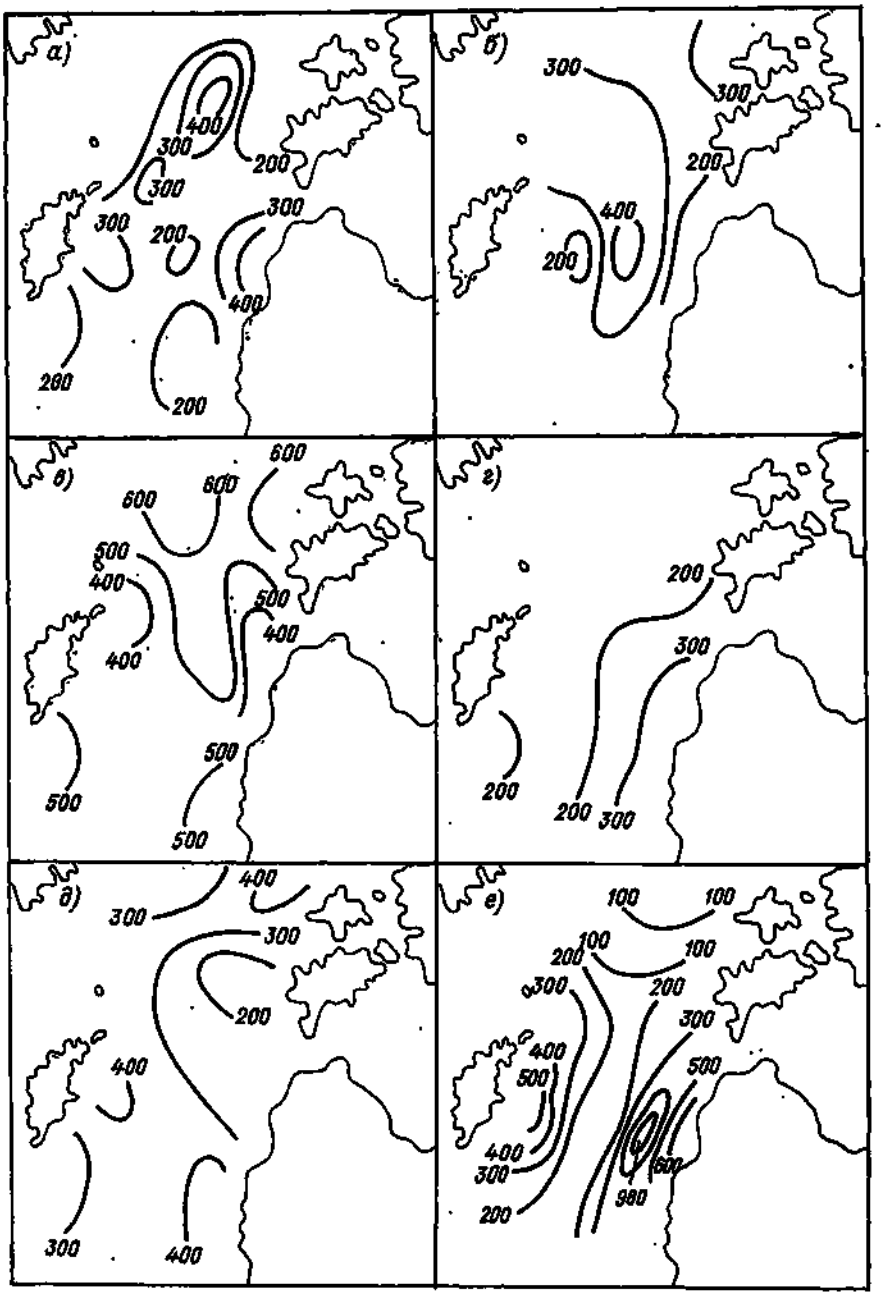


Рис. 4.3. Распределение биомассы рачкового планктона (мг/м³) в августе в слое 0—50 м при разной интенсивности и типе выноса биогенных веществ из впадин Готландской и Форе, по [218].

а — 1960 г., небольшой вынос биогенов в северном направлении; *б* — 1961 г., небольшой вынос биогенов в мае, интенсивный — в августе; *в* — 1962 г., вынос биогенов в северном и северо-восточном направлениях, перенаправленность выноса на юг; *г* — 1963 г., выносов нет; *д* — 1965 г., интенсивный вынос зимой истощил запасы биогенов в Готландской впадине, в связи с чем подтоки каттегатских вод, имевшие место в весенне-летний период, не вызывали значительного повышения концентрации биогенов в фотическом слое; *е* — 1966 г., вынос биогенов преимущественно по восточному склону Готландской впадины.

По продуктивности рачкового планктона (в период его максимального развития) в Южной, Восточной и Северо-Восточной Балтике выделены следующие районы:

— высоко продуктивные (биомасса в слое 0—100 м составляет 450—600 мг/м³) — Гданьский залив, Слупский желоб, юго-восточный склон Готландской котловины;

— «временно» продуктивные (биомасса повышается при выносе биогенов и составляет 300—400 мг/м³) — Борнхольмская котловина, южная часть Готландской котловины и ее северо-восточный и восточный склоны;

— пониженной продуктивности (биомасса составляет 250—300 мг/м³) — над впадинами Готландской, Форе, Северной.

Для вертикального распределения биомассы зоопланктона в летний сезон характерно образование одного или двух максимумов. Первый тип (один максимум) обычно наблюдается в теплые лета, второй (два максимума) — в умеренные и холодные. В холодные лета верхний максимум формируется в слое 0—25 м, в умеренные и теплые лета слой может быть толще или располагаться глубже 0(25)—50 м. Нижний максимум образуется в слое 50(75)—100(35) м. В мелководных районах распре-

Таблица 4.8

Сезонная динамика численности зоопланктона (экз/м³) в различных регионах Балтийского моря

Таксон	Собственно Балтика, слой 0—100 м				Гданьский залив, слой 0—100 м				Рижский залив, слой 0—40 м			
	II	V	VIII	X—XI	II	V—VI	VIII—IX	X—XI	II	V	VIII	X—XI
Acartia spp.	129	554	1345	1076	34	129	196	145	970	2766	5278	5193
Pseudocalanus elongatus	1452	2003	4400	2931	846	1288	2141	1590	5	+	+	+
Temora longicornis	176	153	2145	1830	132	442	898	655	6	+	1	+
Centropages hamatus	60	37	447	459	14	13	355	234	—	+	+	+
Eurytemora hirundoides	+	+	+	+	—	—		—	756	2348	11047	5687
Limnocalanus grimaldii	+	+	+	+	—	—		—	9	823	291	98
Olithona similis	34	138	118	46	19	29	49	52	—	—	—	—
Прочие *Copepoda*	2	24	189	125	—	—			3	33	97	151
Copepoda nauplii	175	3507	873	755	—	1030	16	9	948	3734	2591	2475
Bosmina coregoni maritima	—	2	5424	113	—	1	11148	3	—	29	12747	25
Evadne nordmanni	—	151	222	113	—	77	519	25	—	6	346	4
Podon spp.	—	27	117	20	—	5	35	12	—	1	910	18
Прочие *Cladocera*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
Synchaeta spp.	—	3432	646	1033	—	209	5	65	1	2389	5858	3858
Keratella spp.	—	—	—	—	—	—	—	—	+	37	16783	34
Прочие *Rotatoria*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+	+
Fritillaria borealis	96	1076	55	168	+	332	42	+	—	—	—	—
Pleurobrachia pileus	32	14	24	20	—	—	—	—	—	—	—	—
Polychaeta larv.	20	71	16	9	—	8	—	—	—	+	+	—
Mollusca larv.	—	121	190	46	34	27	52	15	—	59	476	14
Прочие	16	—	—	—	9	5	—	29	—	88	268	52
Общая численность, экз/м³	2192	11310	16211	8744	1088	3595	15456	2844	2700	12313	56693	17609
Общая биомасса, мг/м³	85,8	121,0	313,7	192,9	—	—	—	—	40,2	182,7	605,5	205,9

Примечания. 1. В собственно Балтике и Рижском заливе зоопланктон собран сетью Джеди 37/50, размер ячей в фильтрующем конусе 0,16 мм, в Гданьском заливе — сетью Нансена. Знаком плюс («+») обозначена численность зоопланктона менее 1 экз/м³.

2. Данные для собственно Балтики и Рижского залива приведены за 1960—1980 гг. (данные авторов), а для Гданьского залива — за 1971 г. [50].

деление зоопланктона зависит от температуры и солености [272]. Как и весной, микрораспределение зоопланктона значительно сложнее (см. рис. 4.2).

Осенью происходит уменьшение видового разнообразия и количества зоопланктона, доминирующей группой становятся копеподы (см. табл. 4.8). Интенсивное понижение численности и биомассы продолжается до ноября, в дальнейшем скорость этого процесса снижается (см. рис. 4.1).

Осеннее распределение зоопланктона по акватории моря равномернее, чем летом. Для вертикального размещения характерно образование двух небольших максимумов биомассы в слое 0—25 и 50(75)—100 м.

У многих балтийских видов зоопланктона хорошо выражены суточные вертикальные миграции, существенно влияющие на перемещение слоев скоплений зоопланктона в течение суток. Схематично перемещение слоев скоплений зоопланктона в течение суток показано на рис. 4.4.

Таблица 4.9

Типы вертикального распределения общей биомассы зоопланктона (мг/м³) в Балтийском море в феврале

Год	Зима	Слой, м				
		0—25	25—50	50—75	75—100	100—150
1970	Суровая	55	19	32	25	12
1972	Среднесуровая	87	35	71	22	2
1174	Мягкая	141	51	48	—	—

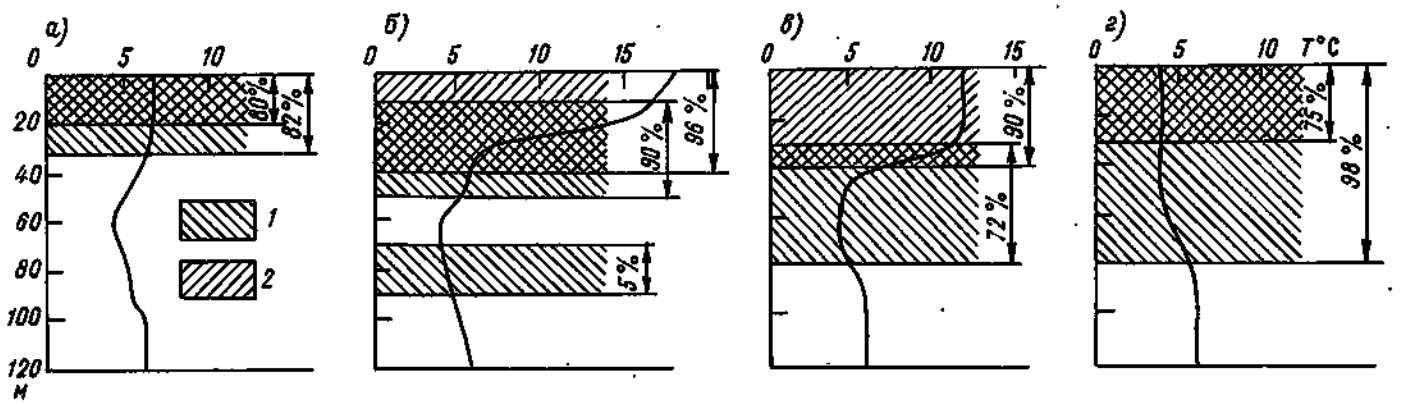


Рис. 4.4. Слои доминирования биомассы зоопланктона (% распределенной в слое 0—120 м) весной (*а*), летом (*б*), осенью (*в*) и зимой (*г*) 1975 г. в светлое (*1*) и темное (*2*) время суток, по [176].

4.3. Трофическая структура

Трофическая структура зоопланктона в Балтийском море сравнительно проста. Выделены следующие трофические уровни [81]:

I — первичные продуценты и сапрофаги;

II — фитофаги — псевдокалянус, темора, эвритемора, науплии и младшие копеподиты всех копепод, босмина, эвадне (?) и подоны (?), фритиллария, личинки моллюсков; пищей видов этого уровня являются фитопланктон, детрит, бактерии;

III — эврифаги — акарции, центропагес, копеподиты ойтоны, синхеты, подоны (?), эвадне (?), личинки балануса; пища — фитопланктон, детрит, животные;

IV — хищники (сосущие) — взрослая ойтона; пища преимущественно животная;

V — хищники — плеврobрахия, сагитты, медузы; пища животная.

Преобладающей трофической группировкой зоопланктона (без макропланктона) в открытой части Балтийского моря являются фитофаги, составляющие 73—92 % общей биомассы зоопланктона и имеющие наибольшее значение зимой и летом. Второе место занимают эврифаги, максимум развития которых приходится на конец весны. Хищники (без учета медуз) представляют собой малочисленную группу (табл. 4.10).

Вертикальная трофическая зональность зоопланктона изменяется по сезонам. Во все сезоны, кроме весны, и во всех слоях превалируют фитофаги, их значение с глубиной (в пределах 100-метрового слоя) увеличивается. Весной в верхнем слое резко возрастает роль эврифагов, глубже по-прежнему доминируют фитофаги (табл. 4.11). Еще больше упрощается трофическая структура зоопланктона в Рижском заливе, где хищников еще меньше, а на долю фитофагов приходится 39—73 % биомассы, эврифагов — 27—61 %.

Таким образом, для трофической структуры зоопланктона (без макропланктона) в Балтийском море характерны сравнительное однообразие, слабое развитие комплекса хищников, доминирование во всех слоях растительноядных видов и усиление их значения по мере увеличения глубины.

Таблица 4.10

Сезонная динамика биомассы трофических группировок зоопланктона в слое 0—100 м в Балтийском море в 1972—1977 гг. [141]

Месяц	Фитофаги		Эврифаги		Хищники		Всего, мг/м³
	мг/м³	%	мг/м³	%	мг/м³	%	
Февраль	74,99	92,8	4,90	6,1	0,90	1,1	80,79
Май	122,04	88,2	32,39	20,8	1,56	1,0	155,99
Август	327,32	88,6	41,49	11,2	0,85	0,2	369,66
Октябрь—ноябрь	167,10	83,3	33,03	16,5	0,46	0,2	200,59

Примечание. Не учтена биомасса личинок полихет, плеврobрахии, сагитт, медуз. Средняя годовая численность первых двух таксонов не превышает 30—50 экз/м³, сагитт — менее 5—10 экз/м³. Планктон собран сетью Джеди, размер ячей в фильтрующем конусе равен 0,16 мм.

4.4. Воспроизводство и продукция

Сроки массового размножения, скорость развития, плодовитость основных видов зоопланктона приведены в табл. 4.12 и 4.13. Подавляющее большинство видов зоопланктона в Балтийском море полицикличны. Поскольку плодовитость тесно связана с размером животных, обеспеченностью пищей и другими факторами, то величина кладок у более мелких балтийских планктеров меньше, чем в других морских водоемах, где эти виды крупнее. Число генераций, например у копепод, меньше, чем в более теплых, и больше, чем в более холодных морских водоемах.

Наибольшей скоростью роста и развития (при оптимальной температуре) обладают коловратки

Таблица 4.11

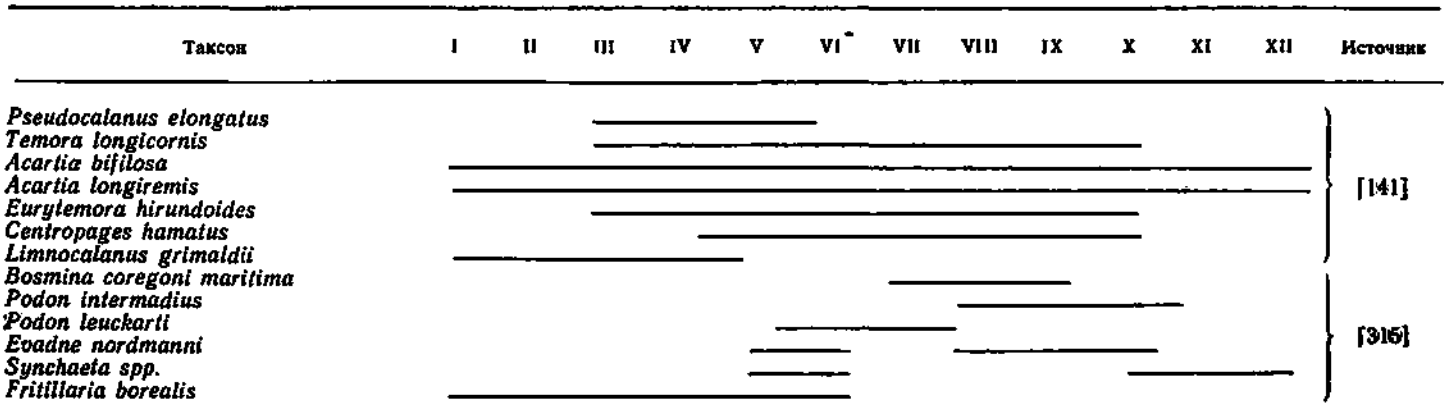
Вертикальная трофическая зональность биомассы зоопланктона в Балтийском море [218]

Месяц и год	Трофическая группировка	Слой, м							
		0—25		25—50		50—100		100—150	
		мг/м³	%	мг/м³	%	мг/м³	%	мг/м³	%
X 1973	Фитофаги	156,01	67,4	129,51	75,3	151,38	95,2	51,60	89,0
	Эврифаги	75,46	32,6	41,25	24,0	7,51	4,7	—	—
	Хищники	+	+	1,14	0,7	0,07	0,01	6,38	11,0
	Всего	231,46	100,0	171,90	100,0	158,96	100,0	57,98	100,0
II 1974	Фитофаги	127,93	88,7	45,24	86,4	44,92	92,8	4,07	92,1
	Эврифаги	16,23	11,3	7,10	13,6	2,51	5,2	0,04	0,9
	Хищники	+	+	0,04	+	0,96	2,0	0,31	7,0
	Всего	144,16	100,0	52,38	100,0	48,39	100,0	4,42	100,0
V 1974	Фитофаги	143,15	54,2	142,75	71,4	227,35	89,3	0,06	46,2
	Эврифаги	120,82	45,8	56,31	38,3	16,42	6,4	0,07	53,8
	Хищники	+	+	0,04	+	10,92	4,3	+	+
	Всего	263,97	100,0	199,01	100,0	254,69	100,0	0,13	100,0
VIII 1974	Фитофаги	297,60	69,0	213,76	77,4	253,01	93,0	13,59	98,8
	Эврифаги	133,94	31,0	61,73	22,4	15,04	5,6	0,02	0,2
	Хищники	0,01	+	0,52	0,2	3,98	1,4	0,14	1,0
	Всего	431,55	100,0	276,01	100,0	272,03	100,0	13,75	100,0

Примечания. Те же, что к табл. 4.8 и 4.10.

Таблица 4.12

Сроки «основного» размножения отдельных видов зоопланктона в Балтийском море



(несколько суток), затем следуют кладоцеры (8—10 сут), аппендикулярии (10—12 сут), копеподы (см. табл. 4.13). Отношение продуктивности к биомассе (коэффициент П/Б) по группам организмов составляют у коловраток 60,5, у кладоцер 26,6, у копепод 14,5 [469].

Сведения о продукции зоопланктона немногочислены и по оценке разных авторов различаются (табл. 4.14).

Таблица 4.13

Скорость развития, число генераций, плодовитость основных видов копепод в Балтийском море [100, 141]

Таксон	Полный цикл развития генераций, сут	Количество генераций	Величина кладки, шт.		
			мин.	ср.	макс.
Pseudocalanus elongatus	В течение всего года	1	9	15	23
Acartia longiremis	30—60	8	—	—	—
A. bifilosa	30—60	7—8	—	—	—
Temora longicornis	30—120	4—5	—	—	—
Centropages hamatus	30—120	3—4	—	—	—
Eurytemora hirundoides	30—90	5—6	14	23	30
Limnocalanus grimaldii	180	1	—	—	—

Таблица 4.14

Продукция зоопланктона в различных районах Балтийского моря

Район	Суточная продукция, г/м² сырой массы	Годовая продукция, г/м² сырой массы	Источник
Южная Балтика, открытые районы	0,79	288	[141]
Собственно Балтика:			
прибрежные районы	0,055	20	[229]
открытые районы	0,274	100	[231]
Финский залив, западная устьевая часть	от менее 0,2 до 1,0	—	[300]
Прибрежные воды Германии	от 0,3 до 1,2	108—425	[469]

4.5. Многолетняя динамика и влияние эвтрофикации

Основными факторами, определяющими динамику общей биомассы (численности) зоопланктона в открытой части Балтийского моря, являются термический режим и обеспеченность пищей. Меньшее значение имеет изменение солености, поскольку основу планктона составляют эвригалинные виды [80]. Подробнее изучена многолетняя динамика рачкового планктона, являющегося кормовой базой рыб Балтийского моря (рис. 4.5).

Для всех сезонов характерна цикличность изменений продуктивности зоопланктона [82, 87] (см. рис. 4.5). В весенний сезон выделяются 8—12-летние циклы: 1949—1960 гг. и 1971—1978 гг., соответствующие в общих чертах тепловодным периодам и повышенной численности зоопланктона, и 1961—1970 гг., характеризующиеся как холодноводный период с пониженной продуктивностью планк-

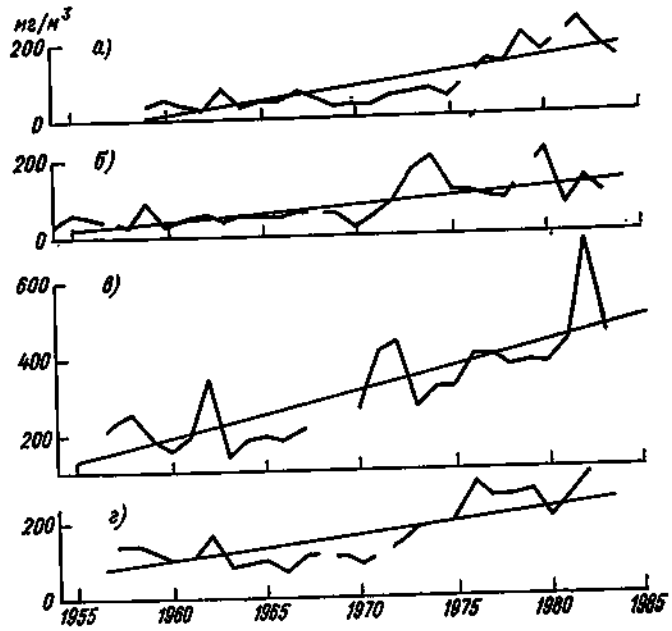


Рис. 4.5. Многолетняя динамика биомассы рачкового планктона в слое 0—100 м в феврале (*а*), мае (*б*), августе (*в*) и октябре—ноябре (*г*) и тенденции ее изменений в Балтийском море.

Таблица 4.15

Средняя сезонная численность (тыс. экз/м³) основных видов зоопланктона в слое 0—100 м в 1960—1982 гг. [87]

Таксон	1960—1969 гг.			1970—1979 гг.			1980—1982 гг.		
	Мин.	Ср.	Макс.	Мин.	Ср.	Макс.	Мин.	Ср.	Макс.
Pseudocalanus elongatus	1,5	2,0	2,4	1,5	3,7	5,0	5,2	6,1	7,1
Temora longicornis	0,8	1,3	1,5	0,6	1,3	1,7	1,2	1,3	1,4
Acartia spp.	0,3	0,8	1,2	0,5	0,8	1,3	1,0	1,3	1,8
Centropages hamatus	0,4	0,5	0,9	0,1	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2
Bosmina coregoni maritima	0,01	0,3	1,5	0,01	2,0	4,2	0,9	2,6	6,1
Synchaeta spp.	0,5	1,0	2,6	0,3	1,2	4,0	0,7	0,9	1,1
Fritillaria borealis	0,3	0,5	0,7	0,2	0,3	0,5	0,3	0,5	0,7

тона; с 1979 г. начался новый холодноводный период.

Колебания продуктивности в летний сезон до середины 60-х годов совпадали в общих чертах с динамикой речного стока (как показателя изменения содержания питательных солей, а следовательно, кормности водоема) и имели цикличность, соответствующую маловодному (до 1952 г.) и многоводному (1953—1959 гг.) периодам, низкой и повышенной продуктивности планктона. С 1960 г. начался новый маловодный период, продолжавшийся до 1977 г. До конца 60-х годов он сопровождался небольшим снижением (по сравнению с предыдущим периодом) количества зоопланктона (кроме 1962 г.). С начала 70-х годов в связи с увеличением концентрации питательных солей в верхнем слое, происшедшим вследствие естественных причин и усиления антропогенного влияния, наметилась четкая тенденция к увеличению продуктивности зоопланктона. Внутри каждого из рассматриваемых периодов выделяются отдельные годы, когда колнчество зоопланктона значительно превышает средние для периода значения, такое явление наблюдается через каждые 11 лет. Обычно такие вспышки развития зоопланктона возникают через 2—3 года после максимума солнечной активности [87].

В осенний сезон выделены два периода — с 1957 по 1970 г. и с 1972 г. по настоящее время. Для первого периода характерны небольшие колебания биомассы, для второго — постепенное ее повышение. Эти периоды согласуются с динамикой питательных солей [82, 87].

В целом в 70-е годы по сравнению с 60-ми годами в период максимального развития биомасса рачкового планктона повысилась в районе Борнхольмской впадины и Слупского желоба в 1,9, в Готландском бассейне — в 1,7, Форе — в 1,5, Северной впадине — в 1,6 раз. В 1980—1982 гг. по сравнению с 70-ми годами биомасса увеличилась в 1,4—1,5 раз [87].

Увеличение количества зоопланктона происходило за счет повышения численности подавляющего большинства видов, особенно фитофагов (табл. 4.15). В результате изменилась трофическая структура зоопланктона: доля фитофагов с 65 % в 60-х годах увеличилась до 74 % в 70-х годах и до 81,1 % в 1980—1982 гг. [87]. Другим последствием перераспределения значения видов в планктоне было изменение вертикального распределения общей биомассы, выразившееся в более быстрых темпах ее роста в слое 50—100 м по сравнению со слоем 0—50 м. Ухудшились условия жизни солеполюбивых видов, обитающих в глубинном 100—150-метровом слое, в результате чего произошло снижение их численности и ареалов распространения [82, 87].

На сильно загрязненных участках прибрежной зоны многими исследователями отмечается снижение видового разнообразия, численности зоопланктона, преобладающее развитие толерантных к загрязнению видов.

Таким образом, к середине 80-х годов по сравнению с 60-ми годами в Балтийском море под влиянием естественных причин и эвтрофикации произошли заметные изменения в планктонном сообществе, выразившиеся в повышении численности подавляющего большинства видов, изменении трофической структуры и распределении зоопланктона.

5. НЕКТОБЕНТОС

Основу нектобентоса в Балтийском море составляют мизиды и морской таракан, имеющие большое значение в экосистеме Балтийского моря. Большинство литературных сведений о биологии мизид относится к наиболее массовым видам. Так, хорошо изучена биология и экология массового прибрежного вида *Neomysis integer Leach (N. vulgaris Cherniavskyi, N. vulgaris Thomposon)*, обитающего в прол. Ла-Манш [354]. Изучению биологии, распределения, размножения, динамики численности этого вида в Рижском заливе посвящены работы Л. В. Саниной [171], И. А. Котты [90, 92, 93]. Экологическая характеристика мизид Балтийского моря приведена в работах Циммера [508], Сегерстреле [476], Д. А. Зенкевича [67]. Результаты исследований о вертикальном распределении мизид в течение суток содержатся в работах И. И. Николаева [130], Н. А. Халдиновой и других [196], В. А. Чеховой [198]. Н. А. Спасский и С. М. Мережинская [159], С. М. Никитина и Н. И. Спасский [136], С. М. Никитина [135] изучали биологию и распределение мизид, а также морского таракана в южной части Балтийского моря (Клайпедский район) в связи с их значением в питании промысловых рыб. Сезонная динамика численности и распределения массового вида открытых районов Восточной и Юго-Восточной балтики *Mysis mixta Lillieborg* приведена в работе

Г. М. Швецовой [202]. В настоящее время совершенно неизученным остается вопрос об оценке продукции нектобентических ракообразных.

5.1. Видовой состав мизид и его экологическая характеристика

В Балтийском море обитают 8 видов мизид, относящихся к 5 родам семейства Mysidae [308]:

1. Род *Gastrosaccus.*

G. spinifer yoes (Mysis spinifer yoes, Acontocaris eivingstonea, Gastrosaccus spiniferus) обитает в западной части Балтийского моря до о. Борнхольм, относится к сублиторальной группе организмов [508].

2. Род *Mesomysis.*

Mesomysis, Paramysis lacustris относятся к сарматскому комплексу, хорошо акклиматизировались в Куршском заливе, проникли в открытое море, встречаются в прибрежной полосе мелководья [109].

3. Род *Mysis.*

Mysis mixta — ледниковый реликт Иольдиевого моря, сублиторальная, эвригалинная, стенотермная, морская форма [67, 476, 508]; *Mysis oculata* — морской, ледниковый реликт Иольдиевого моря, крайне эвригалинный, широко распространен в Балтике [67]; *Mysis relicta* — холоднолюбивый, эвригалинный, солоноватоводный, глубоководный, сублиторальный вид [509].

4. Род *Neomysis.*

N. integer (N. vulgaris, N. vulgaris) относится к литоральной группе организмов бореально-атлантического комплекса с распространением от прол. Каттегат до Финского залива [508].

5. Род *Praunus.*

Praunus flexuosus, Praunus inermis — мелководные, литоральные виды, широко распространенные в Балтийском море, но малочисленные, встречаются в зарослях макрофитов [508, 213].

В Восточной и Юго-Восточной Балтике обитает 6 видов мизид. Из них массовыми являются *Mysis mixta* и *Neomysis integer. Mysis relicta* многочисленна в глубоководной части Рижского и Финского заливов. Численность *Praunus flexuosus* и *Praunus inermis* невысока, их распределение совпадает с распределением донной растительности.

Mesomysis kovalevskyi встречается единичными особями в районе, прилегающем к Куршскому заливу.

Neomysis integer — самый массовый вид мизид прибрежной зоны Балтики и ее заливов, распространен от прол. Каттегат до Финского залива [508]. Обнаружен при солености от 0,2 до 18‰ [354, 474]. Вид теплолюбивый, в летний период предпочитает участки, где вода прогревается до 23—25 °С, в январе—марте встречается при температуре у дна 2—4 °С. В Восточной Балтике встречается от уреза воды до глубин 180—200 м, наибольшей численности достигает летом в прибрежной зоне на глубинах до 15—30 м, осенью в годы со значительным прогревом воды — в слое над глубинами 50—60 м. С наступлением зимы отходит в более глубокие и менее охлажденные слои воды, где держится до весны [171, 354, 474, 509]. К началу размножения весной концентрируется на участках с глубиной 4—20 м. Развитие половых продуктов начинается при температуре воды выше 7 °С [336, 354]. В прол. Ла-Манш имеет две генерации: летнюю (продолжительность жизни с мая—начала июня до конца сентября) и зимнюю, или вторую летнюю (продолжительность жизни с начала сентября до июня следующего года). Летнее поколение достигает половой зрелости через 1,0—1,5 мес после выхода из марсупиума, зимнее — только весной следующего года. Вынашивание яиц продолжается 14—20 сут и зависит от температуры. Плодовитость — 12—55 яиц [354].

В Пярнуской бухте с более континентальным климатом этот вид имеет три поколения: зимнее (продолжительность жизни с июля предыдущего года по июль текущего), летнее (продолжительность жизни — с начала июня по август—сентябрь) и третье поколение [90]. Самки зимнего поколения достигают длины 20 мм, самцы — 18 мм, у летнего поколения — соответственно 16 и 15 мм. Среднее количество эмбрионов у одной самки зимнего поколения — 32, у самки летнего поколения — 20. Чем крупнее самка, тем большее количество яиц она несет, а чем ближе к осени, тем меньше яиц в зародышевой сумке.

Численность неомизиса определяется термическими условиями в периоды зимовки и размножения [90, 129]. В годы с теплым летом развитие и рост происходят быстрее, чем в годы с холодным летом. После мягких зим 1964, 1972, 1959, 1961 гг. средняя численность неомизиса составляла 29—53 экз/м³, а после суровых — 1960, 1963, 1970 гг. — 4—12 экз/м³ [336].

M. mixta — массовый вид открытых районов Балтики, холодолюбивый арктический реликт. В Балтийском море найден на глубинах от 10 до 230 м [195]. Широко распространен, но менее многочислен в Рижском и Финском заливах. Выдерживает колебания солености от 2 до 15‰ [67, 509]. Оптимальная температура воды для взрослых особей составляет 5—9 °С [336, 509]. Молодь более термовалентна и встречается даже при температуре 18,3 °С.

Вид моноцикличный, размножение происходит с января по май [136, 201], массовый «нерест» — в феврале—марте.

Длина половозрелых самок в Восточной Балтике составляет 16—26 мм, в среднем — 22 мм, в Рижском заливе — 15—23 мм, в среднем — 18 мм. Плодовитость составляет 8—87 эмбрионов, средняя — 37 эмбрионов, в Рижском залиме 8—42 эмбриона, средняя — 23 эмбриона. Молодь покидает выводковые сумки самок при длине 3,0—3,5 мм. Максимальный размер самок равен 27 мм, самцов — 24 мм [201]. Отдельные особи достигают возраста двух лет, в то время как основная масса погибает, достигнув 18—19 мес [135].

M. relicta — наиболее холодноводный вид из гляциальных реликтов. Многочисленна в Рижском, Финском и Ботническом заливах. Основным фактором, ограничивающим численность ее в центральном бассейне Балтийского моря, является сравнительно высокая температура воды. Выдерживает колебания солености от 4—6,5 до 16‰ [92, 354]. Оптимальная для вида температура воды у дна составляет 4—7 °С [92, 474]. Максимальная температура, при которой встречаются половозрелые особи, равна 14 °С, молодь — 18,3 °С. Период размножения в Рижском заливе длится с марта по

июль, минимальная длина яйценосных самок составляет 13 мм, массовое созревание происходит при длине 16—17 мм. Количество эмбрионов в марсупиуме колеблется от 3 до 49, средняя плодовитость — 17 эмбрионов. Мизида дает только одно поколение, молодь покидает выводковую сумку самок не единовременно, а порциями [201]. В глубоких слоях Рижского залива образует два максимума численности — в мае и июле [93]. Продолжительность жизни около полутора лет [458].

Большинство видов мизид являются типичными эврифагами. Наиболее подробно изучено питание *M. mixta* и *N. integer*. Основными компонентами их пищи служат детрит, фитопланктон и зоопланктон. В рационе *M. mixta* преобладают планктонные ракообразные и детрит, в рационе *N. integer* — планктонные ракообразные и фитопланктон [113].

5.2. Особенности распределения и динамика численности

Во все сезоны года численность и биомассу мизид в открытой части Восточной и Юго-Восточной Балтики определяет *M. mixta* и только в конце лета — осенью значительную долю составляет также *N. integer* (табл. 5.1).

M. mixta, встречаясь над глубинами 20—150 м при температуре придонного слоя воды от 1,3 до 5,3 °С в зимне-весенний период (период размножения), предпочитает районы с глубиной 50—60 м и сравнительно высокой температурой у дна (3,7—5,3 °С). Расположение относительно теплых придонных вод определяет места концентраций этого рачка зимой и в начале весны. Поэтому в холодные зимы его распределение пятнистое (рис. 5.1 *а*). В теплые зимы, когда наблюдалось сравнительно равномерное распределение температуры (в слое 0—80 м она составляла 4,7—5,1 °С), мизиды распределялись более равномерно (рис. 5.1 *б*). В целом зимой и весной скопления мизид наиболее плотные в юго-восточном районе (Гданьский залив — Папесциеме) (рис. 5.2), в котором теплозапас вод больше.

N. integer в зимне-весенний период встречается над глубинами 20—100 м, небольшие скопления образует над глубинами 20—30 м при температуре воды 1,6—2,0 °С.

Летом скопления *M. mixta* по сравнению с весной смещаются на меньшие глубины (20—50 м). В прогретых до дна прибрежных водах концентрируется размножающаяся *N. integer* [89, 93]. Распределение *M. mixta* по глубинам дифференцировано в зависимости от ее размеров. Взрослые рачки встречаются над глубинами 50 м и более, там, где ко дну прилегают воды холодного промежуточного слоя с температурой 2,1—4,8 °С, молодь — в широком диапазоне глубин — от 10 до 100 м при температуре у дна 2,1—15,4 °С, концентрируясь там, где у дна относительно теплее.

В конце лета — осенью подросшие за лето *M. mixta* начинают формировать преднерестовые скопления, а у *N. integer* за счет продолжающегося размножения также наблюдается возрастание численности и биомассы. Концентрации мизид с биомассой 30—50 мг/м³ образуются над глубинами 20—10 м. Общая биомасса мизид складывается в основном за счет холодноводной *M. mixta*, поэтому

Таблица 5.1

Динамика средних численности (экз/тыс. м³) и биомассы (мг/м³) мизид в Восточной и Юго-Восточной Балтике

Месяц и год	*M. mixta*		*N. integer*		Число станций
	экз/тыс. м³	мг/м³	экз/тыс. м³	мг/м³	
V 1979	49,0	3,0	23,0	0,40	21
VI	25,0	0,3	1,0	0,02	19
VIII	359,0	8,6	256,0	3,90	37
IX	223,0	7,3	207,0	1,70	26
X	69,0	2,9	161,0	1,60	19
I 1980	49,0	2,9	25,0	0,50	26
IV	95,0	2,0	28,0	0,40	30
VI	106,0	1,2	0,8	0,10	38
VII	243,0	1,8	0,9	0,01	28
IX	304,0	10,9	265,0	5,70	
II 1982	35,0	1,6	0,0	0,00	42
VI	207,0	1,8	0,0	0,00	17
VII	284,0	2,4	10,0	0,02	26
IX	570,0	16,0	441,0	7,30	33
I 1984	69,0	3,2	12,0	0,08	43
III	23,0	1,2	5,0	0,04	34
VI	302,0	2,0	2,0	0,02	43
VII	649,0	7,0	9,0	0,07	43
IX	512,0	12,8	204,0	1,41	45

Примечание. Материал собран тралом Айзекса—Кида (10-футовая модель) со вставкой в кутке из газа № 15. Траления проводили в темное время суток методом ступенчатого лова в слое дно — поверхность над глубинами 20—100 м.

положение и площадь зон высокой общей биомассы мизид в разные годы изменяется в соответствии с расположением вод холодного промежуточного слоя. Так, с 1979 по 1982 гг. в сентябре наиболее продуктивной была юго-восточная часть (от Гданьского залива до Клайпеды или Папесциеме) (рис. 5.3). Особенно выделялся этот район в 1982 г., когда большие концентрации мизид (30—50 мг/м³) наблюдались над глубиной 30—70 м на большой акватории в Гданьском заливе, вдоль Куршской косы и на Клайпедском мелководье. Здесь температура придонных вод по абсолютному значению была ниже, чем в другом продуктивном районе (Лиепая—Павилоста), меньшем по площади.

Начиная с 1983 г. наиболее продуктивной стала восточная часть (рис. 5.3). С 1983 г. в юго-восточном районе более резко, чем в восточном, увеличивается толщина гомотермического слоя и происходит как бы заглубление температурного скачка. Особенно это явление проявилось в сентябре 1985 г., когда гомотермический слой достигал толщины 60—70 м (15—17 °С). В соответствии с этим продуктивные мизидами зоны сместились севернее, где в придонном слое холоднее, и располагались над большими глубинами.

Численность мизид испытывает сезонные и межгодовые колебания (см. табл. 5.1).

В зимне-весенний период средние численность и биомасса невелики, в начале мая в открытой части моря численность *M. mixta* возрастает, но биомасса остается невысокой, так как основу популяции составляет молодь. *N. integer* для размножения перемещается в более прогретое мелководье.

К концу лета и началу осени биомасса мизид возрастает за счет соматического роста рачков обоих видов, которые достигают в это время наибольшей численности и биомассы (максимум — 3777 экз/тыс. м³ и 80,8 мг/м³ соответственно).

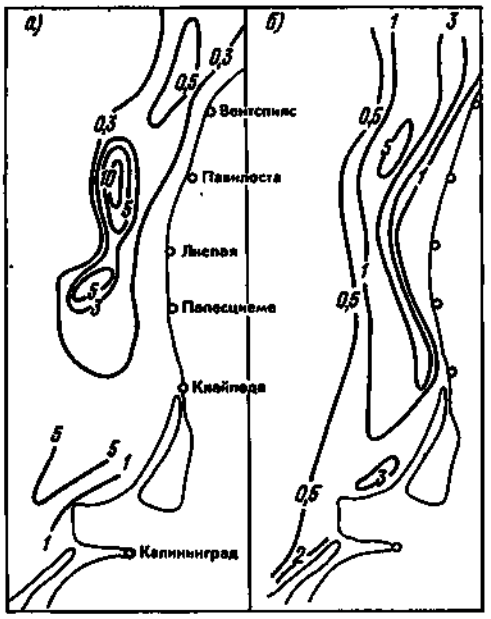


Рис. 5.1. Распределение биомассы мизид (мг/м³) в толще воды в феврале 1982 г. (*а*) и январе 1983 г. (*б*).

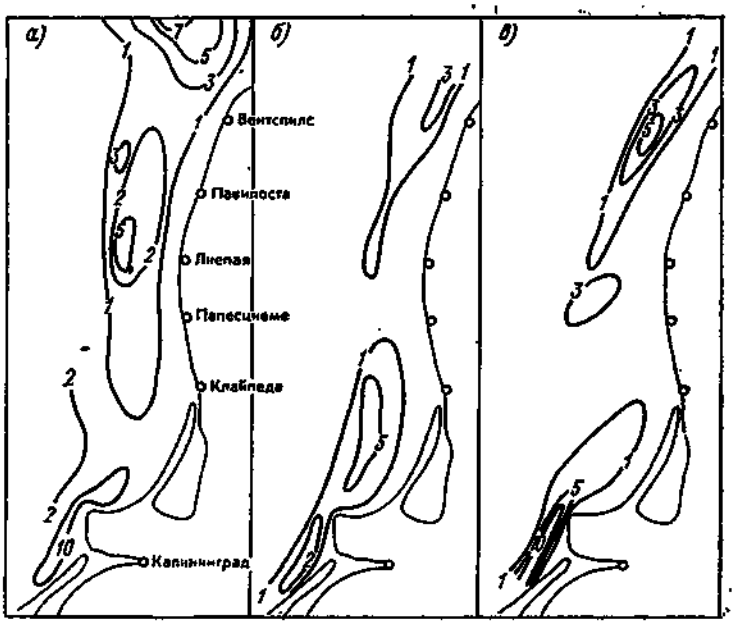
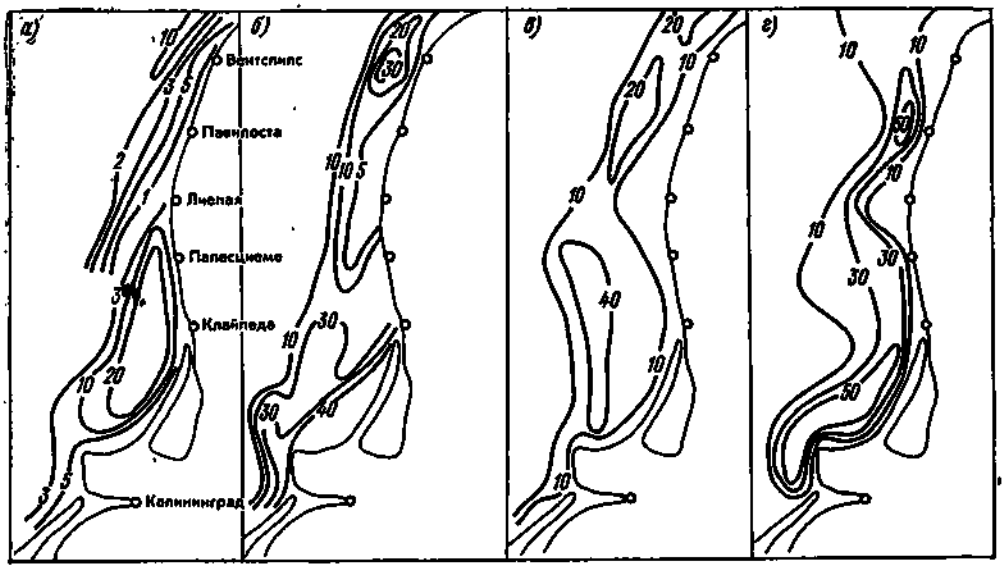


Рис. 5.2. Распределение биомассы мизид (мг/м³) в толще воды в январе (*а*), марте (*б*) и июне 1984 г. (*в*).



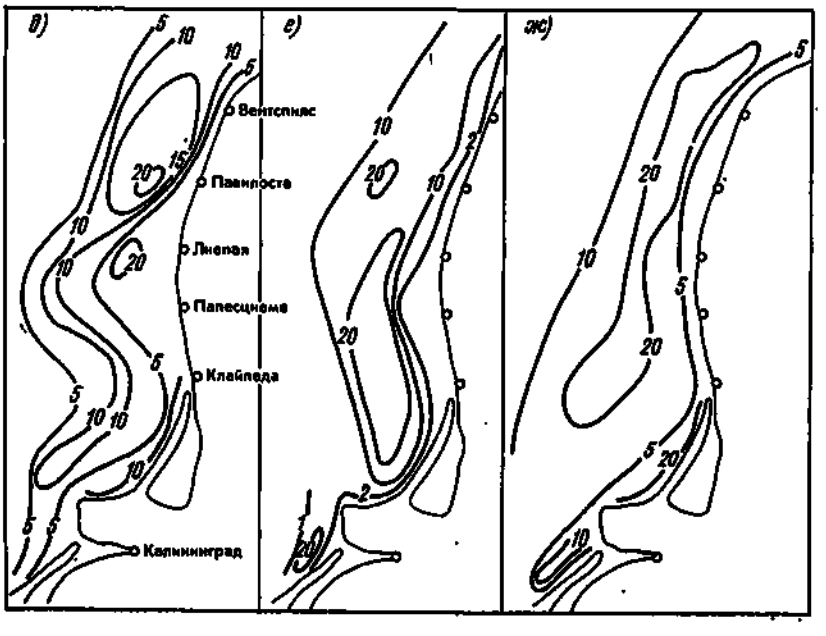


Рис. 5.3. Распределение биомассы мизид (мг/м³) в толще воды в сентябре 1979 г. (*а*), 1980 г. (*б*), 1982 г. (*в*), 1983 г (*д*), 1984 г. (*е*) и 1985 г. (*жс*).

Межгодовые колебания численности этих животных связаны с условиями в период воспроизводства: урожайные поколения реликтовой *M. mixta* формируются после холодных зим, а тепловодной — в годы с теплым летом [90, 128, 132, 198, 354]. В 1979—1984 гг. наиболее высокая численность *M. mixta* в сентябре отмечена в годы с умеренной зимой (1981—1982), а *N. integer* — в годы, когда температура слоя 0—20 м в августе была несколько выше нормы (1980—1982) [табл. 5.2].

Таблица 5.2

Динамика средних численности и биомассы мизид в Восточной и Юго-Восточной Балтике в сентябре

Год	Температура в слое 0—20 м в августе, °С	Сумма отрицательных градусо-дней в г. Лиепае	*M. mixta*		*N. integer*	
			численность, экз/тыс. м³	биомасса, мг/м³	численность, экз/тыс. м³	биомасса, мг/м³
1979	15,1	683	223	7,3	207	1,7
1980	15,8	532	304	10,9	265	5,7
1981	15,6	286	683	15,5	176	1,7
1982	15,5	315	570	16,0	641	7,3
1983	16,3	112	222	7,6	169	1,8
1984	15,4	260	478	12,8	204	1,4

Примечание. То же, что к табл. 5.1.

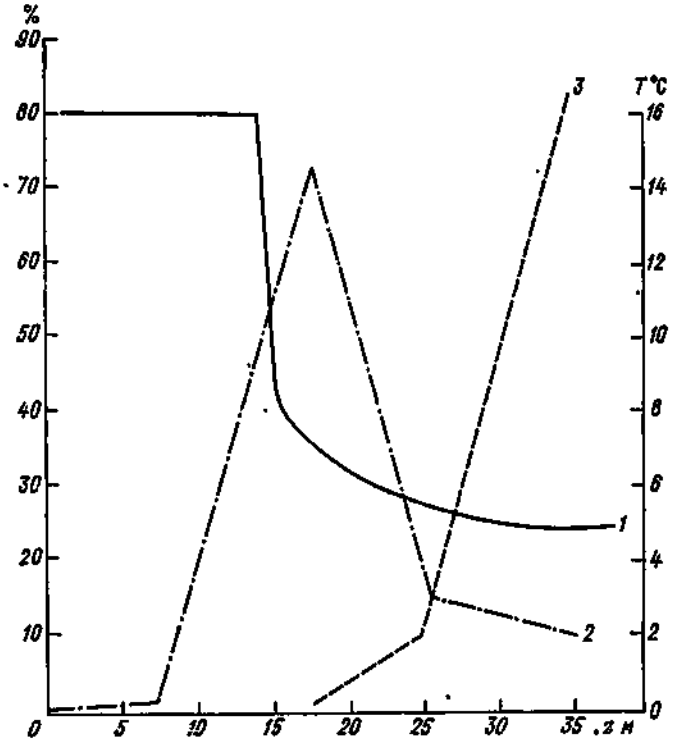


Рис. 5.4. Распределение температуры воды T (*1*) и численности мизид (%) (*2* и *3*) по глубине z в темное время суток в июле.

2) 1—2 ч; *3*) 4 ч 45 мин—5 ч 45 мин.

5.3. Вертикальные миграции мизид

Мизидам присущи две формы обитания, две фазы: придонная и пелагическая. Все светлое время суток они находятся у дна, а с наступлением сумерек мигрируют в толщу воды и даже до поверхности. В верхних слоях происходит активное питание мелким зоопланктоном и фитопланктоном. В придонном слое мизиды потребляют попадающий сюда детрит. Исследованиями И. И. Николаева [130], В. А. Чеховой [198], Н. А. Халдиновой и др. [195] установлено, что длительность дневной (придонной) и ночной (пелагической) фаз распределения в разные сезоны, а также скорость и протяженность вертикальных перемещений мизид в Балтийском море и Рижском заливе меняются в зависимости от изменения освещенности, наблюдаемой по сезонам и месяцам. При этом на изменение амплитуды миграций влияют факторы, уменьшающие освещенность: облачность, туман, осадки, волнение моря, ледовый покров, глубина места, а также биологические факторы: видовой и возрастной составы мизид, их физиологическое состояние. По нашим данным в июле в Восточной Балтике взрослые особи *M. mixta* (длиной 20 мм и более) ночью не поднимались выше 10 м от дна, в то время как молодь совершала миграции от дна до поверхности, преодолевая при этом большой перепад температуры (на поверхности — 16 °С, у дна — 4,8 °С). Наибольшие концентрации мизид в темное время суток наблюдались чаще всего в зоне температурного скачка или несколько ниже его (рис. 5.4). Это согласуется с данными И. И. Николаева [130], В. А. Чеховой [198]. Наиболее четко миграции мизид выражены осенью. Наиболее высоко поднимается ночью и образует ярус ночного скопления (мизидную зону) прибрежный теплолюбивый вид *N. vulgaris*, наиболее низко — самый холодноводный вид *M. relicta* [130]. Способность мизид перемещаться в вертикальном направлении представляет практический интерес, так как переход мизид из пелагической фазы распределения в придонную и наоборот влияет на вертикальные перемещения рыб, питающихся этими организмами.

5.4. Морской таракан

Mesidotea entomon (Linne) — широко распространен по всему Балтийскому морю, по мере возрастания солености и температуры воды количество его уменьшается. В западной части моря, где соленость достигает 20‰ и более, морской таракан уже не встречается, за исключением узких прибрежных пространств вблизи Польши и Швеции [279]. Малотребователен в отношении грунта и газового режима. Летом в открытой Балтике основная часть его биомассы размещается на глубине 30—80 м при температуре воды 1—8 °С и солености 7—11‰, в восточной части Финского залива — на глубине 30—70 м при температуре 2—8 °С и солености 3—9‰ [239].

Размножается в течение всего года, наиболее интенсивное размножение приходится на июнь—август. Половозрелость наступает при длине тела 30—40 мм, в отдельных случаях у особей, достигших двух полных лет жизни, массовое размножение — при достижении возраста трех лет. Плодовитость составляет 141—360 эмбрионов, примерный возраст — 8—9 лет при размере до 73 мм [136].

6. ЗООБЕНТОС (МАКРОФАУНА)

Первые исследования донной фауны были проведены в середине прошлого столетия Ловеном [378, 379]. Во второй половине XIX и начале XX в. значительный вклад в изучение систематики и фаунистики донной фауны внесли М. Зенгер [65], О. П. Гримм [53], Мебиус [403, 404], Нордквист [423], Бранд [262], Левандер [365], Рейбиш [446].

Среди исследований 20—30-х годов нашего столетия следует отметить фаунистические работы Хессле [317], К. М. Дерюгина [57], Демеля [278, 279], Хагмейера [309], Сегерстреле [473], Мулицкого [408]. После второй мировой войны в 50—60-е годы продолжало развиваться преимущественно экологическое направление исследований. В этот период наиболее известны работы Демеля с соавторами [278, 279], А. Т. Шурина [212, 213], Гесснера [389], Ремане [450]), Арндта [242], А. А. Ярвекюльга [223, 225, 226], Ю. К. Лукшенаса [109, 110], Жмудзиньского [510] и некоторые другие.

В 70-е и начале 80-х годов в связи с переходом к экосистемному направлению в биологических исследованиях, кроме исследований экологического характера, интенсивно развиваются работы по изучению многолетней динамики численности зообентоса, его продукционных процессов, выяснению антропогенного влияния на донную фауну Балтики и ряд других. Бентос как важная составная часть экосистемы используется при моделировании процессов в Балтийском море. Для этого периода следует указать работы Янсона [328, 329], Анкара и Элмгрена [238], Андерсин с соавторами [237, 290], Островского [429], Каутского [348] и многие другие. Заслуживают внимания обобщающие работы А. А. Ярвекюльга [225, 226], Мелвасало с группой авторов [391].

6.1. Видовой состав, его зоогеографическая и экологическая характеристика

Балтийское море в целом можно отнести к водоемам бореального типа, однако в отдельных районах и слоях оно носит черты арктического характера. В связи с этим его населяют различные по зоогеографической принадлежности организмы, из которых по числу таксонов преобладают бореальные и панбореальные виды (табл. 6.1).

Другим важным фактором формирования видового состава донной фауны является соленость. В слабосоленом Балтийском море отсутствуют многие морские виды, широко распространенные в других морях. Из различных групп организмов особенно слабо (по 1—3 таксона) представлены *Hydrozoa, Anthozoa, Bryozoa, Asterioidea, Ophiuroidea* и некоторые другие. В целом в зообентосе Балтики преобладают морские виды, на долю которых приходится около 64 % от общего числа основных видов (см. табл. 6.1).

Видовое разнообразие донной фауны и число морских видов снижаются по мере уменьшения солености и продвижения от прол. Каттегат в глубь моря. Вместе с тем заливы (Рижский, Финский), несмотря на сравнительно низкую соленость, по количеству видов не уступают Центральной Балтике; видовое разнообразие в них увеличивается за счет эвригалинных пресноводных форм, заселяющих опресненные районы (табл. 6.2).

Другим следствием влияния низкой солености является уменьшение размеров многих морских видов по сравнению с океаническими водоемами и по мере продвижения с юго-запада на северо-восток. Так, длина *Mytilus edulis* в северных морях может достигать 80—100 мм, тогда как в Южной Балтике — 55 мм, Восточной Балтике — 45 мм, в Рижском заливе — 31 мм. *Gammarus locusta* в морях с высокой соленостью имеет максимальные размеры до 48 мм, в Восточной Балтике — лишь 22 мм; *Pygospio elegans* — 15 и 10 мм соответственно.

Вместе с тем наблюдается увеличение размеров некоторых солоноватоводных арктических видов в более опресненных и холодных заливах — Рижском и Финском по сравнению с собственно Балтийским морем. Примером могут служить *Mesidotea entomon* и *Pontoporeia affinis* (см. табл. 6.1).

Важной особенностью зообентоса Балтийского моря является то, что вследствие небольших размеров организмов он практически весь является кормовым для рыб.

Основной фон макрофауны составляет меньшее число видов (см. табл. 6.1). Из них в прибрежных районах моря наибольшее значение имеют *Macoma baltica, Corophium volutator, Bathyporeia pilosa,* виды родов *Gammarus* и *Idotea, Pygospio elegans* и *Glitellio arenarius.*

На средних глубинах (30—80 м) доминируют *Macoma baltica, Mesidotea entomon, Pontoporeia affinis, P. femorata,* глубже 80 м — *Scoloplos armiger.* В Рижском и Финском заливах состав доминирующих видов сходен.

Биомассу зообентоса в Юго-Восточной, Восточной и Северо-Восточной Балтике определяют *Macoma baltica, Mytilus edulis, Mesidotea entomon, Pontoporeia affinis, P. femorasa* и *Scoloplos armiger* (последний — в глубоководной зоне).

Macoma baltica — морской эвритермный эвригалинный политопный вид, собирающий детритофаг, сравнительно требовательный к газовому режиму. Хорошо переносит эвтрофирование и встречается по всей Балтике от олиго- до α-мезосапробной зоны и, согласно А. А. Ярвекюльгу [226], может служить индикатором α-мезосапробной зоны. В Восточной Балтике макома встречается почти от уреза воды до глубины 90 м, образуя наибольшие биомассы в зоне 20—70 м. В Рижском заливе он был обнаружен до 52 м с максимумом биомассы в зоне глубин 20—30 м. В западной части Финского залива [223] максимальная глубина обитания этого вида составляет 70 м. На большей акватории Балтики макома составляет основную долю общей биомассы зообентоса.

Mytilus edulis — морской эвригалинный эвритермный литофильный вид, сестофаг, чувстви-

Таблица 6.1

Экологическая, зоогеографическая и трофическая характеристика основных видов зообентоса в Балтийском море

Таксон	Максимальная длина, мм			Грунт	Глубина, м		Тип		
	в целом по морю	в Восточной Балтике	в Рижском заливе		обитания	наибольших биомасс	по солености	по зоогеографической принадлежности	трофический
Priapulida									
Halicryptus spinulosus Sieb.	15	15	—	Илистый песок, гравий	10—85	40—50	М	ПА	Г
Priapulus caudatus	30	10	—	Илистый песок	20—50	40	М	—	—
Polychaeta									
Fabricia sabella Ehr.	3	—	—	Песок, илистый песок, гравий	до 20	<20	М	НА—ПБ	Ф(А)
Harmothoe sarsy	40	—	—	Политопный	10—90	40—80	М	ПА—Б	Х
Manaynkia aestuarina	5	4—5	—	Песок, илистый песок	<20	<20	С	Б	Ф(А)
Nereis diversicolor	160	50	—	Песок, илистый песок, гравий	<60	<20	М	ПБ	Г
Pugospio elegans Clap.	15	10	—	Песок, илистый песок, гравий	10—80	20—60	М	ПБ	С
Scoloplos armiger	30	25	—	Ил, илистый песок	40—140	80—100	М	Космопол.	Г
Streblospio shrubsoli Buch.	10	—	—	Песок, илистый	<40	<20	С	Б	—
Terebellides stroemi Sars.	30	25	—	песок, гравий Ил, илистый песок	40—85	60—80	М	Космопол.	С
Cirripedia									
Balanus improvisus Darv.	15	—	—	Каменисто-галечные	<40	<30	М	Космопол.	Ф(Б)
Isopoda									
Asellus aquaticus Racow	12	—	—	Песок, камни, растительность	<20	<20	П	ПБ	—
Idotea baltica (Pall.)	22	21	—	Среди растительности	<20	<20	М	ПБ?	О
I. helepes (Pall.)	19	18	—	Среди растительности	<20	<20	С	ПБ	О
Jaera albifrons Leach	5	4	—	Каменисто-галечный	<20	<20	М	НА—ПБ	—
Mesidotea entomon (L.)	75	54	72	Политопный	10—85	40—70	С	ПА	О
Cumacea									
Diastylis rathkei Kröyer	18	—	—	Ил, илистый песок, песок	20—85	50—80	М	ПА—Б	С
Amphipoda									
Bathyporeia pilosa Lind.	7	6	6	Песок, илистый песок	<60	<20	С	Б	Ф(А)
Calliopius laeviusculus (Kröyer)	8	—	—	Песок, илистый песок	<20	<20	М	ПА—Б	
Corophium volutator Pall.	10	11	11	Песок, илистый песок, глина	<50	10—30	М	ПБ	Ф—Д
Gammarus duebeni Lilljeb.	23	11	—	Песок, камни, растительность	<30	<20	С	Б	О
G. locusta L.	17	22	—	Песок, камни, растительность	<30	<20	М	ПБ	О
G. oceanicus Segerstr.	27	—	—	Песок, камни, растительность	<30	<20	М	ПА—Б	О
G. salinus Sponner	—	17	—	Песок, камни, растительность	<30	<20	С	Б	О
G. zaddachi Sexton—Sponner	—	14	—	Песок, камни, растительность	<30	<20	С	ПБ	О
Pontoporeia affinis Lindstr.	10	11	12	Песок, илистый песок, гравий, ил	<10—80	<30—60	С	ПА	Ф—Д
P. femorata Krõyer	13	14	14	Илистый песок, ил	40—100	50—70	М	ПА	Ф—Д
Mysis mixta Lillieb.	25	26	26	Политопный	20—150	40—70	М	ПА	Ф—Д
M. oculata relicta Loven	28	26	26	Политопный	30—150	50—70	С	ПА	Ф—Д
Neomysis integer (Leach)	20	20	20	Политопный	20—100	<30	М	Б	Ф—Д
Praunus flexuosus (O. F. Müll.)	25	—	—	Среди растительности	<20	<20	М	Б	Ф—Д
P. inermis Rathke	13	—	—	Среди растительности	—	—	—	—	—
Decapoda									
Crangon crangon L.	50	36	—	Песок, гравий	<20	<20	М	ПБ	О
Palaemon adspersus Rathke	65	—	—	Песок, гравий	<20	<20	М	ПБ	О

Продолжение таблицы 6.1

Таксон	Максимальная длина, мм			Грунт	Глубина, м		Тип		
	в целом по морю	в Восточной Балтике	в Рижском заливе		обитания	наибольших биомасс	по солености	по зоогеографической принадлежности	трофический
Gastropoda									
Hydrobia ventrosa Mont.	3	23	—	Песок, камни	<20	<20	С	ПБ	Р
H. ulvae Pennant	5	—	—	Песок, камни	<20	<20	М	ПБ	Р
Pomatopyrgus jenkinsi Smith	5	—	—	Песок, илистый песок	<20	<20	С?	—	—
Bivalvia									
Astarte borealis Chemnitz	30	—	—	Песок, илистый песок	30—80	70—80	М	ПА	Ф(А)
Cerastoderma lamarcki (Reeve)	27	—	—	Песок	<20	<20	С	ПБ	Ф(А)
Macoma baltica (L.)	24	24	21	Политопный	<90	20—70	М	ПБ	С
M. calcarea Chemnitz	25	—	—	Песок, илистый песок	40—90	—	М	ПА	—
Mya arenaria L.	70	45	45	Песок	<30	<20	М	ПБ	Ф(А)
Mytilus edulis L.	55	45	31	Каменисто-галечный	<50	10—30	М	НА—ПБ	Ф(Б)
Bryozoa									
Electa crustulenta v. baltica Borg	—	—	—	Каменисто-галечный	—	—	С	НА—Б	Ф(Б)
Oligochaeta	—	—	—	Песок, илистый песок, ил	10—60	до 30	—	—	—

Примечания: 1. Тип по солености: М — морской; С — солоноватоводный; П — пресноводный; по зоогеографической принадлежности; ПА — панарктические реликты; ПА—Б — панарктическо-бореальные; НА—ПБ — нижнеарктическо-панбореальные; Б — бореальные; ПБ — панбореальные; космопол. — космополитические; трофический тип: Ф(Б) — неподвижные (сессильные) сестофаги; Ф(А) — подвижные (вагильные) сестофаги; Р—Д — подвижные сесто- и детритофаги; С — собирающие детритофаги; Г — глотающие детритофаги; Р — фитофаги; О — омниворы; Х — хищники.

2. В графе 2 приведены данные Жмудзинского [511], в графах 6, 7 и 8 — Г. Околотовича [141] и А. А. Ярвекюльга [226], в остальных — данные автора.

тельный к колебаниям солености, требователен в отношении грунта, предпочитает районы с интенсивной динамикой водных масс. Обитает на каменистых, галечных, гравийных грунтах и на некоторых видах водорослей. Хорошо выносит эвтрофирование и встречается от олиго- до α-мезосапробной зоны. Широко распространен в прибрежной зоне и в открытых районах моря на каменистых банках. В Восточной Балтике обитает до глубины 52 м с максимумом биомассы в слое до 30 м. Сплошного пояса в прибрежной зоне не образует, встречается преимущественно в виде отдельных массивов. При благоприятных условиях образует колонии с биомассой до 2 кг/м^2. Составляет основную долю биомассы макрофауны на каменистых грунтах. В водах Западной Швеции, где этот моллюск достигает максимальных для Балтики размеров, он является объектом марикультуры [348].

Таблица 6.2

Число таксонов зообентоса по районам Балтийского моря

Район	Число таксонов	Источник
Южная Балтика	393	[141]
Центральная (Восточная) Балтика	170	[225]
Северная Балтика	42	[449]
Рижский залив	158	[225]
Финский залив	180	[225]

Pontoporeia affinis — широко распространенный гляциальный солоноватоводный реликтовый эвриэдафический вид, подвижный сесто- и детритофаг, обладает высокой эвритермностью (2—15 °С), требователен к газовому режиму, избегает повышенной солености и загрязнения. Оптимальная температура для этого вида 2—6 °С, соленость — 5—9 ‰. По А. А. Ярвекюльгу [226], он может служить индикатором β-мезосапробной зоны. В Восточной Балтике встречается на глубинах 10—80 м с максимумом биомассы в слое 30—60 м на песчаных и илисто-песчаных грунтах. В отдельных районах является ведущим видом зообентоса. В Рижском заливе этот вид встречается на глубинах 10—50 м с максимумом биомассы на глубинах более 30 м; в Финском заливе [223] его наибольшие скопления образуются в слое 30—70 м.

Pontoporeia femorata — гляциальный морской реликтовый пелофильный вид, подвижный сесто- и детритофаг, к газовому режиму мало требователен, но более стенотермичен, чем *P. affinis*. Встречается преимущественно на илистых и илисто-песчаных грунтах при температуре 2—4 °С и солености 6—10 ‰. В Восточной Балтике обитает на глубинах 40—100 м с максимумом биомассы в слое 50—70 м. В Рижском заливе этот вид встречается глубже 30 м, а в Финском [223] — чаще всего в слое 40—70 м.

Mesidotea entomon — гляциальный солоноватоводный реликтовый эвриэдафический вид, бродячий

Таблица 6.3

Название основных биоценозов донной фауны, их характеристика и распространение в Южной и Центральной Балтике (цит. по [226])

Район	Биоценоз	Характер биоценоза	Биомасса, г/м²	Глубина, м
Южная Балтика	*Macoma calcarea*	—	25	72—108
	Macoma baltica	—	32	15—81
	Mya arenaria	—	47	0,1—35,0
	Astarte borealis	—	41	40—92
	Mytilus edulis	—	317	15—40
	Scoloplos armiger	—	4	84—123
	Pontoporeia affinis	—	5	55—100
	Pontoporeia femorata	—	4	79—123
	Diastylis rathkei	—	5	55—106
Центральная Балтика	*Macoma baltica*	Политопный	26,1	2—88
	Mytilus edulis	Литофильный	131,5	1—49
	Astarte borealis	Псаммофильный	2,6	82
	Scoloplos armiger	Пелофильный	2,6	99—141
	Harmothoe sarsy	„	30,7	77—104
	Pontoporeia femorata	„	8,3	47—111
	Pontoporeia affinis	Эвриэдафический	17,6	48—52
	Mesidotea entomon	„	28,9	48—80
	Glitellio arenarius	Глареофильный	1,8	—

Примечание. Для сбора материала в Центральной Балтике использован дночерпатель «Океан» площадью раскрытия 0,1 м², промывка проб производилась через сито с размером ячей 0,4—0,5 мм. Моллюски взвешивались вместе с раковиной.

хищник, мало требователен в отношении газового режима и грунта, к загрязнению относится индифферентно. Встречается в широком температурном диапазоне (1—14 °С), но предпочитает температуру 2—8 °С и соленость 6—11 ‰. В Восточной Балтике встречается на глубинах 10—85 м с максимумом биомассы в слое 40—70 м, предпочитает восточные и северные районы моря, а также заливы. В Рижском заливе обитает на глубинах 10—50 м с максимумом биомассы в слое глубже 30 м, в Финском заливе [223] держится преимущественно в слое 40—70 м. В отдельных районах Балтики дает основную долю биомассы на глубинах более 40 м.

Следует отметить, что часть популяций *Pontoporeia affinis, P. femorata* и *Mesidotea entomon* совершает вертикальные миграции, поднимаясь ночью в толщу воды, особенно в период размножения, тогда в отдельных районах и слоях они становятся основной составной частью нектобентоса и важным пищевым компонентом не только донных, но и пелагических рыб.

Scoloplos armiger — морской космополитический пелофильный вид, глотающий детритофаг, мало требователен по отношению к кислороду, может обитать в условиях, близких к анаэробным. Требователен к солености: при ее уменьшении по мере продвижения с юго-запада на северо-восток граница обитания этого вида заглубляется. В Балтийском море он встречается на глубинах 40—140 м, в Восточной Балтике — преимущественно глубже 70 м с максимумом биомассы в слое 80—100 м (при отсутствии в этой зоне замора), где является ведущим видом макрофауны.

6.2. Биоценозы

В открытых районах Южной и Центральной (Восточной) Балтики выделено по 9 биоценозов, Финском заливе — 15, Рижском заливе — 20. Наименование биоценозов и их характеристики для Южной и Центральной Балтики показаны в табл. 6.3.

По данным разных авторов (цит. по [141]), в Южной Балтике наибольшие площади дна занимают биоценозы в литорали и элиторали *Macoma baltica*, в глубоководной зоне Гданьской, северной части Борнхольмской и южной части Готландской впадин — *Scoloplos armiger*. Песчаные грунты в прибрежной зоне у южного и юго-восточного побережья населяет также биоценоз *Mya arenaria*, а каменистые грунты у юго-восточного побережья Швеции и на банках Форе и Средней — биоценоз *Mytilus edulis*. Биоценоз *Pontoporeia affinis* встречается на западных склонах южной части Готландской котловины и северных склонах Слупского желоба, а *Pontoporeia femorata* — в псевдоабиссали южной части Готландской котловины. Биоценоз *Astarte borealis* населяет Арконскую, Борхольмскую впадины и Слупский желоб, а *Macoma calcarea* — Борнхольмскую впадину. *Diastylis rathkei* встречается местами у Южного Готланда и в северной части Гданьской впадины. Наиболее высокие биомассы имеет биоценоз *Mytilus edulis*, наименьшие — *Scoloplos armiger* и *Pontoporeia femorata*.

Размещение биоценозов в Восточной и Северо-Восточной Балтике показано на рис. 6.1. Наибольшее распространение в этих районах моря имеют биоценозы *Macoma baltica*, а самую высокую биомассу — *Mytilus edulis*. В целом в Восточной и Северо-Восточной Балтике по сравнению с Южной Балтикой наблюдается смена морских биоценозов солоноватоводными. Так, в Восточной и Северо-Восточной Балтике (и особенно в заливах) повышается роль таких реликтовых арктических солоноватоводных биоценозов, как *Pontoporeia affinis* и *Mesidotea entomon*, тогда как реликтовый арктический морской биоценоз *Macoma calcarea* отсутствует, а *Astarte borealis* обнаружен на небольшой площади лишь в Южном Готланде; в отдельных опресненных районах появляются пресноводные биоценозы.

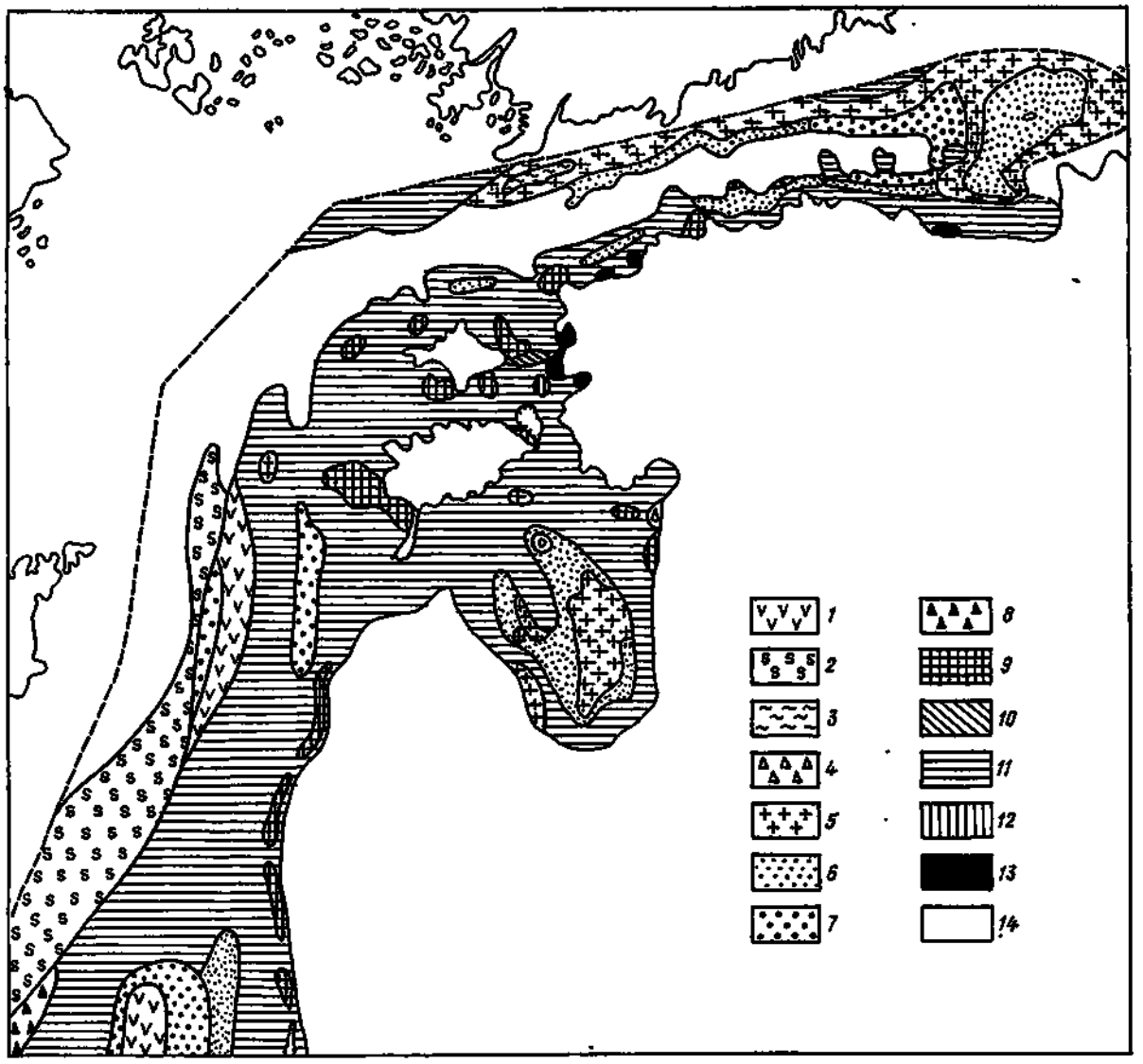


Рис. 6.1. Распространение важнейших донных биоценозов в восточной части Центральной Балтики, по [225].

1 — Harmothoe sarsy; 2 — Scoloplos armiger; 3 — Terebellides stroemi; 4 — Balanus improvisus; 5 — Mesidotea entomon; 6 — Pontoporeia affinis; 7 — Pontoporeia femorata; 8 — Astarte borealis; 9 — Mytilus edulis; 10 — Cerastoderma lamarcki; 11 — Macoma baltica; 12 — Mya arenaria; 13 — пресноводные биоценозы; *14* — зообентос отсутствует.
Распространение биоценоза *Mytilus edulis* у восточного побережья собственно Балтики уточнено с помощью телевизионных методов исследований.

6.3. Количественная характеристика и распределение

Количественная характеристика макрофауны в открытой части Балтийского моря (на глубинах 21—230 м) и в прибрежной зоне (3—20 м) показана в табл. 6.4. Основу биомассы составляют моллюски: в открытой части моря *Macoma baltica*, в прибрежной зоне *Mytilus edulis* и *Macoma baltica*. По численности в открытой части моря доминируют *Pontoporeia femorata*, а в прибрежной зоне наиболее многочисленны *Mytilus edulis* и *Pygospio elegans*.

По данным разных авторов (цит. по [141]), средняя биомасса зообентоса в Южной Балтике составляет 60 г/м², в Центральной Балтике — 25 г/м², в заливах Гданьском — 58 г/м², Рижском — 46 г/м², Финском — 16,3 г/м², Куршском — 21 г/м², Вислинском — 13 г/м².

Распределение биомассы по акватории моря неравномерно: от полного отсутствия в глубоководных впадинах (особенно в годы стагнаций) до нескольких килограмм на 1 м² на мидиевых банках. Большое влияние на ее распределение оказывает характер грунта. К наиболее продуктивным относятся каменисто-песчаные грунты, где в массе развиваются моллюски, к бедным — гравийные грунты (табл. 6.5).

Важную роль в распределении донной фауны играет глубина и связанные с ней изменения гидрологических характеристик. Судя по данным Жмудиньского [512], самая верхняя зона литорали (глубина 0,1—2,0 м) характеризуется пониженными биомассами зообентоса, не превышающими 6—7 г/м², лишь на каменистых грунтах, где появляются мидии, она значительно возрастает. На больших глубинах литорали (3—20 м) плотность и биомасса донного населения повышаются и в районе от Ирбенского пролива до Щукинского маяка составляют соответственно 92—2476 экз/м² и 2,9—62,3 г/м². Наиболее высокие биомассы отмечены в районах Паланги, Лиепаи, Юодкранте и Овиши (табл. 6.6). На отдельных участках на каменистых грунтах биомасса может достигать 1—2 кг/м². В

Таблица 6.4

Количественный состав зообентоса в Восточной Балтике в открытой части в июне—июле и в прибрежной в июне 1976 г., по [83]

Таксон	Встречаемость, %	Средняя плотность, экз/м²	Средняя биомасса, г/м²
Открытая часть Балтики			
Priapuloidea	—	13	0,14
Halicryptus spinulosus	40,7	13	0,14
Priapulus caudatus	3,7	+	+
Polychaeta	—	49	0,05
Pygospio elegans	77,8	33	0,02
Harmothoe sarsy	51,9	12	0,01
Fabricia sabella	14,8	+	+
Scoloplos armiger	7,4	1	+
Terebellides stroemi	37	3	0,02
Oligochaeta	74,1	104	0,07
Crustacea	—	309	1,34
Pontoporeia affinis	51,9	123	0,16
Pontoporeia femorata	22,2	159	0,48
Gammarus spp.	11,1	+	+
Bathyporeia pilosa	7,4	18	0,04
Corophium volutator	3,7	+	+
Calliopius laeviusculus	3,7	+	+
Mesidotea entomon	48,1	4	0,60
Iaera albifrons	11,1	+	+
Mysidacea	7,4	3	0,06
Diastylis rathkei	7,4	2	+
Mollusca	—	61	19,32
Macoma baltica	81,5	56	18,86
Mytilus edulis	22,2	5	0,46
Mya arenaria	3,7	+	+
Итого		536	20,92
Прибрежная часть Балтики			
Spongia	1,5	+	+
Hydrozoa	—	+	+
Laomedea loveni	4,5	+	+
Turbellaria	3,0	+	+
Nematoda	65,1	+	+
Priapuloidea	—	7	0,01
Halicryptus spinulosus	6,1	7	0,01
Priapulus caudatus	1,5	+	+
Oligochaeta	71,2	269	0,12
Polychaeta	—	352	0,63
Nereis diversicolor	48,4	25	0,42
Harmothoe sarsy	30,3	5	0,02
Pygospio elegans	63,6	295	0,18
Streblospio shrubsoli	7,6	15	0,01
Fabricia sabella	28,8	6	+
Manajunkia aestuarina	10,6	6	+
Hirudinea	30,3	1,3	0,01
Bryozoa	15,0	+	+
Mollusca	—	671	46,26
Theodoxus fluviatilis	24,2	2	0,03
Hydrobia spp.	25,8	51	0,19
Macoma baltica	39,4	34	12,07
Mya arenaria	3,6	19	2,81
Cerastoderma lamarcki	9,1	2	0,58
Mytilus edulis	65,2	563	30,58
Crustacea	—	121	4,36
Balanus improvisus	37,9	21	3,20
Ostracoda	3,0	3	+
Bathyporeia pilosa	27,3	21	0,02
Pontoporeia affinis	6,1	37	0,10
Calliopius laeviusculus	1,5	+	+
Gammarus spp.	59,1	16	0,15
Corophium volutator	28,8	7	0,06
Mysidacea	9,1	3	+
Mesidotea entomon	10,6	2	0,81
Idotea spp.	12,1	+	+
Iaera albifrons	48,5	9	0,01
Crangon crangon	6,1	+	+
Diastylis rathkei	6,1	2	0,01
Insecta	—	—	—
Chironomidae	15,0	+	+
Arachnoidea	18,2	+	+
Итого		1433	51,39

Примечание. Знаком плюс («+») отмечено присутствие вида, если его средняя численность менее 1 экз/м², биомасса менее 0,01 г/м². См. также примечание к табл. 6.3.

Таблица 6.5

Средние биомасса и плотность населения зообентоса по разным типам грунта в сублиторали — верхнем горизонте литорали в Восточной Балтике, по [226]

Грунт	Биомасса, г/м²		Плотность населения, тыс. экз/м²	
	Центральная Балтика	Рижский залив	Центральная Балтика	Рижский залив
Каменистый	109,6	69,4	2,3	1,7
Каменисто-песчаный	152,8	111,8	2,8	1,7
Гравийный	11,4	14,8	1,3	1,4
Гравийно-песчаный	40,6	53,6	1,1	1,9
Крупный и средний песок	33,8	29,3	2,8	1,2
Мелкий песок	24,2	43,8	2,4	3,3
Глинистый песок	29,2	82,9	7,5	2,5
Глина и песчанистая глина	—	118,8	—	2,6
Илистый песок	71,5	70,2	8,5	3,7
Ил, песчанистый и глинистый ил	79,4	58,7	13,0	2,3

Примечание. То же, что и к табл. 6.3.

Таблица 6.6

Плотность населения и биомасса зообентоса в прибрежных районах Балтийского моря (глубина 3—20 м), по [83]

Район	Плотность населения, экз/м²	Биомасса, г/м²
Ирбен, Овишн	1185	59,4
Павилоста	93	2,9
Лиепая	1396	57,3
Бернати	1248	32,6
Папесциеме	1454	44,9
Швентой	1456	233,0
Паланга	1784	62,3
Юодкранте	2476	54,9
Нида	1316	24,9
Лесное	125	28,8
6-ка Ракитинская	322	39,5
Щукинский маяк	2988	25,9

Примечание. То же, что и к табл. 6.3.

Балтийском море зона до глубины 20 м является самой продуктивной, в Финском и Рижском заливе продуктивная зона расположена глубже [226].

Распределение биомассы по акватории моря показано на рис. 6.2—6,5 и в табл. 6.7. Наиболее продуктивными по бентосу районами в Южной Балтике являются Борнхольмский желоб, районы у юго-восточного побережья Швеции, банок Средней, Слупска и косы Хель; в Центральной Балтике — у западных побережий островов Сааремаа и Хийумаа, против Куршского залива и Лиепаи, в районе Аскё-Ландсорт, у островов Эланд и Готланд. В Рижском заливе наиболее высокие биомассы зообентоса наблюдаются в северо-западной части и в отдельных бухтах южного побережья о. Сааремаа; в Финском заливе — в отдельных эвтрофированных бухтах (см. табл. 6.7).

Общая площадь бентали, где донная фауна из-за неблагоприятного кислородного режима исчезла, по данным разных авторов составляет 40—70 тыс. км² [225, 512].

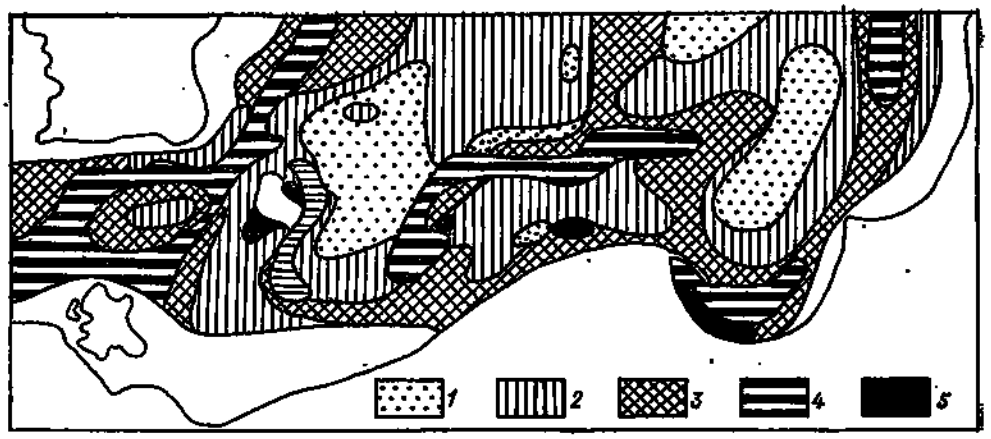


Рис. 6.2. Распределение биомассы (г/м²) зообентоса в Южной Балтике, по [512].
1) <1; *2*) 1—10; *3*) 10—30; *4*) 30—100; *5*) >100.

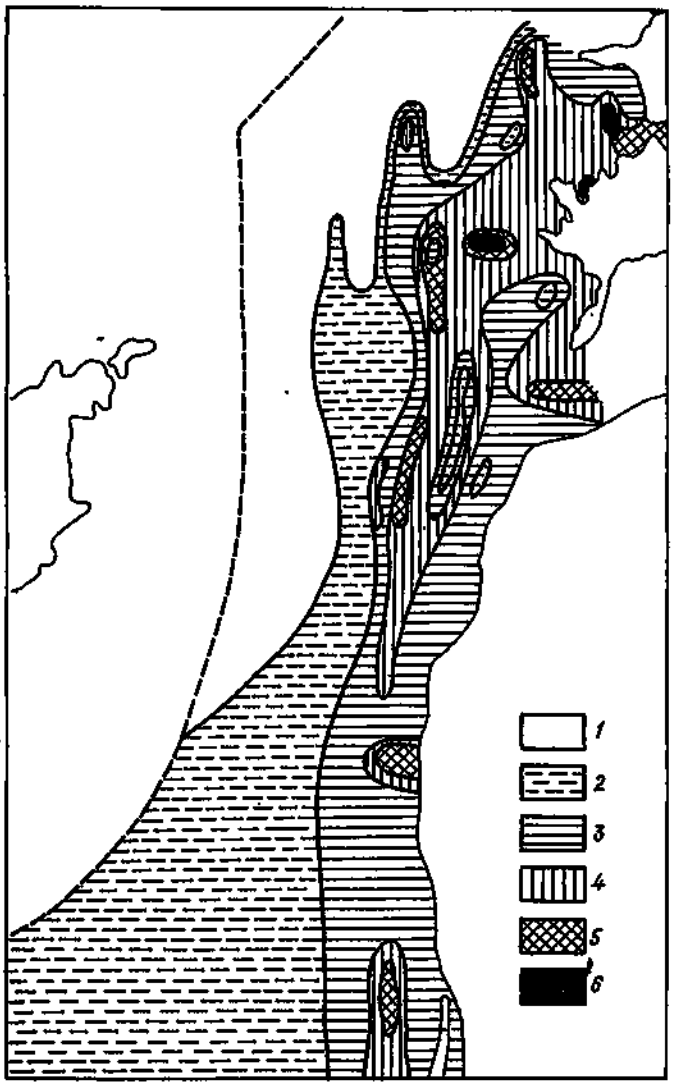


Рис. 6.3. Распределение биомассы (г/м²) зообентоса в восточной части Центральной Балтики, по [225].
1) 0; *2*) <10; *3*) 10—25; *4*) 25—50; *5*) 50—100; *6*) >100.

Таблица 6.7

Биомасса зообентоса в различных районах Балтийского моря

Район	Биомасса, г/м²	Источник
Южная Балтика	60,0	
Арконская ложбина	31,0	
Борнхольмский желоб	421,0	
Юго-восточное побережье Швеции	252,0	
б. Тромпер-Вик	85,0	[391]
банки Одер и Ренни	64,0	
Борнхольмская впадина	15,0	
Слупский желоб	36,0	
банки Слупска и коса Хель	149,0	
б-ка Средняя	291,0	
Южная часть Готландской котловины	7,0	
Центральная Балтика	25,0	
Восточная часть	22,0	
Клайпеда—Вентспилс	12,0	
Севернее Ирбенского пролива	34,0	[226]
У западного побережья островов Сааремаа и Хийумаа	280,0	
У Смоланда	53,0	
б-ка Хоборг	29,0	
Стокгольмский архипелаг	17,0	[226]
У островов Эланд и Готланд	70,0	[264]
Аске—Ландсорт	138,0	[238]
Гданьский залив	58,0	
Гданьская впадина	9,0	
Рижский залив	46,0	
Северо-восточная часть	86,0	
Северо-западная часть	42,0	
Южная часть	36,0	
Пярнуская бухта	73,0	
б. Курессаре	200,0	
б. Арью	12,0	
Финский залив	15,0	
Юго-западная часть	58,0	
Западная и средняя части (эстонские воды)	38,0	[226]
Северное побережье о. Хийумаа	34,0	
Нарвский залив	9,0	
Глубоководный желоб и его северные склоны	5,0	
Таллинский залив	165,0	
б. Мууга	30,0	
Пелинка	52,0	
Хельсинки	69,0	
Ловиса	29,0	
прол. Вяйнамери	73,0	

6.4. Сезонная и многолетняя динамика

Сезонная динамика зообентоса показана в табл. 6.8 и выражается в изменении численности, биомассы, структуры популяций и распределения. Она обусловлена особенностями годовых циклов

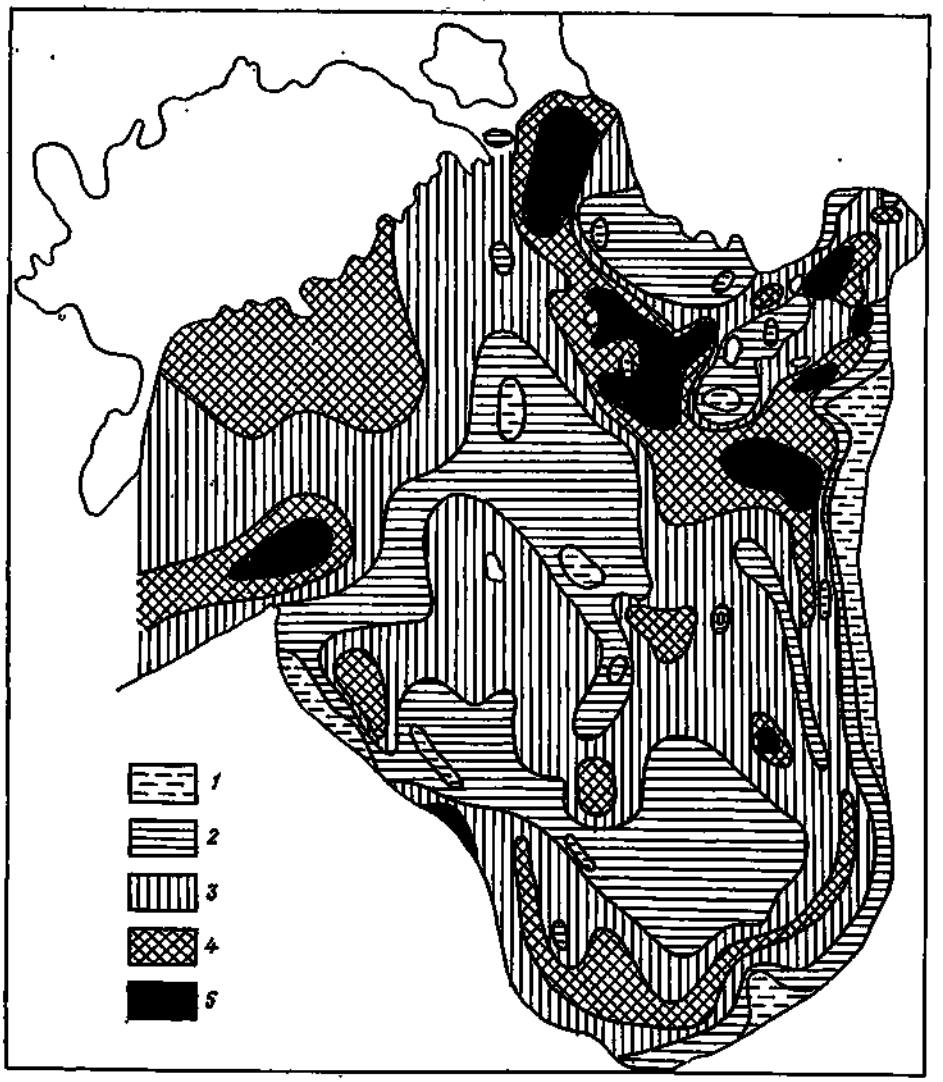


Рис. 6.4. Распределение биомассы (г/м²) зообентоса в Рижском заливе, по [226].
1) <10; *2*) 10—25; *3*) 25—50; *4*) 50—100; *5*) >100.

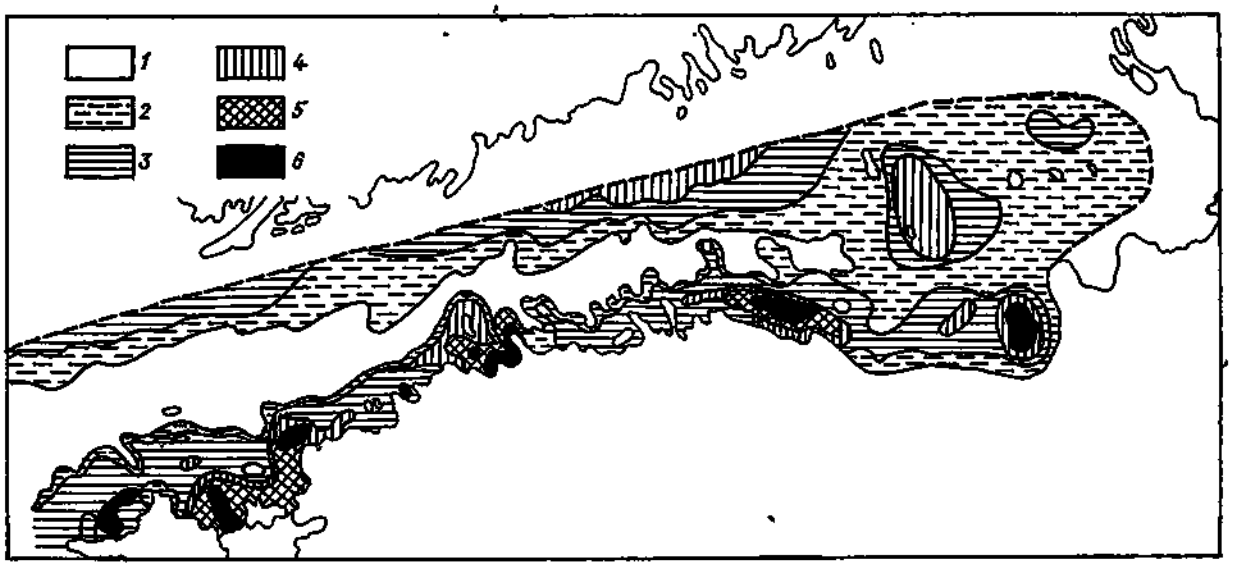


Рис. 6.5. Распределение биомассы (г/м²) зообентоса в Финском заливе, по [225].
1) 0; *2*) <10; *3*) 10—25; *4*) 25—50; *5*) 50—100; *6*) >100.

Таблица 6.8

Плотность населения и биомасса зообентоса в июле 1976 г. и январе 1977 г. в Балтийском море

Таксон	Плотность населения, экз/м²		Биомасса, г/м²	
	VII 1976 г.	I 1977 г.	VII 1976 г.	I 1977 г.
Harmothoe sarsy	10	4	0,016	0,070
Pygospio elegans	41	73	0,025	0,050
Halicryptus spinulosus	15	6	0,212	0,187
Oligochaeta	34	15	0,021	0,009
Macoma baltica	67	45	20,860	15,790
Pontoporeia affinis+ *P. femorata*	428	47	0,895	0,691
Mesidotea entomon	5	7	0,970	1,910
Прочие	9	7	0,267	0,271
Всего	609	204	23,266	18,878

Примечания: 1. Материал собран на 15 стандартных станциях на разрезах Клайпедском, Лиепайском, Павилостском, Вентспилском и Ирбенском в зоне глубин 16—75 м. Орудие лова — дночерпатель «Океан» площадью раскрытия 0,25 м². При промывке грунта использовано сито с размером ячей 0,4 мм.

2. В строку «Прочие» включены *Fabricia sabella, Nereis diversicolor, Terebellides stroemi, Priapulus caudatus, Nemertini, Mya arenaria, Mytilus edulis, Balanus improvisus, Gammarus spp., Diastylis rathkei.*

основных видов, выеданием организмов рыбами и беспозвоночными, а также сезонными миграциями.

Моллюски — *Macoma baltica, Mytilus edulis* — размножаются преимущественно в весенне-летний сезон. В июле популяция макомы на 30—40 % состоит из только что осевшей молоди длиной 1,0—1,5 мм, в январе ее количество не превышает 10 %. В летний сезон макома интенсивно выедается моллюскоядными рыбами [78]. В результате элиминации и ослабления размножения во вторую половину года его численность и биомасса к зиме сокращаются.

Pontoporeia affinis и *P. femorata* размножаются преимущественно зимой и весной. В июле популяция *P. affinis* более чем на 80 % состоит из молоди длиной 2—3 мм (популяция *P. femorata* состоит из двух групп особей: длиной 2—3 и 7—9 мм), яйценосные самки отсутствуют. Зимой количество мелких рачков сокращается, выделяются две группы длиной 3—6 и 7—10 мм (у *P. femorata* 5—7 и 9—14 мм соответственно), появляются яйценосные самки. Вследствие интенсивного выедания рыбами [78], естественной смертности, миграции части популяции в толщу воды количество понтопорей с июля по январь сокращается (см. табл. 6.8), при этом снижение биомассы за счет соматического роста рачков происходит в меньшей степени.

Mesidotea entomon размножается круглогодично с максимумом в летний сезон. Несмотря на значительное выедание рыбами и естественную смертность, ее количество к зиме возрастает.

Harmothoe sarsi и *Halicryptus spinulosus* размножаются зимой, *Pygospio elegans* — весной. Летом значительная часть их популяций состоит из молоди, а у хармотое взрослые особи летом вообще на грунте обнаружены не были, возможно, в это время они держались над грунтом, так как встречались в желудках не только донных, но и пелагических рыб. К зиме численность халикриптуса и хармотое снижалась, но биомасса у харматое за счет появления на грунте взрослых особей возрастала. Пигоспио в пище рыб обнаружен не был и его количество к зиме возрастало.

В результате общие биомасса и плотность населения зообентоса зимой были ниже, чем летом (см. табл. 6.8).

Количественное распределение донной фауны по сравнению с летом изменяется в связи с наличием сезонных миграций у многих эпибентических видов и особенностями выедания зообентоса в отдельных районах и зонах глубин. Расположение районов повышенной продуктивности (по зообентосу) остается в течение года постоянным, но на отдельных участках отмечается сокращение площадей высокой (более 50 г/м²) биомассы. Наблюдается тенденция к увеличению биомассы в относительно глубоководных районах и уменьшению — в мелководных. Так, повышенная биомасса макомы (более 50 г/м²) летом 1976 г. отмечалась на глубинах 30—70 м, а зимой 1977 г. — на глубинах 45—70 м, *Pontoporeia affinis* (более 0,9 г/м²) — на глубинах 35—50 и 36—65 м соответственно, *P. femorata* (более 1 г/м²) — на глубинах 50—60 и 40—65 м [83].

Более подробно изучена сезонная динамика эпифауны на примере Кильской бухты [261], где наивысшая численность организмов отмечена в марте—мае, минимальная — в сентябре (табл. 6.9).

В Балтийском море наблюдается четко выраженная тенденция многолетних изменений донной фауны, являющаяся результатом воздействия естественных биологических процессов и антропогенного влияния. Так, с 1965 по 1976 г. средняя биомасса донных животных в восточной части Центральной Балтики увеличилась на 1,4 г/м². Изменилось соотношение отдельных групп животных: значительно повысилась роль моллюсков — макомы и мидии (табл. 6.10).

Таблица 6.9

Сезонная динамика эпибентоса в Кильской бухте, по [261]

Характеристика	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
Средняя численность	3,58	2,97	3,00	2,38	2,20	2,53	2,85	2,35	2,38	2,84	3,40
Стандартное отклонение	0,88	0,90	0,74	0,35	0,60	0,48	0,69	0,30	0,46	0,63	0,85

Примечание. Материал собран эпибентической количественной сетью; указана численность животных на 100 м³ воды в придонном слое.

Таблица 6.10

Биомасса зообентоса в Восточной Балтике в 1965 и 1976 гг., по [88]

Группа животных	1965 г.	1976 г.
Черви	0,6	0,1
Моллюски	8,3	12,5
Ракообразные	2,8	0,5
Всего	11,7	16,1

Примечание. Приведены данные для района Вентспилс—Клайпеда в зоне глубины 21—166 м; за 1965 г. использованы данные А. А. Ярвекюльга [223].

Таблица 6.11

Максимальная глубина обитания основных видов зообентоса в Восточной Балтике в 1908—1976 гг., по [88]

Вид	1908 г.	1960 г.	1965 г.	1976 г.
Macoma baltica	90—100	85	88	80
Mytilus edulis	81—90	56	89	52
Pontoporeia affinis	210—230	73	100	58
Pontoporeia femorata	210—230	108	111	70
Mesidotea entomon	200	85	99	64
Scoloplos armiger	—	85	141	130—140

Примечание. Использованы данные авторов за 1976 г., А. А. Ярвекюльга [223] за 1965 г., А. Т. Шурина [215] за 1960 и 1908 гг.

Сокращение биомассы ракообразных произошло за счет видов понтопорей и мезидотеи, что могло быть вызвано ухудшением кислородного режима и повышением температуры воды, а сокращение количества червей — в основном за счет сколоплоса, основные места обитания которого в указанном году оказались в пределах заморной зоны.

Снижение содержания кислорода и участившиеся заморы в глубоководной зоне способствовали повышению нижней границы обитания видов (табл. 6.11).

Расширились площади зон, лишенных донной фауны. Согласно Л. Жмудзиньскому [510], в Центральной Балтике такая зона в 1959—1961 гг. занимала площадь более 20 тыс. км², а к 1975 г. она увеличилась до 70 тыс. км². По данным А. А. Ярвекюльга [226], ускоренное эвтрофирование наблюдается в прибрежных водах, куда поступают нетоксические органические загрязнения. Средняя биомасса зообентоса в ряде бухт эстонского побережья за последние 12—16 лет увеличилась в 1,4—2,1 раза, однако в гипертрофных водах (Кяйнаская бухта) она снизилась почти вдвое.

Другим характерным для современной Балтики процессом является океанизация моря, начавшаяся с 30-х годов нашего столетия. Отражением влияния повышения солености вод является возрастание роли морских видов: появление в юго-западных районах вселенцев из Северного моря, продвижение аборигенов морского происхождения на северо-восток. К североморским вселенцам в Балтийском море среди донных организмов можно отнести многощетинковых червей *Nephtys ciliata, Scalibregma inflatum, Trochochaeta miltisetosa, Phylodoce laminosa*, моллюсков *Ciprina islandica* и *Retusa obtusa* [512].

Таковы тенденции изменений донной фауны Балтийского моря за последние десятилетия.

Таблица 6.12

Отношение продуктивности к биомассе (коэффициент П/Б) основных видов и групп организмов зообентоса в Балтийском море

Вид, группа видов	Коэффициент П/Б	Источник
Mytilus edulis	0,9	[238]
Macoma baltica	0,4	[429]
Mya arenaria	0,5	[411]
Pontoporeia femorata	1,4	[429]
Pontoporeia affinis	1,9	[263]
Mesidotea entomon	1,0	[238]
Polychaeta	2,9	[141]
Harmothoe sarsi	2,8	[460]
Nereis diversicolor	3,0	[238]
Зообентос:		
Кильской бухты	0,9	[263]
Грайфсвальдер-Болден	0,24	[241]
района Аске	1,2	[238]
Южной Балтики	0,85	[141]

Таблица 6.13

Поток энергии (10^6 т С в год) в сообществе донных животных в Балтийском море, по [290]

Показатель	Ботническое море (S=79,26)	Финский залив (S=29,50)	Рижский залив (S=17,91)	Собственно Балтика (S=209,55)
Моллюски (Bivalvia) на глубинах менее 25 м				
Биомасса	0,21	0,10	0,03	0,46
Продукция	0,17	0,08	0,02	0,73
Траты на дыхание	0,84	0,40	0,12	1,84
Моллюски (Bivalvia) на глубинах более 25 м				
Биомасса	0,00	0,07	0,02	0,27
Продукция	0,00	0,04	0,01	0,14
Траты на дыхание	0,00	0,14	0,04	0,54
Остальная макрофауна				
Биомасса	0,17	0,04	0,01	0,18
Продукция	0,30	0,07	0,02	0,32
Траты на дыхание	0,91	0,22	0,05	0,97

Примечание. S — площадь водоема, км².

6.5. Продукционные процессы

Продукционные процессы зообентоса в Балтийском море изучены недостаточно. Данные о коэффициентах удельной продукции (П/Б коэффициентах) основных видов представлены в табл. 6.12.

Наиболее высокие значения П/Б коэффициентов отмечены у полихет, наименьшие — у моллюсков.

В течение года наибольшее количество органического вещества продуцируется зообентосом в собственно Балтике — $1{,}19 \cdot 10^6$ т С, в остальных районах оно значительно меньше: в Ботническом море $0{,}47 \cdot 10^6$ т С, Финском заливе $0{,}19 \cdot 10^6$ т С, Рижском — $0{,}06 \cdot 10^6$ т С [290].

Основной поток энергии проходит через двухстворчатых моллюсков (табл. 6.13).

7. ИХТИОФАУНА И ЕЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Формирование ихтиофауны Балтийского моря происходило в позднe- и послеледниковое время на фоне резких смен гидрологического режима этого водоема. Все массовые виды рыб современной Балтики имеют в основном чисто морское или пресноводное происхождение. В Балтийском море живут представители реликтовой фауны Северо-Ледникового океана (например, четырехрогий бычок семейства подкаменщиков), связанные по своему происхождению с одной из отдаленных фаз развития моря. Доминирующее положение в ихтиофауне Балтийского моря составляют представители атлантической фауны (сельдь, шпрот, треска, камбала), приспособившиеся жить в опресненных водах. Вместе с тем опреснение воды Балтики закрывает доступ в это море тем многочисленным видам морских рыб, которые не способны освоиться с условиями новой среды.

В настоящее время в Балтийском море (без учета Датских проливов) обитает свыше 70 видов рыб, относящихся к 29 семействам (табл. 7.1). Всех рыб по приуроченности к определенному месту обитания разделяют на 4 биоэкологические группы: морские, пресноводные, солоноватоводные и проходные. К группе солоноватоводных рыб относят также полупроходных рыб. Наиболее многочисленными представителями ихтиофауны являются морские, пресноводные и солоноватоводные виды рыб [184].

Количество морских видов рыб в Балтийском море по сравнению с Северным невелико, причем количество их по мере продвижения с запада на восток заметно уменьшается: в прол. Скагеррак встречается более 100 морских видов рыб, в прол. Каттегат — 75, в проливах Большом и Малом Бельте — 55, в Борнхольмском бассейне — 27, в Финском и Ботническом заливах — 17—20. Морские рыбы, живущие и размножающиеся в течение всего своего жизненного цикла в соленой воде, подразделяются на пелагических, населяющих толщу воды (например, сельдь и шпрот), и донных, живущих у дна (например, треска и камбала).

Пресноводных и солоноватоводных видов рыб, заселяющих наиболее опресненные районы моря — прибрежные воды, заливы и бухты, эстуарии рек, насчитывается около 40. В группе пресноводно-солоноватоводных рыб можно выделить типичных представителей пресноводной ихтиофауны, например щука и плотва, и полупроходных рыб, заходящих для размножения в низовья рек, а кормящихся в солоноватоводной воде, например рыбец, ряпушка, морской сиг, корюшка и др.

Количество проходных видов немногочисленно, например ценных промысловых рыб насчитывается только 3 вида — лосось, кумжа (для размножения заходят из моря в реку) и угорь (для размножения уходит из пресной воды в морскую воду). Условно еще к ценным проходным «рыбам» можно отнести речную миногу (фактически относящуюся к классу круглоротых), которая для размножения также заходит из моря в реку.

Промысловое значение в большей или меньшей степени на Балтике имеют около 45 видов рыб, используемых как для пищевых, так и непищевых целей (см. табл. 7.1). Основу уловов (97 %) составляют морские виды рыб. На долю пресноводно-солоноватоводных видов рыб падает около 2 %, а на долю проходных — менее 1 % общего вылова рыб в Балтийском море. Балтика благодаря своему выгодному географическому положению и особенностям природных условий играет важную роль в рыбопромысловом потенциале нашей страны и других государств, расположенных на его берегах. Общий вылов рыб в Балтийском море в последние годы составляет около 900 тыс. т в год, причем на долю СССР падает более чем 1/4 улова (табл. 7.2).

Основными объектами промысла на Балтике является сельдь, шпрот и треска, доля которых в общем вылове в настоящее время составляет 85—90 % (табл. 7.3).

Характерной чертой последних 30—40 лет на Балтике является резкое сокращение запасов и уловов ценных проходных и полупроходных рыб, заходящих на нерест в реку. Это обусловлено главным образом сокращением естественного ареала их размножения, т. е. произошла потеря нерестилищ и мест нагула для молоди и взрослых рыб вследствие гидростроительства на реках, загрязнения речных и морских вод промышленными, бытовыми и сельскохозяйственными стоками. Отрицательное влияние на воспроизводство этих рыб оказали и такие факторы, как интенсификация рыболовства в прибрежной зоне моря, широкое применение тралового, сетного промысла и других орудий лова (включая и любительский лов), несовершенная организация охраны рыб и т. п. В условиях зарегулирования стока рек и изменившегося гидрологического и гидрохимического режима рек и прибрежной зоны моря восстановление и увеличение запасов ряда ценных проходных и полупроходных рыб, например лосося, кумжи, рыбца, морского сига и других, возможно лишь путем искусственного воспроизводства, т. е. путем выпуска в море рыб на жизнестойких стадиях развития.

В целом запасы и уловы промысловых рыб Балтийского моря подвержены значительным годовым и многолетним колебаниям, обусловленным изменчивостью природных явлений. В частности, для Балтики характерны климатообусловленные крупномасштабные долговременные (вековые) изменения режима моря, т. е. поочередная сменяемость стадий опреснения и осолонения моря (продолжительность каждой 40—50 лет), которые в свою очередь обусловлены эпохальными преобразованиями атмосферных процессов и океанической циркуляции в Северо-Восточной Атлантике.

Рыбные ресурсы Балтийского моря в настоящее время всеми прибалтийскими странами используются очень интенсивно и по оценке многих ведущих ученых-ихтиологов общий вылов рыб приблизился к максимально допустимому изъятию. Промыслом освоены практически все виды рыб, представляющих интерес для хозяйства, и, по существу, на Балтике нет резерва как такового по освоению новых — свободных или мало освоенных — объектов

Таблица 7.1

Видовой состав рыб Балтийского моря (без учета Датских проливов)

Семейство и виды рыб		Промысловое значение («+») для пищевых и непищевых целей
Миноговые	Petromyzonidae	
Морская минога	*Petromyzon marinus L.*	
Речная минога	*Lampetra fluviatilis L.*	+
Осетровые	Acipenseridae	
Балтийский осетр	*Acipenser sturio L.*	
Сельдевые	Clupeidae	
Балтийская сельдь (салака)	*Clupea harengus membras L.*	+
Финта	*Alosa follax Lacep.*	+
Алоза	*Alosa alosa L.*	+
Шпрот (килька)	*Sprattus sprattus balticus (Schneider)*	+
Анчоусовые	Engraulidae	
Анчоус	*Engraulis encrasichdus L.*	+
Лососевые	Salmonidae	
Лосось	*Salmo salar L.*	+
Кумжа	*Salmo trutta L.*	+
Радужная форель	*Salmo irideus*	+
Ряпушка	*Coregonus albula*	+
Морской сиг	*Coregonus lavaretus lavaretus L.*	+
Корюшковые	Osmeridae	
Корюшка	*Osmerus eperlanus L.*	+
Снеток	*Osmerus eperlanus morfa spirinchus Pallas*	+
Щуковые	Esocidae	
Щука	*Esox luccius L.*	+
Карповые	Cyprinidae	
Плотва	*Rutilus rutilus L.*	+
Елец	*Leuciscus leuciscus L.*	
Голавль	*Leuciscus cephalus L.*	
Язь	*Leuciscus idus L.*	+
Гольян	*Phoxinus phoxinus L.*	
Красноперка	*Scardinius erythrophthalmus*	
Линь	*Tinca tinca L.*	
Жерех	*Aspius aspius L.*	+
Пескарь	*Gobio gobio L.*	
Уклея	*Alburnus alburnus L.*	+
Густера	*Blicca bjoerkna L.*	+
Лещ	*Abramis brama L.*	+
Синец	*Abramis ballaris L.*	
Сырть, рыбец (вимба)	*Vimba vimba L.*	+
Чехонь	*Pelecus cultratus L.*	+
Карась	*Carassius carassius L.*	
Вьюновые	Cobitidae	
Голец	*Nemachilus barbatulus L.*	
Шиповка	*Cobitis toenia L.*	
Сомовые	Siluridae	
Сом	*Silurus glanis L.*	
Морские угри	Congridae	
Морской угорь	*Conger conger L.*	
Речные угри	Anguillidae	
Речной угорь	*Anguilla anguilla L.*	+
Саргановые	Belonidae	
Сарган (морская щука)	*Belone belone L.*	+
Тресковые	Gadidae	
Налим	*Lota lota L.*	+
Треска	*Gadus morrhua callaris L.*	+
Пикша	*Gadus aeglefinus L.*	
Сайда	*Pollachius virens L.*	
Морской налим	*Enchelyopus cimbrius L.*	
Колюшковые	Gasterosteidae	+
Малая колюшка	*Pungitius pungitius L.*	
Большая колюшка	*Gasterosteus aculeatus L.*	+
Морская колюшка	*Spinachia spinachia L.*	+
Морские иглы	Syngnathidae	
Морская игла	*Syngnathus typhle L.*	
Змеевидная морская игла	*Nerophis ophidion L.*	+
Кефалевые	Mugilidae	
Кефаль	*Mugil capito Cuv.*	
Окуневые	Percidae	
Судак	*Lucioperca lucioperca L.*	+
Окунь	*Perca fluviatilis L.*	+
Ерш	*Acerina cernua L.*	+
Бельдюга	*Zoarces viviparus L.*	+
Зубатковые	Anarchichadidae	
Полосатая зубатка	*Anarchiachas lupus L.*	
Маслюки	Pholidae	
Маслюки	*Pholis gunellus L.*	
Люмпенусы	Lumpenidae	
Люмпенус	*Lumpenus lampetriformis Walb.*	
Песчанковые	Ammoditidae	
Большая песчанка	*Ammodytes lanceolatus L.*	+
Малая песчанка	*Ammodytes tobianus L.*	+
Скумбриевые	Scombridae	
Скумбрия	*Scomber scombrus L.*	
Меч-рыба	Xiphidae	
Меч-рыба	*Xiphias gladius L.*	
Бычковые	Gobiidae	
Бычок черно-пятнистый	*Gobisculus flavescens(Fabricius)*	+
Бычок малый	*Pamatoschistus minutus(Pollas)*	+
Бычок черный	*Gobius nigerh L.*	
Бычок песчаный	*Pamatoschistus microps (Kroyer)*	+
Подкаменщики	Cottidae	
Керчак	*Mioxocephalus scorpius L.*	+
Четырехрогий бычок	*Mioxocephalus quadricornis L.*	+
Подкаменщик	*Cottus gobio L.*	
Пинагоровые	Cyclopteridae	
Пинагор	*Cyclopterus lumpus L.*	
Липарис	*Liparis liparis L.*	+
Ромбовые	Rhombidae	
Тюрбо	*Rhombus maximus L.*	+
Камбаловые	Pleuronectidae	
Лиманда	*Limanda limanda L.*	+
Морская камбала	*Platessa platessa L.*	+
Речная камбала	*Pleuronectes flesus L.*	+

промысла. Поэтому сегодня не может идти речь об интенсификации рыболовства на Балтике, наоборот, все усилия ученых и практиков прибалтийских стран, связанных с решением рыбохозяйственных проблем, должны быть направлены на сохранение и стабилизацию имеющихся запасов рыб, поиск возможностей повышения рыбопродуктивности моря, усиление охраны вод и рыбных запасов, повышение эффективности использования выловленной рыбы.

Осуществленные в 70-х годах меры по регулированию рыболовства и защите морской среды Балтийского моря (в рамках Гданьской конвенции о рыболовстве и сохранении живых ресурсов в Бал-

Таблица 7.2

Вылов рыб (тыс. т) в Балтийском море (по данным Bull. Statist. ICES, 1986 г.)

Страна	Год			
	1960	1970	1980	1986
ГДР	40	71	72	63
Дания	21	69	113	134
ПНР	73	147	222	167
СССР	179	298	297	223
Финляндия	41	73	111	112
ФРГ	22	13	31	30
Швеция	56	57	130	105
Всего	432	728	979	834

Таблица 7.3

Видовой состав уловов рыб (тыс. т) в Балтийском море (по данным Bull. Statist. ICES, 1986 г.)

Вид рыб	Год			
	1960	1970	1980	1986
Сельдь (салака)	169	312	465	410
Треска	162	192	387	267
Шпрот (килька)	39	153	58	78
Камбала (речная+морская)	10	12	12	11
Корюшка	6	6	3	4
Лосось атлантический	3	3	2	4
Угорь речной	4	3	2	1
Пресноводные виды	20	21	26	28
Прочие рыбы	19	26	24	31
Всего	432	728	979	834

тийском море и Бельтах и Хельсинкской конвенции по защите морской среды района Балтийского моря) содействовали упорядочению отечественного и международного рыболовства и охраны вод в этом водоеме. С конца 1973 г. все вопросы рыболовства регулируются Гданьской конвенцией через постоянно действующую Международную комиссию по рыболовству в Балтийском море (ИБФК). Важную роль в упорядочении и рационализации рыболовства в экономической зоне Балтийского моря сыграло создание в 1972 г. общебассейнового консультативно-координационного органа — Балтийского рыбохозяйственного совета (БРС). Совет, в частности, занимается подготовкой согласованных предложений и мероприятий по установлению объемов и лимитов вылова рыбы, распределению их между рыбохозяйственными организациями государств и областей Прибалтики по районам моря, видам рыб и сезонам с учетом рекомендаций Балтийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства (БалтНИИРХ).

Далее будут рассмотрены важнейшие взаимосвязи основных промысловых рыб Балтики с окружающим их органическим и неорганическим миром, освещены основные закономерности формирования запасов рыб, показано, что отношения рыб с отдельными элементами абиотической и биотической среды не существуют изолированно, а они находятся в единой неразрывной системе связей. Известно, что рыбы по своим биологическим особенностям, физиологическому состоянию организма, по химическому составу тканей и активности присущих им ферментов, характеру и интенсивности питания, поведения, распределения, плотности скопления, активности миграции и другим биоэкологическим и технологическим параметрам значительно подвержены сезонным и годовым изменениям в зависимости от гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов моря.

7.1. Сельдь

7.1.1. Краткая история исследований

Знания о поведении исключительно важного объекта лова — балтийской сельди — накопились у рыбаков уже с давних времен. К. Линней признал балтийскую сельдь (*Clupea harengus varietas membras L.*) разновидностью атлантической сельди. Динамику уловов балтийских сельдей исследовал К. Э. Бер [18]. Склонность сельди к формированию отдельных группировок в разных частях Балтийского моря была известна уже давно. Эти группировки изучали Нилссон и др. в 1832—1855 гг. (цит. по [314]).

В 1870-х годах изучена экология размножения — ранние стадии развития сельдей в Западной Балтике [358, 359, 392].

В начале XX в. появилась сводка Шнайдера [465], содержащая важные результаты изучения динамики уловов балтийских сельдей. В 1920—1930 гг. продолжалось исследование группировок сельди в Балтийском море от западной ее части до прол. Скагеррак и у побережья Швеции и в Финском заливе. В 1940-е годы стали появляться данные по структуре уловов и численности пополнения, например работы Кэндлера и Майера [343, 396 и др.] по запасам и пополнению сельди в Южной Балтике и влиянию на запасы тралового промысла.

Систематические ихтиологические, гидробиологические и океанологические исследования с целью организации рационального использования рыбных запасов были начаты после Великой Отечественной войны в Северной (подрайон 29), Восточной (подрайон 28.1—5) и Юго-Восточной Балтике (подрайон 26) Советским Союзом. Были созданы Эстонское, Латвийское отделения ВНИРО (соответственно в 1944 и 1945 гг.) и АтлантНИРО. Активно участвовали в исследованиях ученые ВНИРО. Под руководством известных специалистов Т. Ф. Дементьевой, Н. А. Дмитриева, П. Г. Борисова, Л. А. Раннак, М. Н. Лишева и других советскими учеными был собран обширный материал по структуре и колебанию запасов, морфологии и биологии балтийских сельдей. Этот материал послужил основой для составления оценок состояния запасов рыб и рекомендаций по их использованию уже начиная с конца 1940-х годов. В основной период сбора фактов по сельди Северной, Восточной и Юго-Восточной Балтики (1950—1960-е годы), исследования проводили из советских ученых К. А. Алтухов [1], К. Я. Батальянц [17], Э. П. Битюков [26], Т. Ф. Дементьева [54], Л. В. Лисивненко [101, 102], М. Н. Лишев [103, 107], И. И. Николаев [125—134], Л. А. Раннак [162—165], А. В. Селецкая [174—176] и другие, из польских — Попель [442], Попель и Стрижевска [443] и другие. По сельдям других районов Балтики в упомянутый период появились отдельные работы по мечению, нересту и

численности личинок в датских водах [334], плодовитости [345], сельдям Ботнического залива [294], миграциям сельдей шведского побережья [431] и другие, но соответствующие комплексные исследования начались позже.

Значительный скачок в развитии знаний по балтийским сельдям начался с середины 1970-х годов и длится до настоящего времени. Он непосредственно связан с повышением интереса прибалтийских стран к запасам балтийских рыб. В связи с сокращением запасов наиболее ценных видов рыб в Мировом океане, в особенности сельдей, давление промысла на их запасы к 70-м годам значительно возросло. Для избежания перелова балтийских сельдей и других рыб было организовано сотрудничество между прибалтийскими странами в определении состояния запасов и регулировании промысла. В этой деятельности на первый план выдвигались работы по обобщению результатов проведенных исследований. Практически все популяции сельди были охвачены программами сбора материала для оценки состояния запасов. Общей чертой исследований по балтийским сельдям в этот период является их явная прикладная направленность — они проводились главным образом для организации или улучшения управления запасами.

7.1.2. Биология

Систематическая принадлежность и внутривидовая дифференциация

По происхождению балтийских сельдей *(Clupea harengus membras L.)* связывают с атлантическими *(Clupea harengus harengus L.)* [17, 173, 418]. В настоящее время Балтийское море заселено как весенне-нерестующими, так и осенне-нерестующими сельдями. Принципиальные различия этих сельдей выявляются в следующих относительно константных признаках:

— как атлантические, так и балтийские весенние сельди нерестуют при более низких температурах, а балтийские весенние сельди и при более низкой солености, чем осенние [438, 501 и др.]. Исключением в этом отношении являются балтийские весенние сельди залива, которые нерестуют при относительно высоких температурах;

— у весенних сельдей личиночное развитие в условиях относительно более высокой и быстро возрастающей температуры происходит быстрее и метаморфоз наступает при меньшей длине тела, чем у осенних сельдей.

Весенне-нерестующие и осенне-нерестующие сельди образуют в Балтийском море самостоятельные группировки, которые практически не смешиваются, поскольку их гаметы созревают в разные периоды. Следовательно, эти сельди различаются на уровне видов-двойников [17, 26, 256 и др.]. Однако поскольку в направлении от Северо-Восточной Атлантики к Балтийскому морю между соседними группировками весенней (или осенней) сельди не существует резких биологических различий, которые позволили бы провести между ними четкую границу, то балтийскую весеннюю (или осеннюю) сельдь необходимо рассматривать в качестве подразделения (подвида) соответственно весеннего или осеннего вида-двойника атлантической сельди.

Весенняя сельдь, как более арктическая, в общем доминирует в северных районах Балтики. Численность осенней сельди выше в южной части моря.

Подобно весенне- и осенне-нерестующим атлантическим сельдям одного и того же или соседних районов весенняя и осенняя балтийские сельди также различаются между собой по целому ряду морфометрических и некоторых генетических признаков. Весеннюю и осеннюю сельдей практически полностью можно различить по структуре их отолитов [146, 167 и др.].

Как весенне-, так и осенне-нерестующие балтийские сельди состоят из ряда группировок — популяций и субпопуляций. Они возникли, вероятно, в результате повторного заселения бассейна Балтийского моря сельдями в течение послеледникового периода и адаптации иммигрантов к условиям среды в разных частях моря. Различия в условиях среды в ареалах локальных популяций вызвали возникновение между ними не только биологических (рост, питание, миграции, распределение, половые циклы и т. д.), но и морфометрических различий, а также разную динамику численности. Имеются также некоторые биохимические и серологические доказательства различий локальных популяций [111 и др.].

У весенней сельди, нерестующей ближе к берегу, количество локальных популяций больше, чем у осенней. В качестве самовоспроизводящих популяций можно рассмотреть следующие группировки: весенняя сельдь Ботнического залива, Ботнического моря, Финского залива, Рижского залива, открытой части Северо-Восточной Балтики, Восточной Балтики, прибрежная сельдь Южной Балтики, рюгенская сельдь Западной Балтики и Бельтов, восточного побережья Швеции, района о. Готланд; осенняя сельдь Ботнического залива, Финского залива, Рижского залива, открытой части Восточной и Северо-Восточной Балтики, Южной и Западной Балтики.

Популяции как весенней, так и осенней сельди можно делить на морские и сельди заливов (фиордовые). Морские сельди нагуливаются и зимуют в открытом море. Обычно зимовка и нерест отдельных популяций морских сельдей приурочены к определенным подрайонам моря, но в период нагула они могут совершать миграции и в другие его подрайоны и смешиваются между собой. Сельди же заливов в основном не выходят из родного залива [142, 431 и др.], хотя морская сельдь в заливы на нерест частично заходит, поэтому районы и периоды нереста морской сельди и сельди заливов того же вида-двойника частично перекрываются и они в зоне контакта на нерестилищах в некоторой степени смешиваются. Основную часть особей отдельных популяций морских сельдей и сельдей заливов можно распознавать по структуре их отолитов.

Описание особенностей и распределения отдельных популяций балтийских сельдей, обитающих в основном в бывшей советской рыболовной зоне Балтики, представлены в работах Э. А. Оявеера и др. [167], Э. А. Оявеера, Б. К. Евтюховой, А. К. Наглиса [151 и др.] и на рис. 7.1 и 7.2.

Структура популяций, рост, половое созревание

Эти и далее другие показатели рассматриваются для сельдей по подрайонам бывшей советской рыболовной зоны Балтики, в которых в основные

периоды жизненного цикла держатся ее отдельные популяции: подрайон 32 (Финский залив), подрайон 29 (Северная Балтика), подрайон 28.1-4 (Восточная Балтика), подрайон 28.5 (Рижский залив), подрайон 25.1-3 (Юго-Восточная Балтика), подрайон 26.4 (Вислинский залив).

Размерный состав уловов сельди значительно колеблется в зависимости от подрайона промысла: чем севернее расположен подрайон, тем меньших размеров встречается сельдь; особенно мелкая она в Рижском и Финском заливах (рис. 7.3).

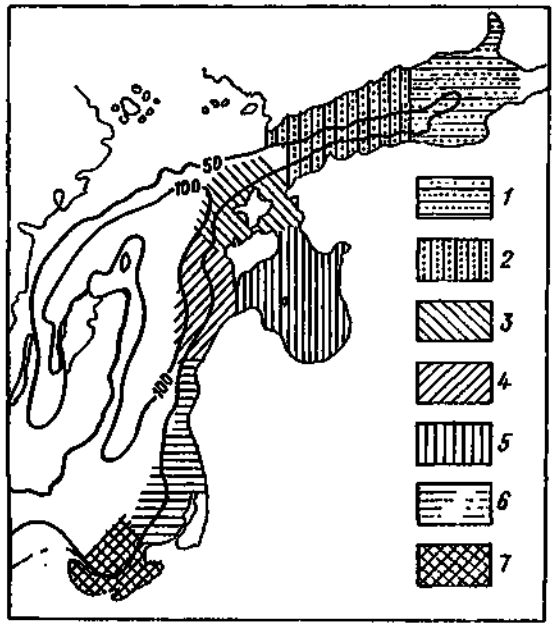


Рис. 7.1. Популяции весенней сельди восточного побережья Балтийского моря.

1 — популяция восточной части Финского залива; *2* — западной части Финского залива; *3* — района о. Хийумаа; *4* — района о. Сааремаа—Вентспилс; *5* — Рижского залива; *6* — района Лиепая—Клайпеда; *7* — Гданьской бухты.

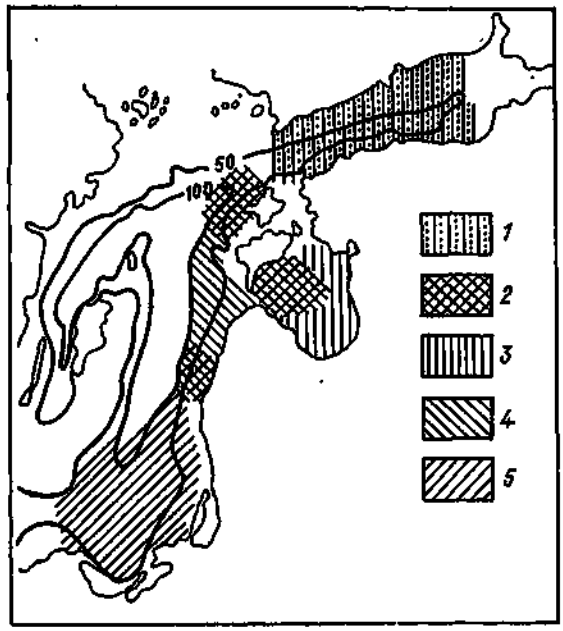


Рис. 7.2. Популяции осенней сельди восточного побережья Балтийского моря.

1 — популяция Финского залива; *2* — района о. Хийумаа; *3* — Рижского залива; *4* — открытого моря Северо-Восточной Балтики; *5* — Юго-Восточной Балтики.

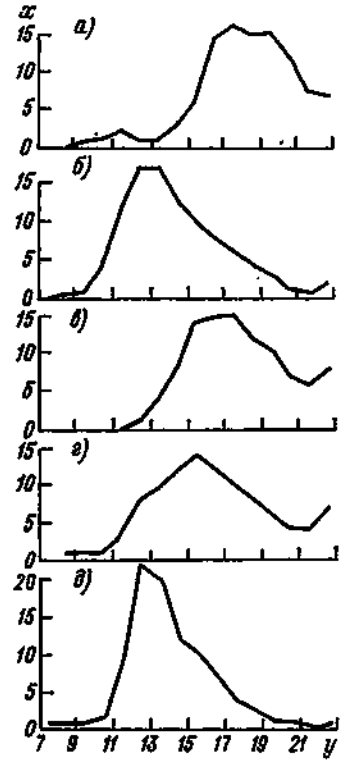


Рис. 7.3. Размерный состав сельди в промысловых траловых уловах в среднем за 1982—1984 гг. в подрайонах 26.1—3 (*а*), 28.5 (*б*), 28.1—4 (*в*), 29 (*г*), 32 (*д*).

x — количество рыб по длине, % от общей численности в уловах; *y* — длина по Смитту, см.

Продолжительность жизни популяций сельди в Балтийском море в общем увеличивается с юга на север. Наиболее старые (до 19 лет) особи встречаются в Северной Балтике. Промысловое значение сельдь имеет в зависимости от расположения ареала популяций до 8—10 лет, но основную массу в уловах составляет рыба в открытой Балтике в возрасте 2—4 года, в Рижском и Финском заливах — 1—3 года (табл. 7.4). Средние возраст и длина сельди в промысловом стаде меняются как по подрайонам моря, так и по годам в конкретном подрайоне. Так, в одни и те же периоды лет наблюдается закономерное их уменьшение в направлении Восточная Балтика—Северная Балтика—Финский залив, что обусловлено особенностями роста и созревания рыб. В тех же подрайонах средние возраст и длина сельди в промысловом стаде увеличились с 1970 по 1981 г. в связи со слабым пополнением запаса младшими возрастными группами неурожайных поколений (табл. 7.5). В 1982—1984 гг., когда запас сельди начал пополняться сравнительно урожайными поколениями, в этих подрайонах наблюдается омоложение промыслового стада сельди и соответственно снижение средних возраста и длины сельди в уловах (см. табл. 7.5).

В одни и те же периоды лет наблюдается закономерное увеличение средних массы и длины одновозрастной сельди в направлении с севера на юг Балтики (см. табл. 7.5). Это объясняется соответствующим увеличением темпа роста рыб в том же направлении, о чем можно судить по средним го-

Таблица 7.4

Возрастной состав (% по числу штук), средние длина по Смитту (см) и масса (г) одновозрастной сельди, половозрелость (%) в среднем за 1970—1984 гг. (подрайон 26.1—3 за 1982—1984 гг.) в промысловых траловых уловах

Показатель	Подрайон	Возраст, лет										
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Возрастной состав	32	0,9	15,0	32,3	20,3	13,3	6,7	4,3	2,9	1,6	1,4	1,3
	29	0,4	10,2	27,9	23,6	16,0	7,9	4,8	3,4	2,5	1,7	1,6
	28.1—4	—	1,2	17,3	27,8	20,2	13,0	7,7	5,9	3,2	1,9	1,8
	28.5	0,7	19,2	35,0	23,0	11,8	5,2	2,8	1,1	0,9	0,2	0,1
	26.1—3	—	7,1	30,8	36,7	21,4	2,8	0,8	0,4	0,0	—	—
Средняя длина	32	11,8	14,2	15,4	16,3	16,9	17,5	17,7	18,1	—	—	—
	29	12,5	15,2	16,9	18,1	19,0	19,7	20,5	21,0	—	—	—
	28.1—4	13,4	15,4	16,8	17,9	18,6	19,4	19,9	20,4	—	—	—
	28.5	11,1	12,3	11,3	15,5	16,9	16,9	17,4	18,6	—	—	—
	26.1—3	—	14,1	17,4	20,1	21,7	22,6	22,7	24,2	—	—	—
Средняя масса	32	13,8	22,2	29,2	34,8	38,3	44,3	44,2	45,0	—	—	—
	29	16,4	28,4	37,6	51,2	56,3	64,0	71,3	77,5	—	—	—
	28.1—4	22,2	33,3	44,5	53,7	62,0	70,5	75,0	83,4	—	—	—
	28.5	12,6	19,0	25,5	31,9	36,6	42,3	47,5	56,3	—	—	—
	26.1—3	16,4	39,1	74,7	91,1	114,0	125,8	126,5	—	—	—	—
Половозрелость	32	0	0	60	80	100	100	100	100	—	—	—
	29	0	0	60	85	95	100	100	100	—	—	—
	28.1—4	0	0	60	85	95	100	100	100	—	—	—
	28.5	0	0	93	98	98	100	100	100	—	—	—
	26.1—3	0	0	90	100	100	100	100	100	—	—	—

Таблица 7.5

Средние биологические показатели сельди в промысловых траловых уловах по подрайонам Балтики по периодам лет

Подрайон	Годы	Возраст, лет	Длина по Смитту, см	Коэффициент cv длины	Численность поколений 0+ и 1+, %	Улов всеми странами, тыс. т	Масса (г) при возрасте сельди, лет		Длина по Смитту (см) при возрасте сельди, лет	
							1—3	4—6	1—3	4—6
Финский залив	1970—1973	2,9	13,0	12,8	129	41	19,2	30,3	12,4	14,7
	1974—1977	3,7	14,5	14,4	96	47	21,2	33,2	13,4	15,9
	1978—1981	3,8	15,3	16,5	78	47	23,8	41,9	14,5	17,7
	1982—1984	2,6	14,2	17,6	83	48	22,0	45,7	13,7	18,0
Северная Балтика	1970—1973	3,4	14,6	4,9	110	20	24,8	51,7	13,1	16,7
	1974—1977	3,6	16,3	16,2	112	21	28,4	49,8	14,7	18,3
	1978—1981	3,9	17,9	17,6	73	24	32,8	61,4	15,5	19,9
	1982—1984	3,0	12,9	13,4	86	32	26,9	61,6	14,8	19,5
Восточная Балтика без Рижского залива	1970—1973	4,0	16,7	10,8	137	28	31,0	55,4	14,4	17,3
	1974—1977	4,6	17,9	11,9	94	17	32,3	55,9	15,1	18,3
	1978—1981	4,8	18,4	13,2	80	15	35,1	67,1	15,6	19,2
	1982—1984	3,8	17,0	14,8	92	14	34,8	69,8	15,5	19,0
Юго-Восточная Балтика (ставные невода)	1976—1977	—	—	—	—	—	47,6	80,7	16,2	19,3
	1978—1981	—	—	—	—	—	55,8	86,8	17,2	20,3
	1982—1984	—	—	—	—	—	55,8	108,9	17,1	21,4
Финский залив	1970—1984	3,3	14,3	15,3	97	46	21,6	37,8	13,5	16,6
Северная Балтика	1970—1984	3,5	15,4	15,7	95	24	28,2	56,1	14,5	18,6
Восточная Балтика	1970—1984	4,3	17,7	12,7	101	19	33,3	62,1	15,2	18,6
Юго-Восточная Балтика	1976—1984	—	—	—	—	—	53,1	92,1	16,8	20,3
Рижский залив	1970—1984	—	—	—	—	—	25,5	42,1	12,0	16,1

довым наблюденным приростам одновозрастных рыб (рис. 7.4). При этом наибольшие отличия этих показателей видны в первый год жизни рыб, которые в последующие годы наиболее четко выражены лишь по длине у сельди подрайона 26, по массе — подрайона 26 и заливов (см. рис. 7.4). Различия темпа роста сельди разных подрайонов Балтики обусловлены различной кормовой базой, температурным и соленостным режимами моря [122, 127 и др.].

Темп роста и, следовательно, длина и масса одновозрастных сельдей меняются по годам.

Во всех подрайонах Балтики с 1970 по 1981 гг. наблюдается увеличение средних массы и длины

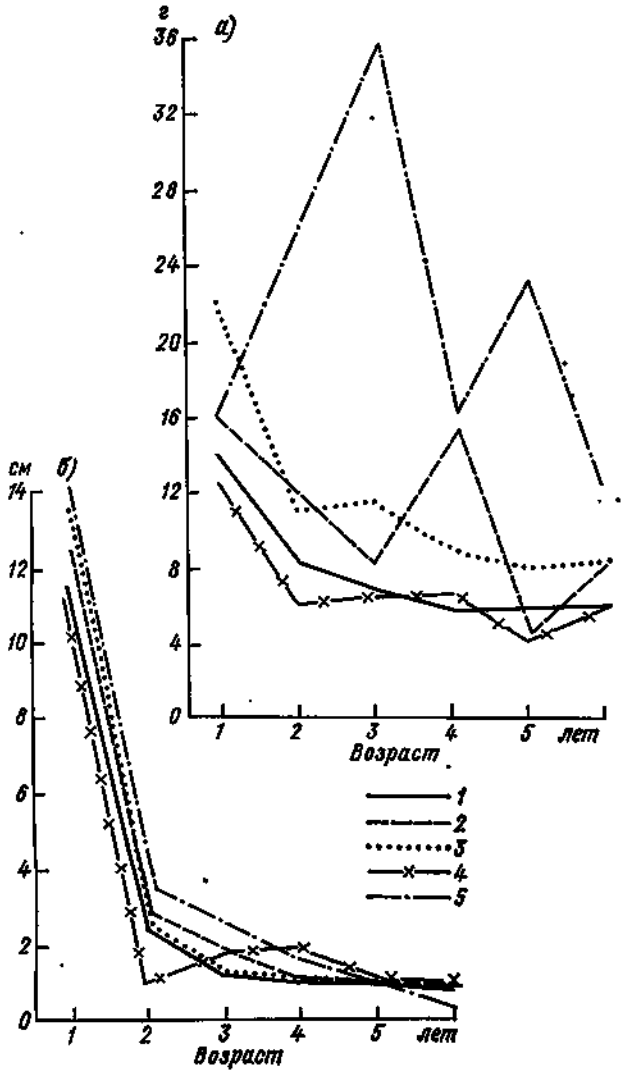


Рис. 7.4. Средние наблюденные приросты массы (*а*) и длины тела сельди по Смитту (*б*) в 1970—1984 гг. в подрайонах 32.1—2 (*1*), 29.2—3 (*2*), 28.1—4 (*3*), 28.5 (*4*), 26.1—3 (*5*).

одновозрастной сельди (см. табл. 7.5). Это объясняется улучшением обеспеченности пищей рыб в связи с увеличением основного корма сельди псевдокалянуса (Балтийское море), псевдокалянуса и лимнокалянуса (Финский залив), а также увеличением температуры и солености вод во всех подрайонах моря, положительно отражающихся на интенсивности питания и обменных процессах рыб [122].

На влияние кормовой базы на темп роста балтийской сельди ранее указывали и Н. И. Николаев [127, 130], М. Н. Лишев, С. К. Кикуте, С. О. Фреймане [107], Е. М. Костричкина, Э. А. Оявеер и др. [118].

В 1982—1984 гг. биомасса псевдокалянуса в Балтийском море снизилась по сравнению с 1978—1981 гг.; соответственно ниже в этот период были и средние масса и длина сельди младших возрастных групп (см. табл. 7.5).

Темп роста сельди меняется и в зависимости от ее возраста: он максимальный по длине в первый год жизни и значительно замедляется в более старшем возрасте, особенно после 6 лет [107, 144, 165] (см. рис. 7.4). Весовой темп роста сельди разных подрайонов моря и в разные годы меняется у разных возрастных групп неидентично. Так, в подрайонах 28.1-4, 28.5, 32 и 29 средний годовой прирост массы максимальный на 1-м году жизни, затем замедляется и увеличивается на 4-м году жизни в подрайоне 29. В подрайоне 26 наибольшие средние годовые приросты массы наблюдаются на 3-м году жизни, минимальные — на 1-м, 4-м, 6-м годах (см. рис. 7.4). На неравномерные в течение жизни приросты массы сельди в разных районах Балтийского моря указывали также М. Н. Лишев, С. К. Кикуте, С. О. Фреймане [107], Н. П. Бирюков [22]. По-видимому, сельдь массой наиболее лабильно реагирует на изменения условий жизни, чем длиной.

Половозрелой сельдь в Балтийском море становится в основном с возраста 2—3 года. На юге моря и в Рижском заливе в возрасте 2 года уже наблюдается около 90 % половозрелых рыб, на востоке и севере — около 60 % (см. табл. 7.4).

Темп полового созревания сельди в данном году в значительной степени обусловлен ее темпом роста и температурным режимом моря в период зимовки рыб. Установлено [59], что чем суровее зима, тем позже созревали гонады сельди и соответственно более поздние были подходы ее на нерестилища в Рижском заливе. С другой стороны, чем лучше темп роста сельди, тем раньше она созревает.

Особенности питания и пищевые взаимоотношения

Состав пищи балтийской сельди меняется в течение ее жизненного цикла. На первых этапах экзогенного питания (после резорбции желточного мешка) пища личинок крайне разнообразна и состоит в основном из *Copepoda nauplii* и I—III копеподитных стадий веслоногих рачков, главным образом *Eurytemora hirundoides* [102, 189 и др.] (см. табл. 7.1). С ростом спектр питания личинок расширяется (рис. 7.5).

Средние годовые колебания накормленности личинок сельди зависят от величины кормовой базы, которая в большой мере определяется термическим

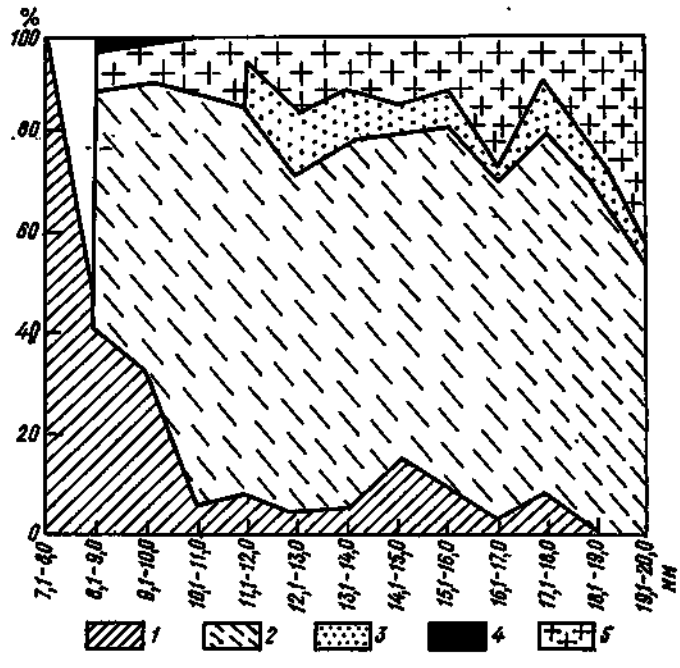


Рис. 7.5. Изменение состава пищи (% от массы всей пищи) личинок сельди в зависимости от их длины.
1 — Copepoda nauplii; 2 — Eurytemora hirundoides; 3 — Acartia bifilosa; 4 — Rotatoria, Cladocera; 5 — Copepoda.

режимом вод в зимне-весенний период. Об этом свидетельствует наличие обратных связей между суммой средних суточных отрицательных температур зимой и индексами потребления пищи личинками сельди в июне—июле ($r=-0,87$; $P=0,95$) с одной стороны, а также между суммой этих температур зимой и численностью основных кормовых объектов личинок сельди в мае ($r=-0,77$; $P=0,99$) с другой.

На дальнейшем этапе онтогенеза питание сельди становится еще более разнообразным, но до конца 1-го года жизни она питается или исключительно или главным образом планктоном [166, 189, 442 и др.]. Основное значение в ее питании имеют массовые виды копепод (табл. 7.6), к которым молодь сельди относится избирательно. В Рижском заливе весной и летом наиболее излюбленной пищей молоди является *Eurytemora* (табл. 7.7). Весной этот компонент более активно избирается мелкими рыбами длиной 30—89 мм (индикатор избирания равен 0,42), летом — особями длиной 30—100 мм (0,35), осенью ведущими видами в ее питании являются акарция, эвритемора, увеличивается значение мизид. Зимой преимущественную долю в питании молоди составляет понтопорея, в меньшей степени — лимнокалянус (см. табл. 7.7).

Молодь сельди в Рижском заливе питается во все сезоны, причем интенсивность питания зависит от температуры воды, наличия и концентрации того или иного вида кормового организма в слое воды, где она обитает (рис. 7.6). Поэтому общая средняя годовая накормленность молоди сельди имеет положительную связь с численностью ее кормовых организмов ($r=0,79$; $P=0,95$), а в отдельные сезоны года (весной и летом) и с температурой воды.

Максимальная накормленность молоди сельди наблюдается весной, несколько ниже она летом. Летом с повышением температуры воды и ускорением пищеварения молоди, а также с увеличением количества ее разных видов, потребляющих те же корма, обеспеченность пищей ниже, поэтому накормленность молоди сельди находится в обратной зависимости от ее численности в том или ином районе Рижского залива ($r=-0,98$, $P=0,99$). Осенью, несмотря на понижение температуры воды, накормленность молоди остается хорошей, а зимой она минимальна и в многолетнем аспекте зависит от температуры воды (в теплые зимы она выше, чем в холодные).

В течение суток летом молодь сельди имеет два максимума накормленности: в 9—10 и 20 ч. В светлое время она держится в слое 10—20 м, ночью — на глубине 5—8 м от поверхности воды. Суточные миграции молоди сельди обусловлены соответствующим перемещением планктона, которым молодь питается. Исследования по пищевым взаимоотношениям балтийской сельди с другими видами рыб Балтики не констатированы, за исключением работы Е. Ф. Трауберги [189], в которой установлены в Рижском заливе конкурентные пищевые взаимоотношения между молодью сельди и малого бычка, когда ареалы их распределения в основном совпадают (молодь обоих видов держится в придонных слоях воды на глубинах около 20 м). Основными

Таблица 7.6

Состав пищи личинок сельди (% по массе) в Рижском заливе в 1976—1984 гг. (средние данные состава пищи для личинок длиной 8—20 мм)

Компоненты пищи	Июнь	Июль
Eurytemora hirundoides (I—III стадии)	64,0	70,7
Copepoda nauplii	21,0	15,0
Acartia bifilosa (I—III стадии)	5,8	0,8
Rotatoria, Cladocera	0,5	0,0
Copepoda (неопределено до вида)	8,7	13,5

Таблица 7.7

Изменения состава пищи (% по массе) молоди сельди в Рижском заливе по сезонам

Компонент состава пищи	Весна	Лето	Осень	Зима
Eurytemora hirundoides	41,6	55,3	31,5	10,0
Acartia bifilosa	0,6	5,6	27,8	0,0
Limnocalanus grimaldii	47,6	31,1	6,2	17,0
Copepoda nauplii	0,1	0,1	0,0	0,0
Общее *Copepoda*	89,9	92,2	65,5	27,0
Bosmina maritima	0,1	0,9	1,5	0,0
Podon polyphemoides	0,0	0,6	0,1	0,0
Evadne nordmanni	0,0	1,0	0,4	0,0
Общее *Cladocera*	0,1	2,5	2,0	0,0
Mysis mixta	2,5	3,1	10,4	7,0
Mysis oculata	0,6	0,2	5,8	1,0
Neomysis vulgaris	0,0	0,0	5,5	6,6
Общее *Mysidacea*	3,1	3,3	21,7	14,6
Pontoporeia affinis	0,0	0,0	0,7	40,9
Pontoporeia femorata	0,0	0,0	2,0	0,1
Pontoporeia	0,0	0,0	0,0	13,4
Общее *Amphipoda*	0,0	0,0	2,7	54,4
Synchaeta baltica	0,0	0,4	0,0	0,0
Balanus larvae	0,0	0,03	0,09	0,0
Lamellibranchiata larvae	0,0	0,03	0,01	0,0
Остатки	6,9	1,54	8,0	4,0
Общее *Varia*	6,9	2,0	8,1	4,0

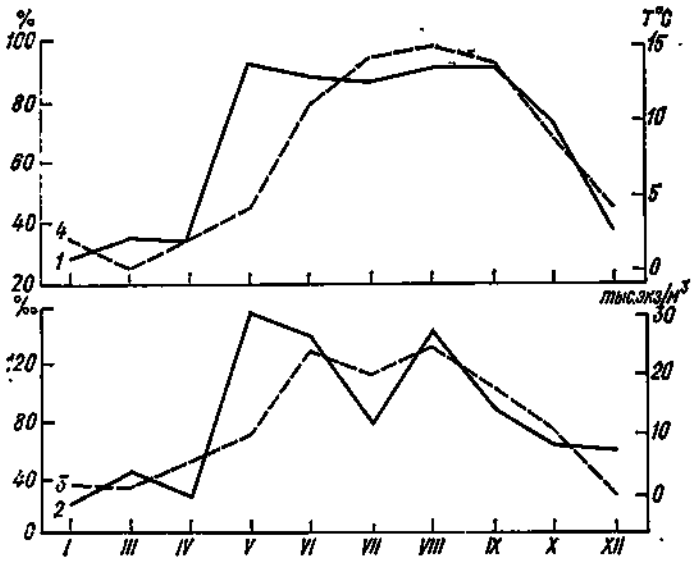


Рис. 7.6. Изменение количества (%) питающейся молоди салаки (*1*) и индекса наполнения желудка (‰) (*2*) в Рижском заливе по месяцам в зависимости от численности (тыс. экз/м²) кормовых организмов *Copepoda* (*3*) и температуры воды *T* в слое 0—20 м (*4*) по средним данным за 1965—1974 гг.

объектами конкуренции осенью является *Copepoda* (индекс ПС=43,6...54,6 %), зимой — *Amphipoda* (индекс ПС=69 %). Но поскольку в эти периоды глубины распределения молоди сельди и малого бычка совпадают не всегда, а бентические и нектобентические организмы в Рижском заливе рыбами недоиспользуются, то острых пищевых противоречий между молодью сельди и бычка не возникает [189]. С увеличением возраста и длины тела сельди удельный вес планктона в ее пище сокращается, а значение более крупных ракообразных (мизид, амфипод) — повышается. В составе пищи отдельных экологических группировок сельди наблюдаются определенные различия, которые с повышением возраста сельдей увеличиваются. Различия в характере питания и пищевых спектрах разных возрастных групп сельди обусловлены не только увеличением размера тела рыб, но и особенностями распределения их по глубинам. Наиболее активно питается молодь и одногодовики (длиной до 18 см). Пища состоит преимущественно из мелких тепловодных форм и копеподитных стадий копепод. Накормленность в отдельных случаях может достигать 40 ‰ и выше.

В период полового созревания у рыб длиной 18—20 см интенсивность питания снижается, а у старших возрастных групп — опять возрастает за счет перехода их на питание более крупными объектами — нектобентосом.

Балтийская сельдь — эврифаг, обладает высокой пищевой пластичностью от 70,6 до 84,4 % [85 и др]. В ее пище встречается до 24 видов морских беспозвоночных. Основными объектами питания являются зоопланктонные рачки — копеподы *Pseudocalanus elongatus, Limnocalanus, Centropages, Temora longicornis, Eurytemora, Acartia* и нектобентический вид *Mysis mixta* [26, 85 и др.]. Из кладоцер в большом количестве встречаются *Evadne* и *Podon* летом и *Bosmina* осенью.

При хорошей обеспеченности пищей сельдь питается преимущественно наиболее крупными формами: *Pseudocalanus elongatus, Limnocalanus, Mysis mixta.*

В зависимости от сезонной динамики пищевых объектов, а также сезонных миграций сельди соотношение компонентов в их пище в разные сезоны отличается. Весной и летом сельдь питается в основном зоопланктоном. Летом, в период интенсивного нагула, пищевые спектры рыб наиболее разнообразны за счет увеличения в пище доли тепловодных видов копепод *(Temora longicornis, Centropages hamatus)* и кладоцер *Evadne nordmanni, Podon spp., Bosmina coregoni maritima).* Осенью и зимой сельдь питается мизидами и амфиподами (главным образом *Mysis mixta*), доступность которых в это время повышается [130]. Значение мизид и амфипод в питании сельди в заливах больше, чем в открытой Балтике [24, 85 и др.].

В течение года у сельди наблюдается два максимума питания: первый — в июле, когда начинается нагул и накопление основных жировых запасов в теле рыб, второй — осенью (октябрь—декабрь), когда сельдь переходит на мизидное питание и у нее начинается интенсивный рост половых продуктов. Минимальная накормленность отмечена в зимний период, и температурный фактор в это время для нее является определяющим.

В течение суток у балтийской сельди наблюдается четкий ритм питания [26 и др.]. Количество максимумов накормленности обусловлено качественным составом пищи. Сельдь, питающаяся преимущественно зоопланктоном, имеет в течение суток один максимум накормленности, приходящийся на вечерние часы (18—19 ч летом и 22 ч зимой). У рыб, в пище которых доминируют крупные нектобентические пищевые объекты (мизиды и амфиподы) отмечены два максимума накормленности: дневной (в 12 ч) и вечерний (в 20—24 ч). Минимальную накормленность наблюдали у сельди в ранние утренние часы (в 3—4 ч летом и в 9—10 ч зимой).

Интенсивность питания зависит от температуры в слое основного обитания скоплений [442 и др.].

В соответствии с зимними температурами интенсивность питания сельди в западной и южной частях Балтийского моря уменьшается, а в более северных районах прекращается. При этом длительность периода голодания зависит от суровости зимы [127] и продолжается, например у сельди восточной части Финского залива, от второй половины октября до середины мая [26]. В течение периода вегетации влияние на питание температуры и количества корма модифицировано половым циклом: интенсивность питания сельди резко сокращается, когда гонады сельди достигают III—IV стадии половозрелости, и к нерестовому периоду практически прекращается. Наибольшей является интенсивность питания после нереста, в период восстановления и быстрого развития гонад. В результате комплексного влияния внутренних и внешних факторов ход кривой интенсивности питания весенней и осенней сельди, а также заливных и морских популяций значительно различается.

Ввиду своей высокой численности во всех частях Балтики сельдь является наиболее важным потребителем планктонных рачков и нектобентоса в Балтийском море и выбирает она в общем более крупные пищевые объекты.

Воспроизводство

Согласно Д. Я. Беренбейм и Б. К. Евтюховой [19], даты нерестовых подходов, начала и разгара нереста сельди в пределах восточного побережья Балтики закономерно изменяются с юга на север: чем южнее расположены нерестилища сельди, тем раньше начинаются ее нерестовые процессы и тем более изменчивы их сроки (табл. 7.8). Это обусловлено разным термическим режимом вод в разных районах моря: на юге оптимальные для нереста сельди условия наступают раньше, поэтому и нерест здесь проходит раньше, чем на севере.

Общая продолжительность нереста в Вислинском и Финском заливах близка, с небольшой тенденцией ее сокращения на севере. Однако в Рижском заливе нерест длится значительно дольше (см. табл. 7.8). Это обусловлено тем, что в Рижском заливе нерестует две популяции сельди — морская, нерестующая раньше и при сравнительно низкой температуре воды, и сельдь залива, нерестующая позже и при более высокой температуре воды, чем морская. В других же районах моря нерестует в основном по одной популяции сельди. Сроки и интенсивность подходов сельди на конкретные нерестилища определяются физиологическим состоянием рыб и внешними факторами сре-

Таблица 7.8

Характеристика нереста и нерестовых подходов сельди Вислинского, Рижского и Финского заливов в среднем за 1960—1982 гг.

Нерестилище	Нерестовые подходы, дата±сут	Нерест, дата±сут			Продолжительность нереста, сут
		начало	разгар	окончание	
Вислинский залив	20 III±11,9	10 IV±14,7	15 IV±7,2	15 V ±10,2	36
Рижский залив	26 IV±11,7	30 IV±16,5	19 V ±18,0	23 VII±15,5	90
Восточная часть Финского залива	12 V	26 V ±6,9	6 VI±7,0	28 VI ±2,5	32

ды, ведущими из которых являются условия зимовки и температура воды в период нереста [19, 162 и др.]. Чем суровее зима и ниже температура воды в преднерестовый и нерестовый периоды, тем позже начинается и проходит нерест сельди [19, 59]. Морская весенне-нерестующая сельдь обычно мечет икру в Рижском заливе в конце апреля—июне (в массе — в мае), вблизи от берега при относительно низкой температуре воды (5—13 °С) и солености 3—7‰, а сельдь залива — в середине мая—начале июня, (в массе — в первой половине июня) при более высокой температуре воды (9—16 °С) [147 и др.].

У берегов Литвы (районы Клайпеды и Паланги) нерест весенней сельди происходит с первой декады мая до июня (в массе — в мае) при температуре воды 5—10 °С и солености 4—6‰ [1], в Вислинском заливе — во второй декаде марта—второй декаде мая (в массе — в конце апреля—начале мая) при температуре воды 6—14 °С и солености 3—4‰ [1, 174].

В Финском заливе нерест сельди происходит с начала мая до конца июня (в массе — в конце мая—начале июня). Сроки нереста в разных районах залива и в разные годы колеблются в зависимости от состояния зрелости половых продуктов сельди и интенсивности прогрева воды на нерестилищах [139].

Массовый нерест осенней сельди наблюдается в Ботническом заливе с конца июля по сентябрь, в средней части моря — в конце августа—начале сентября, в Гданьской бухте — в октябре, в западной Балтике — в августе—октябре [321 и др.]. Размножение происходит при температуре воды 12—16 °С [147].

Структура нерестового стада сельди наиболее сложная в Рижском заливе, где нерестует морская популяция, мигрирующая в залив на нерест из близлежащих районов моря, и популяция сельди залива, которая в основном обитает в заливе. Количество морской сельди на нерестилищах в Рижском заливе составляет в среднем за 1971—1984 гг. 55 % и меняется по годам в зависимости от интенсивности ее захода в залив, обусловленной как состоянием ее запасов, так и мощностью притока более соленых морских вод в залив.

На других нерестилищах Балтики обычно нерестует в основном одна популяция сельди, тяготеющая к определенному району моря [19].

Основу нерестового стада всех популяций сельди составляют в общем двух-пятигодовики, но, как правило, чем южнее расположены нерестилища, тем в более молодом возрасте нерестует сельдь (табл. 7.9). Но размерный состав нерестующей сельди всех популяций меняется в течение нерестового периода. В начале этого периода нерестует более крупная старшевозрастная сельдь, в конце периода — мелкие и младшевозрастные группы рыб.

Основные нерестилища весенне-нерестующей сельди расположены в заливах, проливах и у берегов открытого моря на хорошо аэрируемых участках с быстрым течением воды на прибрежных мелководьях [163].

Осенне-нерестующая сельдь открытого моря нерестится на банках в удалении от берега [147]. Нерест осенне-нерестующей сельди залива происходит позже и ближе к берегу, часто на нерестилищах весенне-нерестующей сельди [147, 163, 427 и др.].

В Рижском заливе весенне-нерестующая сельдь нерестится на глубинах от 3,8 до 10,1 м [163]. Нерест начинается на небольших глубинах, но постепенно по мере прогревания воды сдвигается на большую глубину [101, 163].

Ареалы нереста сельди распределяются вблизи побережья на твердых, песчаных и каменистых грунтах, где подводная растительность не очень густа [147]. Икра обычно прикреплена к растительности, но может быть найдена также на камнях, раковинах балянусов и мидий [101], а также

Таблица 7.9

Возрастной состав (%) сельди на нерестилищах в промысловых ставных неводных уловах в апреле—июне в среднем за 1982—1984 гг.

Подрайон	Месяцы	Возраст, лет										Средний возраст, лет
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
32.2	V—VI	0	18,9	42,8	21,6	9,3	1,6	3,8	1,1	0,5	0,4	3,5
32.3	V—VI	—	14,0	30,1	32,5	12,8	6,2	3,2	0,2	—	—	3,8
29.4	IV—VI	0	10,0	32,3	24,2	15,8	5,5	6,2	3,7	1,8	0,5	4,1
28.5 (Латвийское побережье)	V—VI	0,5	22,7	33,7	17,4	9,0	3,9	3,5	3,8	0,9	0,6	3,8
28.5б (Пярну)	V—VI	0,7	15,8	35,7	20,0	12,7	5,6	6,2	2,9	0,4	—	3,6
26.2	IV—VI	—	56,2	23,2	16,7	3,6	0,3	—	—	—	—	2,7
26.4	III—V	0,7	31,5	43,0	20,9	2,9	1,0	—	—	—	—	2,8

на гравии и песке, но плотность откладки икры здесь обычно ниже, чем на растительности.

В Рижском заливе икру сельди чаще всего можно обнаружить на сильно ветвящихся побегах красных водорослей *(Ceramium, Polysiphonia, Sphacellaria)*, реже на кустистых бурых водорослях *(Fucus vesiculosus* и *Zostera maritima)* [163]. Важным растительным субстратом для сельди считается *Furcellaria fastigiata* [101].

Основные нерестилища весенне-нерестующей сельди в Южной и Юго-Восточной Балтике расположены в прибрежной зоне Поморской бухты, вокруг о. Рюген и в Грайфсвальдер-Бодден на глубинах до 10 м, вдоль побережья Польши, в Гданьском и Вислинском заливах на глубинах 4—5 м, в районах Пионерска, Клайпеды, Паланги, Лиепаи на глубинах 2—29 м [1, 174 и др.].

В Финском заливе нерестилища весенней сельди расположены на глубинах 3—17 м вдоль западного его побережья, в Лужской и Копорской губах, в Выборгском и Нарвском заливах, а также на шхерах вдоль северного побережья у о. Готланд и на отмелях [22].

Нерестилища осенне-нерестующей сельди находятся в тех же местах и районах, где и весенне-нерестующей, только на больших глубинах.

На естественных нерестилищах эмбрионы сельди распределяются в основном рассеяно или в нетолстых кладках икры, хотя встречаются кладки толщиной 8—10 и более слоев [425]. Зрелая икра сельди имеет в среднем диаметр 0,8—1,0 мм. Она откладывается на субстрат — гравий, песок, растительность. Основным излюбленным субстратом в море является красная водоросль *Furcellaria lumbricalis*, в заливе — *Furcellaria fastigiata.*

Одним из главных факторов, от которых зависит продолжительность эмбрионального развития сельди, являются температура воды и кислородный режим на нерестилищах: чем выше температура и лучше кислородные условия, тем быстрее развиваются эмбрионы [80, 147 и др.]. Для весенне-нерестующей сельди в Рижском заливе продолжительность эмбрионального развития колеблется от 2200 до 2376 градусо-часов [101].

Смертность эмбрионов весенней сельди колеблется от 0,2 до 31,0 % [147] и возрастает с увеличением температуры воды, достигая максимума в конце нереста сельди при температуре свыше 16—17 °С [164].

Развитие сельди от вылупления до метаморфоза занимает несколько месяцев.

Предличинка сельди сразу после выклева, вращаясь вокруг продольной оси тела, перемещается вверх, что связано с ее продолжительной реакцией на свет и является важной биологической адаптацией добывания корма (после перехода на экзогенное питание) в более освещенных слоях воды. В течение предличиночного периода у сельди происходит интенсивное развитие органов, изменение длины тела и пигментации. Резорбция желтка зависит от температуры воды, составляет в среднем от 700 до 1100 градусо-часов и заканчивается при физиологическом возрасте 2800—3800 градусо-часов. Длина предличинок весенней сельди при вылуплении составляет 5,2—6,0 мм, предличинок осенней сельди — 5,9 мм. Ко времени резорбции желточного мешка их длина увеличивается соответственно до 7,9—8,6 и 8,1 мм [174, 188]. По мере резорбции желточного мешка и увеличения длины тела плавучесть предличинки увеличивается, ее поведение изменяется. Периоды активного плавания удлиняются, передвижение становится плавным. В конце резорбции желтка предличинка способна держаться в определенном слое воды и постоянно плавать, перемещение ее вверх и вниз совершается активно.

Личинки сельди в Рижском заливе встречаются с конца мая до начала августа. Во время появления первых личинок температура воды составляет 7—12 °С, в период появления поздних личинок — 18—20 °С. В течение длительного периода нереста (1,5—2 мес) нерестилища посещаются многими косяками сельди, поэтому в уловах появляются новые поколения личинок (над нерестилищами одновременно встречаются самые мелкие и крупные личинки). Длина самых мелких личинок составляет 7—8 мм, крупных — 22—23 мм. При наличии достаточной кормовой базы рост личинок сельди зависит от температуры воды. При температуре воды ниже 12 °С суточный прирост составляет 0,33 мм, при температуре 13—16 °С — 0,60 мм, при температуре свыше 17 °С — 0,80 мм, а при температуре свыше 18 °С темп роста личинок падает [162, 188 и др.].

В Вислинском и Гданьском заливах длина самых мелких личинок сельди колеблется от 7,5 до 8,0 мм.

Распределение количеста личинок во времени соответствует расположению основных нерестилищ сельди [101, 163, 164 и др.]: в июне наибольшие их скопления в Рижском заливе отмечаются в прибрежной зоне (над глубинами до 10 м), в июле—августе — на больших глубинах [189].

Ареал вертикального распределения количества личинок сельди в Рижском заливе не превышает глубин свыше 10 м; основная их масса держится в поверхностном слое воды (0—2 м). Узкий ареал вертикального распределения количества личинок в Рижском заливе летом обусловлен более высокими показателями температуры воды и кормовой базы (табл. 7.10).

В Восточной и Юго-Восточной Балтике личинки весенне-нерестующей сельди в мае—июне держатся над нерестилищами, затем постепенно отходят глубже; до 90 % личинок наблюдаются до 30-мет-

Таблица 7.10

Вертикальное распределение численности личинок сельди летом (июне—июле) в Рижском заливе в зависимости от температуры воды и кормовой базы

Показатель	Глубина, м		
	0—2	3—5	8—10
Численность:			
личинок, % общего количества	83,1	11,9	5,0
Eurytemora (науплии и I—III копеподитные стадии), тыс. экз/м³	7,9 *	—	4,6 **
Acartia (науплии и I—III копеподитные стадии), тыс. экз/м³	27,8	—	18,4
Температура воды, °С	16,2	—	14,8

* В слое 0—5 м.
** В слое 5—10 м.

Таблица 7.11

Уловы личинок весенне-нерестующей сельди (экз. на 10 тыс. м³) в июне и августе 1978—1979 гг. по районам и над глубинами и их средняя длина в Восточной Балтике (данные уловов тралом Айзекса—Кидда)

Месяц и год	Разрез				Над глубинами, м				Среднее	
	1	2	3	4	10	20—30	50—70	70	улов	длина, мм
VI 1978	7	42	73	7	60	73	3	4	32	13,5
VIII	2	11	8	11	9	11	6	0	7	26,6
VI 1979	3	22	55	10	72	13	2	0	22	14,5
VIII	6	9	8	11	7	2	4	20	8	29,0

Примечание. Разрезы: 1 — Гданьский+Пионерский; 2 — Клайпедский+ Паневежский; 3 — Лиепайский+Павилостский; 4 — Вентспилский+Сырвский.

ровой глубины. Так как на нерестилища подходят все новые производители, одновременно идет процесс нереста и инкубации ранее отложенной икры и выход эмбрионов в районах нерестилищ, поэтому в прибрежной зоне обитают личинки на разных этапах развития длиной 9—20 мм.

Подрастая, личинки и неоформившиеся мальки распределяются над всеми глубинами. При длине 32—35 мм они переходят на стадию оформившегося малька. В сентябре личинки и неоформившиеся мальки не наблюдаются.

Численность, распределение личинок по районам и глубинам, размерно-весовые характеристики различаются по годам (табл. 7.11). Зависимость длина—масса личинок удовлетворительно описывается степенной функцией $W=al^b$ (где W — масса; l — длина, мм; a и b — коэффициенты).

Так как нерест осенне-нерестующей сельди происходит в сентябре и начинается после осеннего шторма, то выклев и развитие личинок происходят в сентябре—ноябре и держатся они в это время в районе нерестилищ, т. е. на банках над глубинами 20—30 м. С наступлением зимнего сезона и снижением температуры воды личинки из прибрежных районов отходят на глубины более 50 м. Длина личинок в зимний период колеблется в пределах 15—35 мм; у личинок длиной 25—30 мм парные плавники еще не развиты.

С наступлением весеннего сезона, прогревом водных масс и увеличением кормовых ресурсов личинки, достигающие в апреле — мае длины 30—44 мм, перемещаются в прибрежную зону. В мае—июне личинки заканчивают переход на стадию оформившегося малька.

Распределение, численность и размерно-весовые характеристики личинок осенней сельди различны по годам (см. табл. 7.11), но в южных районах моря они обычно всегда выше.

Численность личинок весенней сельди меняется по годам в прямой зависимости от обеспеченности ее пищей.

В Рижском заливе это — биомасса кормовых организмов и численность личинок малого бычка — основного конкурента в питании личинок сельди. Автором установлено, что формирование поколений у весенне-нерестующей сельди Рижского залива заканчивается в конце первого вегетационного периода. Поэтому численность поколений этой сельди определяют главным образом условия нагула в этот период: величина кормовой базы, численность ее потребителей и температура воды, влияющая как на развитие пищевых организмов, так и на интенсивность обмена веществ и рост молоди и, следовательно, на ее выживаемость, особенно на ранних стадиях жизненного цикла.

Численность личинок и соответственно молоди осенней сельди находится в прямой зависимости от суровости зимы в первый год их зимовки: в холодные зимы смертность личинок этой популяции сельди выше [149].

Личиночный период весенне-нерестующей сельди длится около месяца, переход на стадию малька происходит при длине 25—30 мм [101, 188 и др.]. В стадии малька молодь еще держится, как правило, в районе или вблизи нерестилищ, затем в Вислинском заливе через 1,5—2,0 мес, в Рижском заливе через 2—3 мес (морская популяция) выходит в море, в других районах Балтики — отходит из прибрежной зоны в более глубоководные районы на зимовку.

Плодовитость балтийской сельди колеблется в широких пределах: у морской весенней сельди восточного побережья Балтики — от 2 до 89 тыс. икринок, у весенней сельди Рижского залива — от 12 до 123 тыс. икринок, у осенней сельди восточного побережья Балтики — от 5 до 113 тыс. икринок, у осенней сельди Рижского залива от 4 до 85 тыс. икринок. Она зависит от массы, длины и возраста особи [143, 158, 164 и др.]. Абсолютная плодовитость и рост плодовитости с увеличением длины и массы рыбы у осенней сельди существенно выше, чем у весенней [143, 158 и др.].

Распределение, поведение, миграции

Распределение, поведение и миграции балтийских сельдей зависят от биологического цикла рыбы, их физиологического состояния, от основных условий среды — температуры, солености, содержания кислорода, освещенности, течений, обилия корма и т. д. В некоторых районах Балтики на распределение сельди влияют также антропогенные факторы. Для разных сезонов года и в разные годы условия различны.

Зимой в открытой Балтике концентрации сельди и шпрота днем располагаются главным образом на глубине от 60—70 до 90—120 м (в зависимости от содержания кислорода) при температуре воды 2—6 °С. Нижняя граница скоплений находится выше изооксигены 1,0—1,5 мг/л. В суровые зимы зимовальные скопления располагаются одним слоем. В более мягких условиях возникает двухслойное распределение — младшая сельдь и шпрот могут держаться значительно выше старшей сельди. Сель-

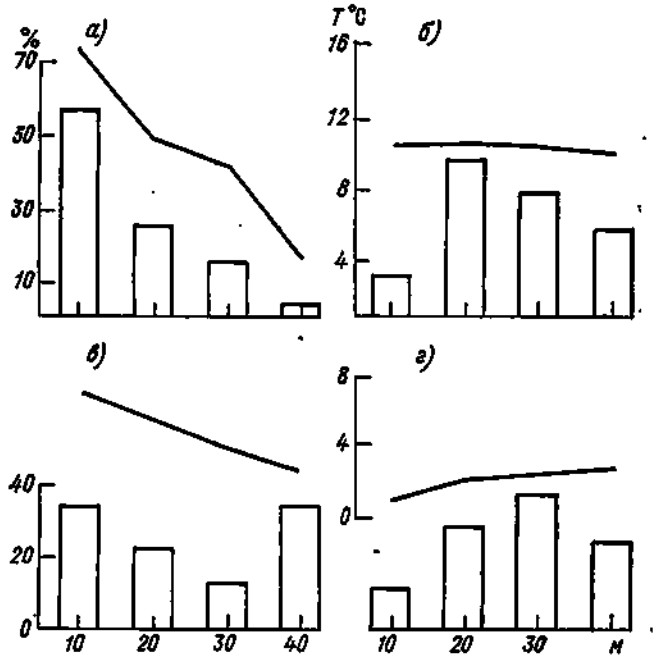


Рис. 7.7. Схема распределения улова (% общего улова) молоди салаки в Рижском заливе по зонам глубин в зависимости от температуры воды T (сплошная кривая) летом (*а*), осенью (*б*), весной (*в*) и зимой (*г*).

ди мелководных частей моря (Рижский залив, восточная часть Финского залива и другие районы) зимуют в основном в придонных слоях на глубине, начиная от 20—30 м и глубже, при температуре от 0 до 2—3 °С, но при хороших кислородных условиях. Распределение молоди сельди неравномерно и находится в соответствии с температурой воды. В Рижском заливе, например, обычно наиболее плотные концентрации молоди наблюдаются на глубинах 20 и более 20 м (рис. 7.7) в самой теплой южной части залива, наименее плотные — в более холодноводной северной части. Связь между распределением молоди сельди по районам залива с температурой воды зимой высока ($r=0{,}94$; $P=0{,}95$). Температурные границы обитания сельди зимой в Северной Балтике, и в частности в Рижском и Финском заливах, заметно шире, чем в Южной Балтике (табл. 7.12).

Весной младшая сельдь поднимается в более теплый поверхностный слой или термоклин, где концентрируются ее кормовые объекты. Старшая сельдь обитает в придонных слоях.

Перед началом нерестовых миграций дневные придонные зимовальные скопления сельди уплотняются в связи с развитием половых продуктов. Согласно Л. А. Раннак [165, 166], физиологическую подготовку к нересту стимулирует весеннее питание. С прогревом верхних слоев моря выше 5 °С начинается переход сельди из придонных слоев зимовки в пелагиаль. В южных частях моря это происходит на 1—2 мес раньше, чем в северных, затем в Южной Балтике преднерестовые скопления концентрируются в предустьевых участках перед входом в Вислинский и Куршский заливы, где температура воды выше [174]. Ближе к берегу (глубины 10—30 м) находятся наиболее подготовленные к нересту крупные рыбы старших возрастов, которые зимовали в более глубоких частях моря при более высокой температуре воды. В Восточной Балтике преднерестовые скопления сельди концентрируются в прибрежной зоне открытой Балтики перед Ирбенским проливом. Для основных районов воспроизводства сельди бывшего советского побережья (Гданьский, Вислинский, Рижский и Финский заливы) определена схема миграций косяков сельди в зависимости от гидрометеорологических факторов [163, 174 и др.]. Тесная связь между температурой воды во время зимовки и в преднерестовый период позволяет прогнозировать сроки нереста балтийских сельдей в разных районах моря [19, 59 и др].

Для приближения к нерестилищам сельдь использует «языки» более теплой морской воды.

Переход молоди весной после зимовки в прибрежную зону существенно зависит от суровости зимы. После холодной зимы молодь сельди дольше задерживается на больших глубинах, чем после относительно теплых зим [192 и др.]. В заливах весной молодь сельди концентрируется на небольших глубинах (10—20 м), где прогрев вод происходит значительно быстрее, чем в глубоководных частях (см. рис. 7.7). Этот период распределения ее по районам также зависит от температуры воды ($r=0{,}84$, $P=0{,}95$).

Летом сельдь распределяется в три слоя: 1) в теплом поверхностном слое прибрежных районов обитают мальки; 2) в термоклине обитают младшие возрастные группы; 3) в придонных слоях нагуливается старшая сельдь. Преднерестовые скопления осенней сельди обычно формируются с июля по сентябрь.

Распределение сельди в летний период по районам моря и годам определяется прежде всего пищевым фактором — состоянием кормовой базы. Н. П. Бирюковым [26], И. И. Николаевым [125], Э. А. Оявеером и М. В. Калейс [150] и другими показано, что неравномерное распределение рыб в период нагула связано с неодинаковым распространением излюбленного и доступного корма, что в свою очередь находится в зависимости от динамических

Таблица 7.12

Температура (°С) слоев обитания балтийских сельдей зимой и в нагульный период в 1964—1985 гг.

Район	Зима			Нагульный период		
	День		Ночь	День		Ночь
	пелагический слой	придонный слой		пелагический слой	придонный слой	
Рижский залив, восточная часть Финского залива	0—2(3)	0—2(3)	0—2(3)	4—14	2—8	⩽16—17
Северная и Центральная Балтика	2—5	—	⩾0,2	4—14	3—7	⩽14—15
Южная Балтика	4,0—7,0	1,5—3,2	<0,9	—	>5	7—16

процессов в море. Установлено, что наиболее плотные и устойчивые скопления нагульной сельди образуются в высокопродуктивных участках моря, где происходит вынос в фотический слой биогенных веществ и, следовательно, создаются условия для развития богатой кормовой базы рыб [133, 182 и др.]. При этом наиболее богатыми по биологической продукции являются северная часть открытой Балтики с устьем и восточной частью Финского залива и Южная Балтика (склоны Гданьской впадины и район между м. Таран и Клайпедой). Расположение косяков сельди днем совпадает со слоями доминирования ее основных кормовых объектов — псевдокалануса и теморы (море) лимнокалануса и эвритеморы (заливы), плотные концентрации которых создаются в зонах термоклина и галоклина. Основная масса молоди сельди держится в мелководной прибрежной части моря, где преобладают мелкие формы тепловодного зоопланктона [132, 177 и др.] в гомогалинном слое, обычно в условиях гомотермии. Молодь сельди Рижского залива приурочена летом к прибрежным участкам и поверхностному, более теплому и продуктивному водному слою. В этот период распределение молоди сельди в заливе связано с ее накормленностью ($r=0{,}98$, $P=0{,}99$). Поскольку обилие кормовой базы для молоди сельди в Рижском заливе находится в прямой зависимости от температуры воды в апреле — мае ($r=0{,}83$, $P=0{,}95$), то и наибольшее количество молоди наблюдается в наиболее прогретых мелководных участках залива ($r=0{,}84$, $P=0{,}95$).

Осенью, когда глубина залегания термоклина увеличивается и в результате ветрового перемешивания в верхних слоях моря устанавливается гомотермия, скопления сельди рассеиваются. При снижении же температуры в поверхностных слоях ниже 3 °С начинают образовываться скопления сельди в гетерогалинном слое и у дна, где температура воды выше и где они начинают образовывать зимовальные скопления [150 и др.].

В Рижском заливе охлаждение прибрежного мелководья осенью происходит быстрее; молодь сельди отходит из прибрежной зоны и концентрируется на глубинах 20—40 м (см. рис. 7.7). В этот период она держится в районах массового скопления пищевых организмов, преимущественно *Eurytemora* ($r=0{,}96$, $P=0{,}99$).

Межгодовая изменчивость пространственного неравномерного распределения сельди зимой зависит от суровости зимы и определяется толщиной слоя с благоприятными для нее условиями (содержание кислорода более 3 ‰ по объему, температура воды выше 3 °С) и температурой придонного слоя воды в зоне берегового склона. В преднерестовый и нерестовый периоды основными факторами, определяющими распределение и миграции сельди, являются состояние половых продуктов и температурные условия. В течение нагульного периода распределение сельди определяется обилием и доступностью подходящего корма, распределение которого в свою очередь зависит от характера стратификации водной массы: зона дефицита кислорода ограничивает вертикальное распространение рыб, термоклин и галоклин способствуют созданию концентраций кормовых объектов различных экологических комплексов. Поскольку тепловодный кормовой планктон концентрируется в термоклине и повыше, то и наибольшие скопления молоди сельди приурочены к этим слоям. Крупная сельдь днем распределяется в 5—10-метровом придонном слое на глубинах от 40—50 до 80—100 м (в зависимости от района), где распространяются основные запасы холодноводного зоопланктона (главным образом псевдокалануса), нектобентоса и бентоса.

Для балтийской сельди присущи суточные вертикальные миграции. В течение периода нагула, а в большинстве районов также в период зимовки, скопления сельди, находящиеся днем как в придонных, так и в пелагических слоях, поднимаются на ночь в поверхностные слои. Подъем рыбы связан с заходом солнца и длится обычно 30—40 мин. Опускание рыбы в горизонт дневного обитания начинается с восходом солнца и продолжается в зависимости от интенсивности солнечного сияния 1—3 ч, а при пасмурной погоде — даже дольше.

Суточная вертикальная миграция сельди наиболее интенсивна в период ее усиленного питания весной и в первую половину лета. С увеличением упитанности сельди интенсивность суточной вертикальной миграции падает. К зиме вертикальная амплитуда этих миграций уменьшается и при низкой температуре (обычно в заливах) она прекращается.

По продолжительности горизонтальных миграций сельди заливов (Ботнического, Финского и Рижского) довольно резко отличаются от морских сельдей. В основном они не выходят из родного залива (после нереста некоторая часть весенней заливной сельди выходит из залива для нагула, а возможно, и для зимовки). Поэтому перемещения основной массы сельди заливов непродолжительны и состоят из миграций на нерестилища и обратно в район нагула и зимовки.

Миграции морских сельдей значительно длиннее и продолжительнее. Популяция весенней сельди восточного побережья Швеции мигрирует после нереста для нагула в Южную Балтику и нагуливается там с июня—июля до октября—ноября. После этого она в общем мигрирует обратно. Интенсивность и пути миграции шведской сельди варьируют по годам [431]. В годы, богатые зоопланктоном, в Южную Балтику мигрирует меньше сельди, чем в годы, бедные в этом отношении [443].

Регулярные горизонтальные миграции предпринимает также хозяйственно очень важная популяция рюгенской сельди. Младшая часть популяции распределяется в основном в Балтийском море (от 16° в. д. до Мекленбургской бухты). Основная часть старшей и часть младшей сельди этой популяции мигрирует для нагула в проливы Каттегат и Скагеррак. Главным путем миграции служит прол. Эресунн, где на обратном пути сельдь и зимует. Рюгенская сельдь показывает очень большую приуроченность к перестилищам у о. Рюген. Популяцию рюгенской сельди можно рассматривать как переходную популяцию между атлантической и балтийской весенними сельдями. Часть своего онтогенеза она проводит в Балтийском море, а другую часть — в основном в прол. Каттегат, где соленость гораздо выше.

7.1.3. Промысел и состояние запасов

Сезонная и годовая динамика уловов

В Балтийском море всеми странами в 1960—1966 гг. ежегодно добывалось в среднем 236 тыс. т сельди. С 1967 г. в связи с ростом интенсивности промысла общие уловы увеличивались и к 1975 г. составили 455 тыс. т. С 1976 г. наблюдается стаби-

Таблица 7.13

Средние годовые уловы сельди (тыс. т) рыбной промышленностью СССР в Балтийском море различными орудиями лова по подрайонам и периодам лет

Период, годы	Подрайон 26			Подрайоны 25 и 27	Подрайон 28			Подрайон 29			Подрайон 32			Итого		
	Ставной невод	Тралы	Всего	Тралы	Ставной невод	Тралы	Всего	Ставной невод	Тралы	Всего	Ставной невод	Тралы	Всего	Ставной невод	Тралы	Всего
1960—1962	0,3	0,6	0,9	—	14,7	28,6	43,3	1,3	0,6	1,9	6,7	10,7	17,4	23,0	40,5	63,5
1963—1966	1,2	2,0	3,2	—	20,4	38,2	58,6	4,4	2,0	6,4	6,7	10,4	17,1	32,7	52,6	85,3
1967—1969	4,9	5,8	10,7	—	17,3	58,7	76,0	7,9	4,3	12,2	6,0	26,2	32,2	36,1	95,0	131,1
1970—1973	8,5	7,3	15,8	1,2	14,5	43,6	58,1	5,7	6,4	12,1	5,7	26,3	32,0	34,4	84,8	119,2
1974—1977	15,2	11,7	26,9	11,4	11,6	29,6	41,2	4,8	6,7	11,5	3,5	24,6	28,1	35,1	84,0	119,1
1978—1981	10,4	20,4	30,8	8,2	8,3	23,8	32,1	4,7	13,7	18,4	2,8	27,2	30,0	26,2	93,3	119,5
1982—1984	9,1	11,0	20,1	9,5	7,5	19,0	26,5	3,7	22,9	26,6	1,6	23,8	25,4	21,9	86,2	108,1

лизация промысла в пределах 420—460 тыс. т. Общие уловы сельди СССР в Балтийском море составляли в среднем 30 % улова всеми странами и также сильно колебались по годам (табл. 7.13). В развитии отечественного рыболовства на Балтике за последние 25 лет можно отметить четыре периода, характеризующиеся различной интенсивностью промысла и уловами:

1) в 1960—1966 гг. наша промышленность начала развивать траловый, а с 1963 г. — осваивать пелагический лов сельди. Общие уловы в это время были сравнительно низкими (см. табл. 7.13);

2) в 1967—1971 гг. увеличилось количество новых, более мощных тральщиков (150—300 л. с.), совершенствовалась техника поиска и добычи рыбы, поэтому росли общие уловы сельди (см. табл. 7.13);

3) в 1972—1977 гг. общие уловы сельди еще увеличились за счет освоения новых, более отдаленных от берегов районов Балтийского моря, что оказалось возможным в связи с усовершенствованием техники промысла и добычи рыбы;

4) с 1978 г. уловы сельди более или менее стабильно колеблются в соответствии с изменениями состояния запасов в том или ином подрайоне моря, поскольку особенно жестко лимитируются.

Промысел сельди в нашей стране ведется круглогодично, за исключением его отсутствия зимой в Финском и Рижском заливах в те годы, когда они покрыты льдом, а в Вислинском заливе — только в нерестовый период. Максимальная добыча во всех подрайонах моря наблюдается во втором квартале, когда сельдь образует преднерестовые и нерестовые концентрации (табл. 7.14).

Таблица 7.14

Средние за 1970—1981 гг. уловы сельди (%) рыбной промышленностью СССР по сезонам года и подрайонам Балтики

Подрайон	Открытая часть моря				Заливы			
	Квартал				Квартал			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV
32	—	—	—	—	12	46	10	32
29	21	37	11	31	—	97	3	—
28	25	40	19	16	10	53	17	20
26	24	34	30	12	20	80	—	—
Всего	23	37	22	18	11	54	11	24

В подрайонах 26, 28 и 32 в среднем более половины уловов, в подрайоне 29 около 30 % уловов сельди вылавливается тралами, остальная часть — ставными неводами. Ставными неводами сельдь промышляют в основном в Финском, Рижском, Вислинском заливах и в прол. Вяйнамери во время ее перестовых подходов.

Технологическая характеристика сырца

В нашей стране около половины всего улова балтийской сельди используется в консервном производстве, в том числе около 45 % — при изготовлении консервов «шпроты в масле», 20 % — на пресервы. Кроме того, около 20 % улова идет на прямой посол, 15 % — на горячее копчение — «копчушку», 15 % реализуется в охлажденном виде.

Химический состав сельди в течение года непостоянен [157]. Наибольшим изменениям подвержено содержание жира в тканях, которое колеблется от 1,5 до 17,0 % массы рыбы с минимумом в мае—июне. С июля содержание жира постепенно возрастает и в августе—сентябре достигает максимума. Далее, с октября в связи с созреванием гонад жирность постепенно снижается. Содержание белка в мясе сельди на протяжении года более стабильно и колеблется от 15 до 17 %. Содержание минеральных веществ также меняется мало в пределах 2,0—2,4 % в целой рыбе и 1,3—1,7 % в мясе. Жирность сельди меняется и с возрастом: чем рыба старше, тем жирность ее выше [157].

Состояние, динамика запасов

Установлено, что состояние и запасы сельди в подрайонах 26, 28, 29 определяются в основном успешностью нереста, условиями жизни молоди, промыслом, а также воздействием хищников (крупная треска и лосось), потребляющих, наряду со шпротом, мелкую сельдь преимущественно в возрасте 1—2 года [22, 102, 103, 127, 151, 191 и др.]. В подрайоне 32 на запас сельди влияют те же факторы, за исключением воздействия трески, которая начала оказывать здесь влияние только с 1978 г., тогда как до этого она в подрайоне 32 не встречалась. Значение каждого фактора меняется в зависимости от конкретной обстановки. Согласно В. К. Евтюховой и М. Н. Лишеву [326], в 1952—1959 гг., когда в подрайоне 28 запасы сельди были на высоком уровне, преобладающее влияние на них оказывали

Таблица 7.15

Биомасса нерестовых запасов сельди (% средней за 1970—1982 гг.), рассчитанная методом анализа виртуальных популяций

Подрайон, зона	Год запаса														
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
32	116	114	133	147	159	135	113	112	80	65	45	45	45	52	48
29	73	86	102	122	137	133	119	122	99	87	85	64	69	70	72
28.1—4	132	144	148	125	115	92	92	93	88	85	68	56	56	48	48
28.5	77	80	124	141	105	89	83	96	106	99	106	103	97	121	92
26	88	88	83	86	126	126	97	88	133	100	88	74	123	116	74
Всего	97	102	118	127	132	120	103	105	99	85	76	66	74	90	66

факторы внешней среды — солнечная активность и другие, а в 1955—1959 гг. — и численность родительского стада. В 1963—1973 гг., когда запасы сельди находились на среднем уровне, сильное влияние на них оказывали траловый промысел в море и воздействие трески, изымающие из общего запаса молодую сельдь, а на более ранних стадиях жизненного цикла — также численность производителей и условия жизни молоди. В 1974—1984 гг., когда запас сельди был на еще более низком уровне, но ее промысел лимитировался, основное влияние на запас сельди оказывало воздействие трески, в меньшей мере — условия нагула молоди. Во всех трех периодах прослеживается обратная связь нерестового запаса сельди с числами Вольфа, характеризующими солнечную активность. В связи с усилением влияния указанных выше факторов состояние запасов сельди во всех подрайонах отечественной рыболовной зоны Балтики в настоящее время напряженное: в подрайонах 32 и 29 с 1974 г., в подрайоне 28 с 1972 г., в подрайоне 26 с 1975 г. нерестовый запас сельди снижается (табл. 7.15). С целью предотвращения снижения запасов и активного контроля за степенью их эксплуатации в СССР с 1972 г. было введено частичное, с 1974 г. — полное лимитирование вылова сельди в соответствии с их запасами в каждом конкретном году и подрайоне моря. Поэтому в 80-х годах запасы сельди стабилизировались, хотя и на сравнительно низком уровне (см. табл. 7.15).

Промысловая и естественная смертность, промысловое изъятие

Запасы сельди во всех подрайонах Балтики эксплуатируются весьма интенсивно, промысловая смертность превышает оптимально возможную, а промысловое изъятие в 1982—1984 гг. составляло в в среднем 49 % в подрайоне 32, 32 % в подрайоне 29, 27 % в подрайоне 28 и 31 % в подрайоне 26. Это учитывается в прогнозах общедопустимого вылова сельди на ближайшую перспективу, где планируется промысловую смертность постепенно приблизить к оптимальной.

Естественная смертность сельди составляет в 1977—1984 гг. в среднем 0,3 в подрайонах 26 и 28, 0,22 в подрайонах 29 и 32, 0,24 в Рижском заливе и может меняться в зависимости от изменения численности основного потребителя сельди — трески. Так, до 1977 г., когда ее численность была относительно низкой, естественная смертность в подрайонах 29 и 32 составила 0,18, а в Рижском заливе — 0,15.

7.1.4. Методы прогнозирования запасов и уловов сельди

С 1977 г. в подрайонах 28, 29, 32, с 1984 г. в подрайоне 26 для оценки состояния, величины, степени эксплуатации запасов и расчета ОДУ сельди в отечественной рыболовной зоне Балтики по популяциям используется метод анализа виртуальных популяций (VPA). Указанная методика позволяет наиболее полно использовать информацию, собираемую по отдельным популяциям сельди. Подобная методика широко применяется в соответствующих международных организациях во всем мире. Показатель оптимальной степени эксплуатации запасов сельди оценивается по кривым уловов [85]. Расчеты выполняются на ЭВМ по программам, составленным БалтНИИРХ (г. Рига).

Количество особей по возрастным группам, выловленных в 1970—1983 гг., берется из прогнозов, составленных в предыдущие годы. Количество особей, пойманных в данном году, вычисляется на основе материалов о величинах промысловых уловов сельди, их возрастного состава и средней массы рыб по возрастным группам в траловых уловах по месяцам, в ставных неводных уловах на нерестилищах по пятидневкам.

Поскольку численность популяции осенней сельди во всех подрайонах отечественной рыболовной зоны Балтики мала (в среднем не более 10 % общего запаса), то она при расчетах не выделяется из общего запаса сельди.

В Рижском заливе расчеты ведутся для популяции сельди залива. В конечном прогнозе ОДУ в целом по заливу учитывался предполагаемый нерестовый запас морской сельди (соответственно предполагаемой величине ее запаса в зонах 28.1—4 с учетом захода морской сельди этих зон на нерест в залив) и уловы ставными неводами морской сельди, нерестующей в заливе.

Естественная смертность берется с учетом меняющейся по годам численности трески (потребляющей молодую сельдь). В качестве промысловой смертности за текущий год для полностью рекрутированных в промысловое стадо возрастных групп применяется средняя за предыдущие 7 лет промысловая смертность.

Предполагается, что для обеспечения вылова лимита сельди, прогнозируемого на следующие за текущим один-два года, промысловая смертность должна соответствовать рациональной степени эксплуатации запасов сельди, т. е. приближаться к оптимально возможной. Но для предотвращения отрицательного влияния резкого снижения интенсив-

Таблица 7.16

Численность сеголетков (0+) сельди (% средней за 1970—1982 гг., рассчитанной методом анализа виртуальных популяций)

Подрайон, зона	Год рождения поколения													
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
32	243	78	88	80	53	219	40	62	44	113	94	108	78	73
29	152	79	103	98	61	264	46	54	37	92	108	106	71	87
28.1—4	164	157	106	106	64	166	58	64	58	91	94	83	89	121
28.5	236	85	80	119	51	221	59	72	69	77	59	115	60	42
26	—	82	106	128	138	125	161	65	61	57	163	66	23	75
Средняя	—	96	97	106	73	179	73	63	54	86	104	96	64	80

ности промысла на экономику промышленности промысловую смертность, приближая ее к оптимально возможной, следует снижать постепенно.

Для расчета пополнения в прогнозируемый запас по VPA учитывается относительная численность личинок или сеголетков сельди (шт. на 30 мин лова) по данным тралово-учетных съемок, которые по формулам регрессии соответственно пересчитываются в абсолютные значения (млн шт.) по VPA. При отсутствии таких данных численность группы 0+ берется как среднее многолетнее значение из VPA. Еще неродившиеся к моменту прогноза поколения принимаются равными средним многолетним значениям. При расчете прогноза средняя масса особей по возрастным группам на прогнозируемый год принимается по соответствующим возрастным группам на уровне средней за последние два года.

Нерестовый запас рассчитывается с учетом среднего многолетнего значения половозрелых рыб в уловах по возрастным группам.

Результаты расчетов урожайности поколения и биомассы нерестовых запасов сельди приведены в табл. 7.15 и 7.16 за 1970—1984 гг.

7.2. Шпрот

7.2.1. Краткая история исследований

Систематическое изучение биологии балтийского шпрота было начато уже более 100 лет назад. Среди первых обобщающих работ можно назвать книгу Мебиуса и Гейнке «Рыбы Балтийского моря», изданную в 1883 г. [404], в которой приводятся некоторые данные по морфологии, расам, питанию и распространению балтийского шпрота.

Основателем современного направления исследований следует считать Шнейдера, опубликовавшего несколько работ, посвященных главным вопросам биологии шпрота. Первая касающаяся шпрота статья этого автора увидела свет в 1894 г. в журнале «Вестник рыбопромышленности» [211]. В 1895 г. вышла статья Шнейдера об условиях существования балтийского шпрота у берегов Эстляндии [472]. В 1900 г. Шнейдер и Левандер [466] опубликовали результаты изучения питания и размножения шпрота в Финском заливе. Годом позже вышла еще одна работа о размножении шпрота в Финском заливе [462].

Используя как морфологические признаки, так и экологические особенности балтийского шпрота, Шнейдер в 1904 г. выделил его в самостоятельный подвид [463]. В 1908 г. ученый обобщил имевшиеся к тому времени данные по биологии шпрота в своей работе «Сельдевые Балтийского моря» [464]. Особенно важно, что и в настоящее время не потеряли актуальности выводы автора, касающиеся популяционной структуры, распространения и распределения, сроков нереста, вертикального и горизонтального распределения икринок, различий в диаметре икринок между районами Балтийского моря, развития и распределения личинок, а также особенностей роста балтийского шпрота.

Следует добавить, что Шнейдер [464] вслед за Дженкинсом [331], был одним из первых, кто использовал отолиты для определения возраста шпрота.

Из исследований, выполненных в 20—30-е годы, можно отметить работы Хейдриха [312], Хессле [318] и Хёглунда [321], посвященные изучению шпрота на ранних стадиях развития, а также промыслу этой рыбы. Интересна статья Диксона [280], анализирующего польские уловы шпрота в 1934—1936 гг.

В 40-е годы увидела свет статья Моландера [405], в которой автор связывает распределение шпрота с особенностями температурного режима моря. Тогда же выходит обстоятельная работа Маньковского [383] о питании шпрота в Средней Балтике и статья Данневига [275] по морфометрии шпрота района Бельтов.

В 50—60-е годы в центре внимания оказываются проблемы запаса промысла и промысловой гидрографии балтийского шпрота. Можно назвать работы Моландера [406], Эльвертовского [291, 292], И. И. Николаева [132], Линдквиста [370], В. А. Шкицкого [207] и др. В работах Данневига [275], Велдре и Хелл [499] и Линдквиста [372] с популяционистских позиций изучается морфометрия шпрота. В 1950 г. Поулсен [446] публикует статью, в которой касается проблем промысла, нереста, миграций, роста, зараженности паразитами и популяционной структуры шпрота района проливов Малый Бельт и Большой Бельт. Следует отметить также статьи И. И. Казановой [73] о биологии и промысле шпрота в Северной Балтике, Е. Г. Петровой [154] о плодовитости и созревании шпрота, Миллера [402] о суточном ритме питания шпрота, В. А. Шкицкого [207, 209] о нересте и возрастной структуре шпрота, В. А. Шкицкого и Я. П. Ноздрина [210] о суточных вертикальных миграциях шпрота.

70—80-е годы — это период международного сотрудничества в изучении балтийского шпрота. Исследования распространяются на все основные районы Балтийского моря. Развиваются новые направления исследований.

Начиная со статей Линдквиста с соавторами [234, 374] и Фалька с соавторами [254], продолжают публиковаться результаты использования гидроакустических методов для установления величины и распределения запасов шпрота в Балтийском море. Работы Хаканссона с соавторами [233], Фалька с соавторами [254] и другие являются результатом международного сотрудничества в этой области.

В это время популяционным проблемам балтийского шпрота посвящены работы А. В. Селецкой [175, 176], Н. П. Бирюкова [23], А. Г. Поливайко [158], Р. А. Апса [7], Э. А. Оявеера [145, 426] и др. В популяционных исследованиях начинают использоваться новые методы: в статьях Р. А. Апса [6], Р. А. Апса и И. Э. Муллата [10] для классификации шпрота используются методы многомерной статистики и ЭВМ, в работах Р. А. Апса, Р. Х. Таннера [11] и И. Р. Велдре, Л. А. Велдре [31] изучается полиморфизм белков мышц и крови шпрота методом гелевого электрофореза; в статьях Линдквиста [78], Р. А. Апса с соавторами [12] и других устанавливается существование естественных меток в структуре отолитов шпрота.

В этот период проводятся интересные исследования по шпроту на ранних стадиях развития, направленные на установление причин колебания численности поколений этой рыбы. В этой связи следует отметить работы следующих авторов: Г. Б. Грауман [44, 45, 49, 52], Г. Крюгера [96], Линдблома [68, 369], Шеблома и Парманне [485, 486], Парманне, Шеблома [436, 437] и др.

Интенсивная, регулируемая на международном уровне эксплуатация запасов потребовала ответов на вопросы: сколько, где и когда ловить шпрота. На эти вопросы помогают ответить исследования Э. А. Оявеера, М. В. Калейса [150], И. Р. Велдре, А. Г. Поливайко [32], О. Рехлина [168], Э. А. Оявеера, И. Р. Велдре [149], Э. А. Оявеера с соавторами [152], Р. А. Апса [2, 8, 9, 12], Е. М. Плудона [156], Ф. Г. Швецова, М. В. Калейса [199], Ф. Г. Швецова [254], Ф. Г. Швецова с соавторами [200] и др.

В настоящее время основное внимание исследователей обращено на изучение связей балтийского шпрота с абиотической и биотической средой, а также на установление роли этой рыбы в экосистеме Балтийского моря.

7.2.2. Биология

Систематическая принадлежность и внутривидовая дифференциация

Балтийский шпрот *Sprattus sprattus balticus* [468] — это балтийский подвид европейского шпрота *Sprattus sprattus L.* (род *Sprattus,* сем. Clupeidae), населяющего моря Западной и Южной Европы от Гибралтарского пролива до Лофотенских островов, Балтийское море, северную часть Средиземного моря и Черное море [173].

В пределах ареала европейский шпрот распадается на популяции. Балтийский подвид шпрота можно рассматривать как одну из таких популяций, приспособленную к существованию в условиях пониженной солености Балтийского моря. Заметному смешению популяций Балтийского и соседнего Северного морей препятствует значительный градиент физико-химических характеристик среды обитания в районе Бельтов [7].

Вопрос о структуре популяции балтийского шпрота остается до последнего времени не решенным. Следуя за Шнейдером (1908), большинство авторов сходится во мнении, что балтийский шпрот распадается на отдельные локальные группировки. Расхождения проявляются лишь в том, сколько этих группировок и исходя из каких принципов следует их разграничивать [7, 11, 23, 132, 145, 158, 175, 176, 275, 372, 446, 499].

Наиболее вероятно, что популяция балтийского шпрота состоит из нескольких субпопуляций, существование которых обусловлено привязанностью этой рыбы к отдельным наиболее продуктивным районам Балтийского моря. Международный совет по исследованию моря (МСИМ), основываясь на имеющихся данных, выделил три единицы управления запасами балтийского шпрота (подрайоны 24—25, 26—28 и 29—32).

Структура популяции, рост и половое созревание

Возрастная структура популяции является одной из ее важных экологических характеристик, связанной как с рождаемостью, так и со смертностью. Наиболее значительную часть быстрорастущих популяций составляют молодые особи, для стабильных популяций характерно более равномерное распределение особей по возрастным группам, в популяциях с уменьшающейся численностью значительную часть составляют более старые особи. Детальное изучение возрастной структуры и ее изменчивости — ключевой момент в анализе популяционной динамики рыб.

Основной характерной чертой возрастной структуры балтийского шпрота является доминирование какой-либо одной возрастной группы. Такое доминирование одного поколения проявляется, например, в возрастной структуре промысловых уловов шпрота в Финском заливе для поколений 1972 и 1975 годов рождения (рис. 7.8) [8, 32, 168].

Сезонная динамика возрастной структуры балтийского шпрота зависит от численности формирующегося нового поколения. В годы с неурожайными поколениями возрастная структура относительно постоянна в течение всех сезонов. В годы, когда формируются урожайные поколения, возрастная структура изменяется — одно доминирующее поколение сменяется другим.

Иллюстрацией к сказанному может служить сезонная динамика возрастной структуры промысловых уловов шпрота в Финском заливе. Шпрот вступает в промысел в августе—сентябре на втором году жизни. Так, например, в 1975 г. возникло урожайное поколение шпрота, которое включилось в промысел в 1976 г., основательно изменив возрастную структуру уловов. Возрастные группы шпрота, относительно многочисленно представленные в возрастной структуре уловов в первой половине года, как бы «растворились» в августовском богатом пополнении (рис. 7.9). При возникновении неурожайных поколений, например в 1974 г., доминирование предыдущего урожайного поколения сохраняется по сезонам в 1975 г. (рис. 7.10).

Для балтийского шпрота характерно постоянное наличие в возрастной структуре старших возрастных групп и высокий предельный возраст отдельных особей. Например, с 1973 по 1979 г. в возрастной структуре уловов шпрота в Финском заливе

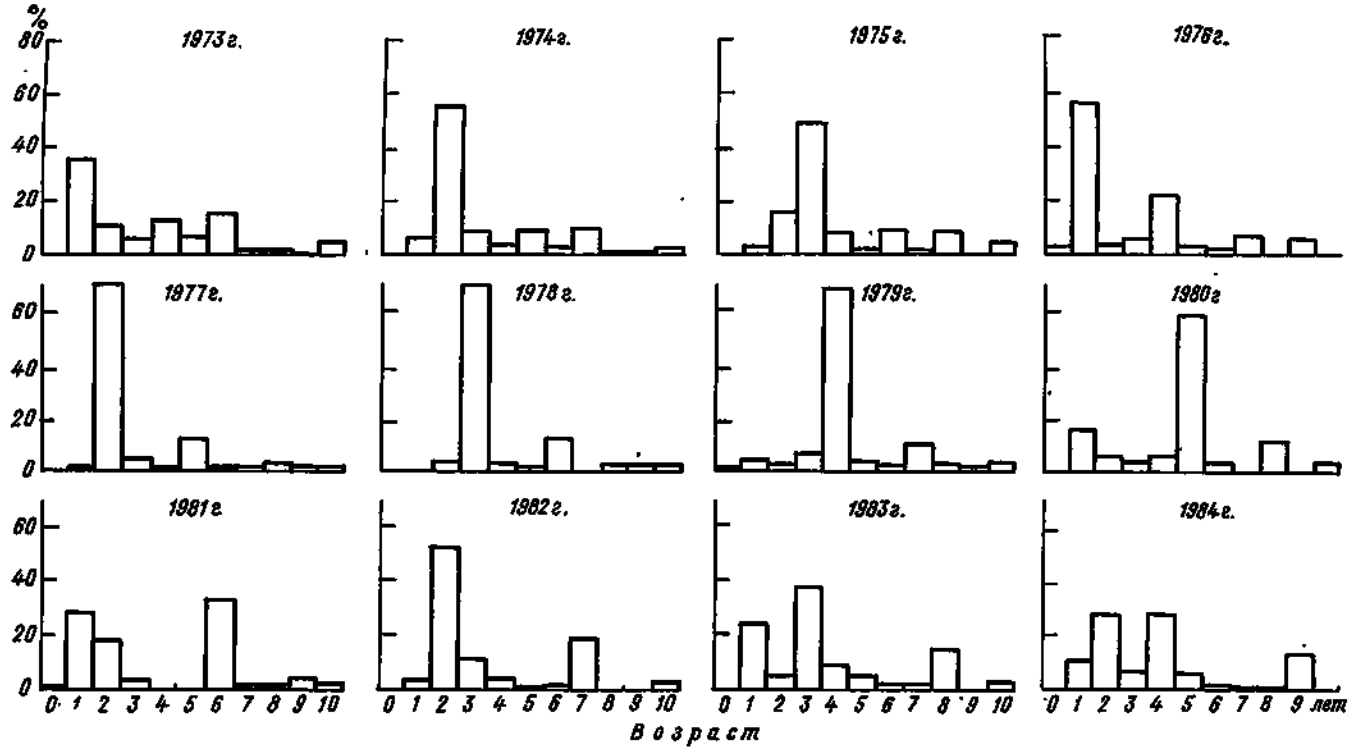


Рис. 7.8. Возрастная структура (%) промысловых уловов шпрота в Финском заливе в 1973—1984 гг.

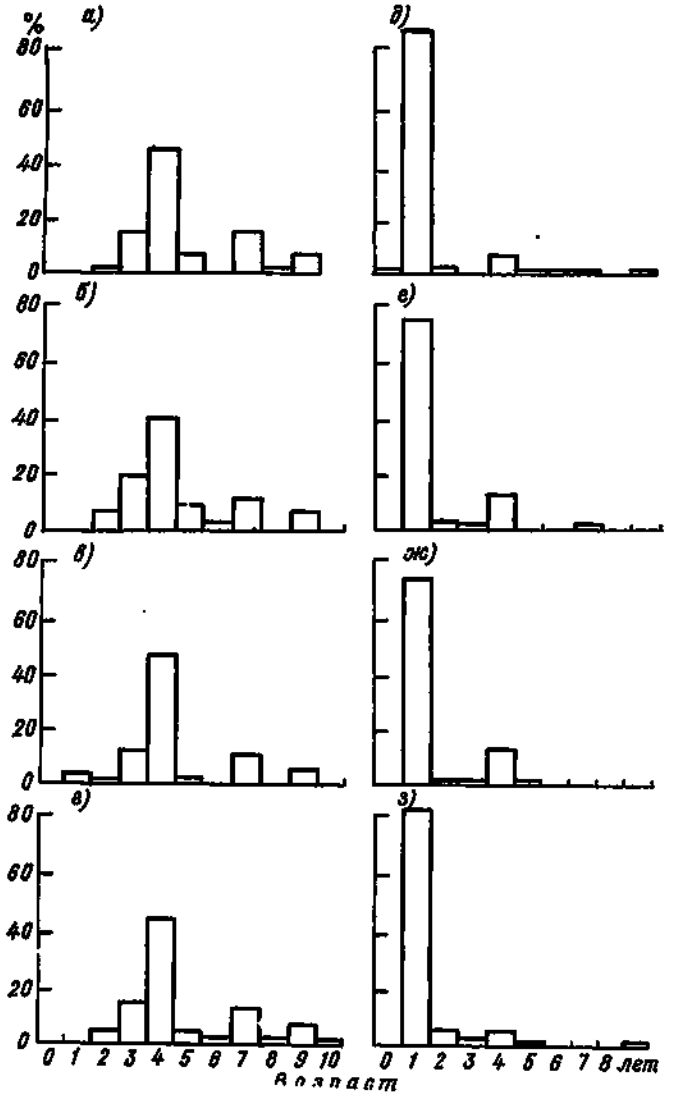


Рис. 7.9. Возрастная структура (%) траловых уловов шпрота в Финском заливе в январе (*а*), феврале (*б*), апреле (*в*), мае (*г*), сентябре (*д*), октябре (*е*), ноябре (*ж*) и декабре (*з*) 1976 г.

было в среднем 5,6 % пятигодовиков, 6,5 % шестигодовиков, 4,3 % семигодовиков, 1,9 % восьмигодовиков, 1,1 % девятигодовиков и 2,1 % рыб возрастом 10 лет и более. Не очень редки случаи, когда в уловах встречается шпрот возрастом до 17 лет.

Для шпрота Южной Балтики, видимо, характерны меньшая доля старших возрастных групп в возрастной структуре и меньший максимальный возраст, который, например по данным Я. Эльвертовского, составляет 8—9 лет.

Линейный рост и рост массы балтийского шпрота удовлетворительно описываются уравнением Берталанфи, т. е. эмпирические и рассчитанные значения средних длин и масс по возрастам достаточно хорошо совпадают. Например, уравнением Берталанфи описан рост шпрота в Северо-Восточной Балтике и в Финском заливе, в средней части Балтики, в Гданьском и Борнхольмском районах, в Кильской бухте.

Асимптотические длина и масса являются параметрами, позволяющими охарактеризовать рост шпрота по отдельным районам Балтийского моря и проследить многолетние тенденции изменений в росте.

К сожалению, в настоящее время в литературе не удается найти хорошо сравнимых значений асимптотических длины и массы балтийского шпрота по всем районам Балтики. Все же создается впечатление, что предельные длина и масса шпрота в южной части моря больше, чем в северной.

Такое явление объясняется, вероятно, тем, что Северная Балтика и Финский залив представляют собой одну из краевых частей ареала шпрота с резко континентальным, а зачастую и экстремальным для шпрота термическим режимом. В Южной Балтике, где термический режим менее континентален, шпрот достигает больших предельных длины и массы. Какую-то роль, возможно, играют также различия в солености воды.

Многолетнюю тенденцию изменений в росте балтийского шпрота можно показать на примере

увеличения асимптотических длины и массы шпрота в Финском заливе в 1962—1982 гг. (рис. 7.11). Асимптотические длина и масса шпрота увеличились за этот период в Финском заливе соответственно с 12,0 до 13,5 см и с 10,1 до 14,9 г. Аналогичные изменения в росте установлены у шпрота в Средней Балтике. Описанные изменения в росте вызваны, вероятно, улучшением условий нагула, связанным как с заметным уменьшением численности шпрота в 1962—1982 гг., так и с влиянием все возрастающей эвтрофикации Балтики.

Балтийский шпрот может быть отнесен к рыбам, быстро достигающим своих предельных длины и массы.

В настоящее время максимальная длина шпрота в Северо-Восточной Балтике достигает 16 см, а масса — 25 г.

Хорошо известны связанные с полом различия в размерах рыб. В литературе есть указания и на половой диморфизм балтийского шпрота. Так, Велдре и Хелл [499] пишут, что статистически значимые различия наблюдаются лишь в наибольшей высоте тела самок и самцов шпрота в Рижском заливе. Велдре добавляет, что у пятигодовиков шпрота в Рижском и Финском заливах горизонтальный диаметр глаза у самцов больше, чем у самок. А. Селецкая отмечает связанные с полом незначительные различия у шпрота в Южной Балтике: самцы и самки различаются лишь по наибольшей высоте головы. А. Поливайко также описывает связанные с полом различия в размерах шпрота Южной и Средней Балтики.

Показано, что в Северо-Восточной Балтике, в Рижском и Финском заливах самки шпрота в среднем на 5—10 мм длиннее самцов.

Установлены четкие различия в параметрах роста самцов и самок шпрота в Финском заливе. В 1980—1981 гг. в промысловых уловах шпрота в Финском заливе асимптотическая длина у самок была на 4 мм больше, чем у самцов. Асимптотическая масса у самок превышала таковую у самцов на 1,3 г.

Показано также, что значения коэффициентов Броуди у самцов выше, чем у самок. Это значит, что самцы быстрее самок достигают своих предельных длины и массы. Самки же в конечном счете становятся в среднем длиннее и тяжелее самцов.

Рост балтийского шпрота имеет ярко выраженный сезонный характер. Сезонность роста может быть показана на примере изменений средних длины и массы по двухмесячным периодам шпрота поколения 1975 г. в Финском заливе в 1977—1979 гг. в возрасте 2—4 года (табл. 7.17, 7.18). Видно, что наиболее интенсивный линейный рост и рост массы шпрота происходит в летне-осенний период, а в зимне-весенний наблюдается задержка линейного роста и заметное уменьшение массы. В летне-осенние месяцы наблюдается также наиболее быстрый рост годовиков шпрота. У шпрота Юго-Восточной и Восточной Балтики наступление половой зрелости в массе происходит на 2—3-м году жизни, доля зрелых годовиков в уловах незначительна.

В Кильской бухте шпрот достигает половой зрелости в возрасте 1 года, в Финском заливе — 3 лет.

Созревание различных поколений шпрота связано с темпом роста молоди, так как созревание наступает при определенной длине, которая может быть достигнута в разном возрасте. Самцы созревают раньше самок, массовое созревание самцов

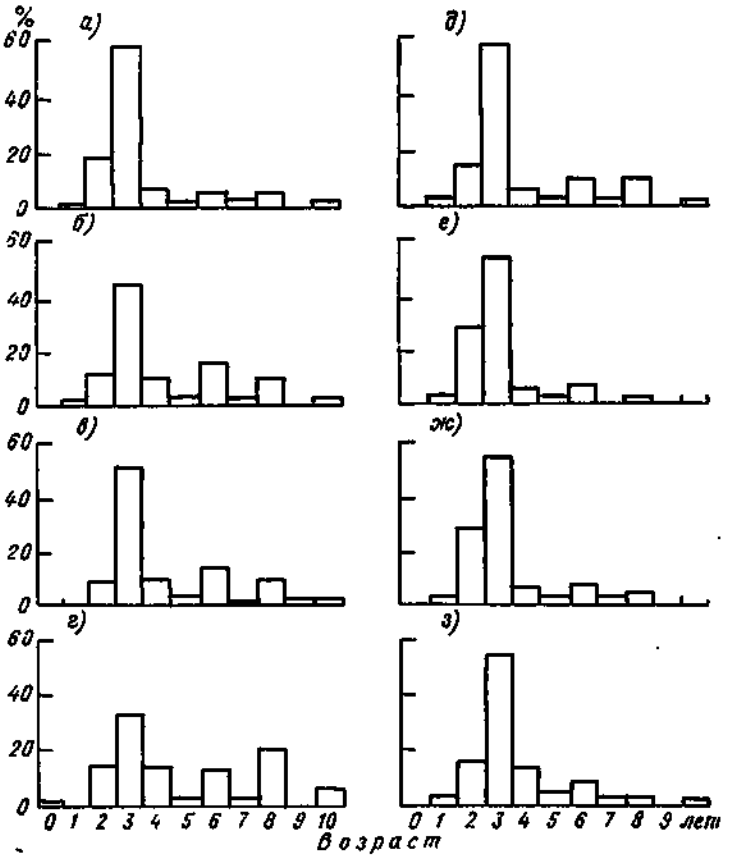


Рис. 7.10. Возрастная структура (%) траловых уловов шпрота в Финском заливе в январе (*а*), феврале (*б*), марте (*в*), апреле (*г*), сентябре (*д*), октябре (*е*), ноябре (*ж*) и декабре (*з*) 1975 г.

наблюдается при длине 11,0—11,5 см, самок — 11,0—12,0 см [161].

Сроки созревания взрослых рыб, а следовательно, сроки начала нереста находятся в зависимости как от района моря, так и от возраста рыб. Старшевозрастные особи созревают и нерестятся раньше. Так, по данным А. Г. Поливайко [159], в апреле в Гданьском заливе около 50 % улова составляли незрелые самки на II и III стадиях развития гонад в возрасте 2—4 лет, самки 5 лет и старше в основной массе нерестились (табл. 7.18).

Питание и пищевые взаимоотношения

Балтийский шпрот — планктонофаг, эврифаг, обладает высокой пищевой активностью и пластичностью (от 64 до 71,3 %). Наиболее пластичным является молодой шпрот размером 9,6—10,5 см (71,33 %).

В его пищевой спектр входят *Copepoda* — 8 видов, *Cladocera* — 3, *Mysidacea* — 2, *Amphipoda* — 1, *Chaetognata* — 1 и икра рыб.

Динамика состава пищи, накормленности шпрота тесно связана с особенностями сезонного развития зоопланктона и физиологическим состоянием рыб, одним из основных показателей которого является жирность.

Весной (май) по мере прогрева вод и с началом массового нереста распределение шпрота меняется. Поскольку у шпрота длительный период размножения (с марта по август) [48], икрометание порционное и происходит в придонных и поверхностных

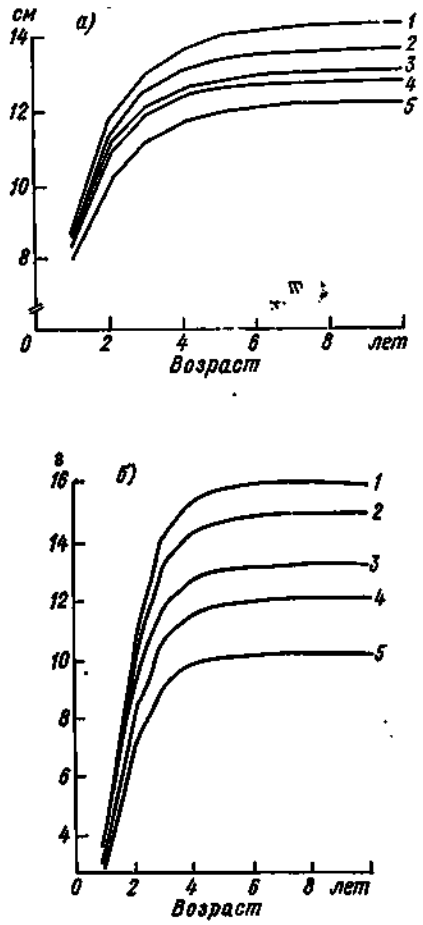


Рис. 7.14. Кривые роста длины (*а*) и массы (*б*) шпрота в Финском заливе, рассчитанные по уравнению Берталанфи для периодов 1983—1984 (*1*), 1976—1982 (*2*), 1973—1977 (*3*), 1967—1972 (*4*), 1962—1966 гг. (*5*).

слоях, то в придонных слоях он питается холодноводным псевдокалянусом, в средних и верхних — переходит на потребление бореальных копепод и солоноватоводных кладоцер (акарция, темора, подон, эвадна) (рис. 7.12). Накормленность рыб в этот период высокая и колеблется от 17 до 57,7 ‰. Но в связи с усилением генеративных процессов, на развитие которых в первую очередь расходуется жир, жирность шпрота снижается в 1,5 раза по сравнению с зимой, однако благодаря интенсивному питанию у него сохраняется баланс жировых запасов (содержание липидов в мышцах составляет 50 ‰ по массе сырого вещества), который обеспечивает вымет и созревание новых порций икры.

В июле, сентябре шпрот активно питается. Накормленность рыб высокая и меняется от 26 до 81,6 ‰. Успешному нагулу, который происходит в слое 0—30 м, благоприятствуют сравнительно высокие биомасса зоопланктона (350—670 мг/м³) и температура воды (13,6—17,1 °С). Более высокая накормленность (49,3—81,6 ‰) шпрота наблюдается в годы с повышенной температурой воды.

В связи с уменьшением теплозапаса балтийских вод на 1 °С, особенно в последние годы (1980—1984 гг.), произошло изменение кормовой базы летом. Значительное увеличение численности босмины, акарции, теморы в планктоне привело к усилению роли этих ракообразных в питании шпрота. Сокращение численности тепловодного центропагеса вызвало почти исчезновение его из рациона шпрота (см. рис. 7.12).

В начале летнего нагула (июль) возрастание накормленности происходит параллельно увеличению количества жира на внутренностях и в мышцах рыб. Максимум жирности (110—127 % по массе) у балтийского шпрота отмечен в конце лета (сентябрь).

Осенью (октябрь, ноябрь) с началом осенне-зимнего охлаждения поверхностных вод промысловые скопления шпрота опускаются в средние, затем в придонные слои воды. В этот период питание шпрота сильно ослаблено. Питается теморой, акарцией. Его накормленность не превышает 3 ‰. При плохом откорме летом (11,1 ‰) нагул шпрота продолжается и осенью, что наблюдалось в 1976 г. (17,2 ‰).

В зимний период (январь—март) шпрот питается той пищей, которая многочисленна в слое его обитания. Слой обитания определяется гидрологическими условиями конкретного года. В холодные зимы 1976—1980 гг. (сумма средних суточных отрицательных температур воздуха в Лиепае составила 360 °С) шпрот малоподвижен, образует плотные зимовальные скопления на глубинах (70—90 м), его накормленность не превышает 10 ‰. В мягкие зимы 1973—1975 гг. (сумма средних суточных отрицательных температур воздуха в Лиепае

Таблица 7.17

Выборочные средние длина и масса шпрота Финского залива поколения 1975 г. в 1977—1979 гг. (в возрасте 2—4 года) по двухмесячным периодам

Период	Средняя длина, мм			Средняя масса, г		
	1977	1978	1979	1977	1978	1979
Январь—февраль	106	119	126	8,5	11,4	13,1
Март—апрель	108	120	127	7,9	11,0	13,0
Май—июнь	110	122	129	8,8	11,6	13,8
Июль—август	116	125	128	10,8	13,7	14,0
Сентябрь—октябрь	119	125	130	12,2	13,8	15,2
Ноябрь—декабрь	120	127	130	12,0	13,6	14,6

Таблица 7.18

Зрелость самок различных возрастных групп шпрота в Гданьском заливе в апреле и июне 1969 г.

Месяц	Возраст	Стадия зрелости				
		II	III	IV	V	VI
Апрель	2	15,6	37,6	10,4	36,4	—
	3	11,1	44,4	11,1	33,3	—
	4	—	25,0	—	75,0	—
	5	—	—	33,3	33,3	33,4
	6 и более	—	—	—	50,0	50,0
Всего		13,8	35,4	10,3	38,0	2,5
Июнь	2	22,2	13,3	0,6	11,3	52,6
	3	—	—	6,6	—	93,4
	4	—	—	—	—	100,0
	5	—	—	—	20,0	80,0
	6 и более	—	—	—	—	100,0
Всего		18,6	11,2	1,1	10,6	58,5

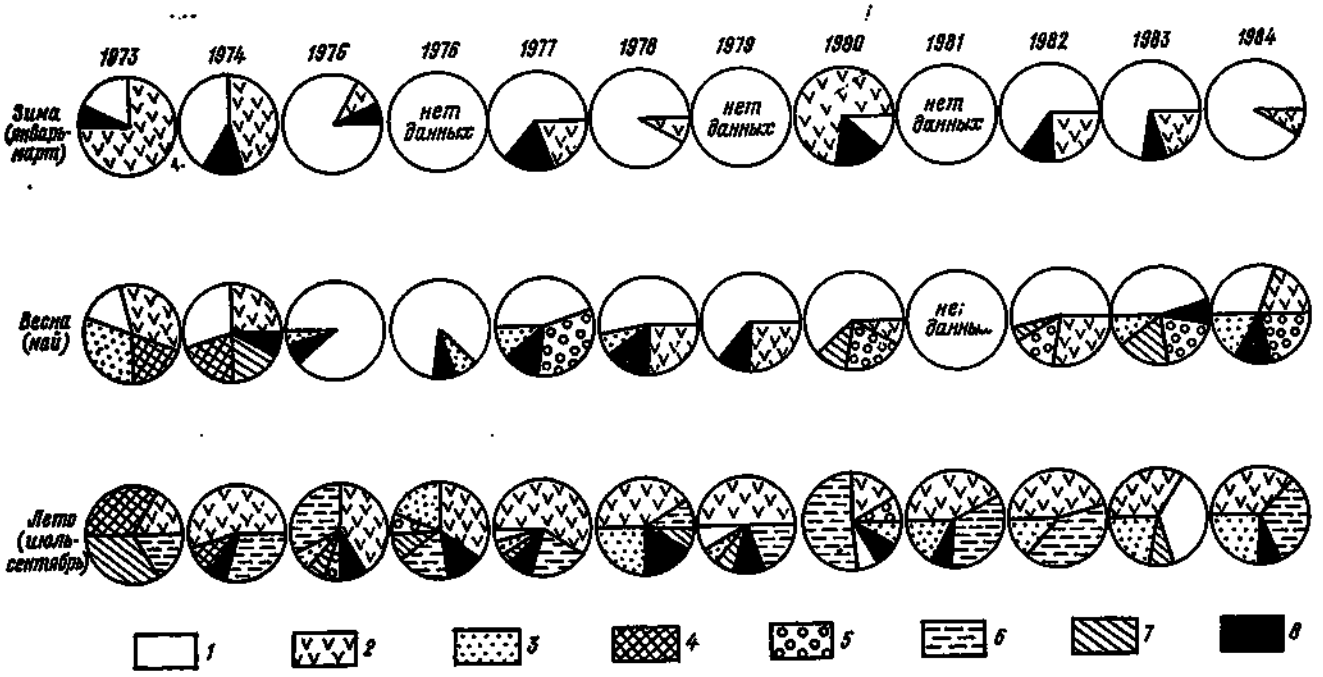


Рис. 7.12. Межгодовая и сезонная динамика состава пищи шпрота в Балтийском море (1973—1984 гг.).
1 — Pseudocalanus elongatus; 2 — Temora longicornis; 3 — Acartia spp.; 4 — Centropages hamatus; 5 — Evadne nordmanni; 6 — Bosmina coregoni umaritima; 7 — Podon sp.; 8 — прочие.

составила 104 °С) шпрот держится более рассеяно в толще воды, активен, его интенсивность питания высокая и колеблется от 14,4 до 59,0‰. Основу пищи шпрота в зимний период составляют псевдокалянус и темора (см. рис. 7.12).

Интенсивное потребление пищи шпротом в теплые зимы и рациональный расход энергии в холодные способствует тому, что его жирность почти всегда достигает среднего уровня (79,8‰ по массе сырого вещества), который обеспечивает нормальное протекание зимовки.

Сравнивая характер питания шпрота с суточным вертикальным распределением зоопланктона, можно отметить, что зимой и весной он активно питается в слое 0—100 м, летом — в слое 0—30 м, осенью — в слоях 30—50 и 50—100 м. Из видов, составляющих планктон верхнего яруса 0—50 м, шпрот избирает преимущественно копепод и кладоцер, но избегает коловраток, которые в планктоне весной и осенью многочислены. Излюбленным объектом питания шпрота в условиях обеспеченности пищей (июль, сентябрь) является темора [200]. Состав пищи шпрота в возрасте от 1 до 6 лет (8,5—14,0 см) во все сезоны отличается незначительно, что объясняется сходством экологических мест обитания шпрота разных размеров и одинаковой доступностью кормовых объектов. Индексы наполнения желудков с возрастом закономерно уменьшаются (табл. 7.19). Самцы и самки шпрота питаются с одинаковой интенсивностью.

В летний, нагульный период (июль, сентябрь) у шпрота выявлена четкая суточная ритмика питания (рис. 7.13). У него отмечен один максимум и один минимум потребления пищи, причем минимум приходится на утреннее время (4—12 ч), а максимум — на вечернее (18—23 ч). В первой половине дня наблюдается увеличение количества питающихся рыб и постепенное увеличение индексов наполнения желудков. В вечернее время активность питания и накормленность достигают максимума, после чего происходит спад этих показателей и в утренние часы они имеют минимальные значения. Анализируя поведение шпрота в течение суток и динамику его накормленности, можно отметить, что основной откорм шпрота происходит в тот период, когда шпрот держится в косяках и поднимается из нижних слоев в средние и верхние. С рассеиванием косяков питание рыб прекращается и начинается переварива-

Таблица 7.19

Состав пищи шпрота разной длины (%) и его накормленность в Балтийском море в марте 1975 г.

Состав пищи	Длина, см				
	8,6—9,5	9,6—10,5	10,6—11,5	11,6—12,5	12,6—13,5
Pseudocalanus elongata	7,81	99,00	70,20	89,90	96,30
Temora longicor.	2,19	0,35	0,94	8,27	3,51
Acartia spp.	—	0,65	2,44	0,53	—
Copepoda	—	—	25,0	—	—
Centropages h.	+	+	1,44	1,29	0,15
Индекс наполнения желудка, ‰	159,30	42,80	22,90	17,20	4,70
Количество пустых желудков, ‰	—	9	30	35	42
Количество исследованных желудков, шт.	15	33	86	82	60

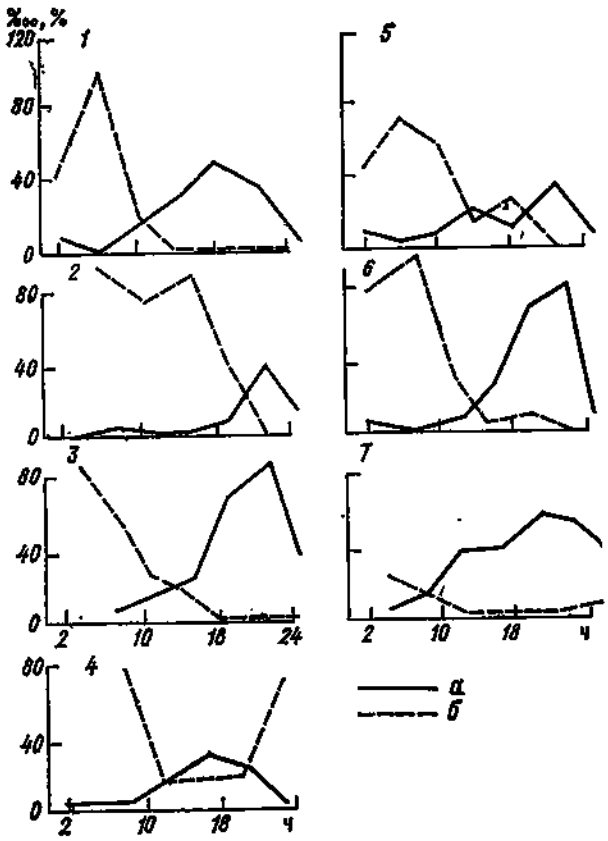


Рис. 7.13. Интенсивность питания шпрота в Балтийском море на суточных станциях в нагульный период 1976—1982 гг.

а — средний индекс наполнения желудков, ‰; *б* — количество пустых желудков, %; *1*—*7* — номера суточных станций.

ние пищи. Образование косяков в утренние часы совпадает с минимумом накормленности.

Суточные рационы (в июле, сентябре), определенные по методу А. В. Коган (1963), на отдельных суточных станциях изменялись от 1,05 до 4,09 % массы тела. При этом прослеживается закономерное снижение рациона при увеличении количества жира на внутренностях рыб. Исключением является шпрот, выловленный в Клайпедской промысловой зоне, имеющий при среднем количестве жира высокий рацион (4,09 %). Объясняется это, видимо, тем, что основу уловов составляли молодые отнерестившиеся рыбы длиной 10,6—11,5 см, активность питания которых выше, чем у старшевозрастных рыб длиной 11,6—15,0 см. Значение основных промысловых подрайонов 26 и 28 Балтийского моря для нагула шпрота в различные сезоны года неравноценно.

Материал, полученный нами на протяжении ряда лет (1975—1978, 1982—1984 гг.), позволяет заключить, что накормленность шпрота в зимний период выше в более теплом юго-восточном подрайоне (26).

В весенний период накормленность зависит от сроков и интенсивности размножения рыб. В начале нерестового периода накормленность шпрота выше в восточном подрайоне (28), где нерест рыб начинается позже, а во вторую половину, когда максимум нереста смещается в Восточную Балтику, — в юго-восточном подрайоне.

В летний нагульный период шпрот активнее питается в более теплом и кормном юго-восточном подрайоне (табл. 7.20).

Исключение составил летний период 1983 г., когда шпрот в обоих подрайонах питается с одинаковой интенсивностью. Объясняется это тем, что биомасса кормовых организмов в подрайонах 26 и 28 почти не различалась (511 и 526 мг/м³ соответственно).

Воспроизводство

Балтийский шпрот принадлежит к числу порционно-нерестующих рыб с длительным периодом нереста, выметывающим пелагическую икру.

Плодовитость шпрота колеблется в пределах 5768—34 290 икринок [154] и зависит от размеров, массы и возраста самок. По данным А. Г. Поливайко [159], плодовитость шпрота Гданьского залива меняется в зависимости от возраста (табл. 7.21).

Таблица 7.21

Плодовитость различных возрастных групп шпрота Гданьского залива в апреле—мае 1969 г.

Возраст, лет	2	3	4	5	6
Плодовитость, шт.	13 626	14 365	16 358	18 782	20 065

Индивидуальная плодовитость шпрота в пределах одного поколения зависит также от физиологического состояния рыб, в частности от показателя калорийности мышц, который в свою очередь зависит от условий и эффективности летне-осеннего нагула каждой отдельной особи.

За весь нерестовый период шпрот выметывает от 7 до 10 порций икры [154, 159, 312], по данным В. А. Шкицкого [208] — 4 порции икры. Среднее количество икринок в одной порции колеблется от 1467 у двухгодовиков до 2576 у шестигодовиков.

Таблица 7.20

Накормленность шпрота (‰) в основных подрайонах 26 и 28 Балтийского моря в 1975—1978 и 1982—1984 гг.

Сезон	1975 г.		1976 г.		1977 г.		1978 г.		1982 г.		1983 г.		1984 г.	
	26	28	26	28	26	28	26	28	26	28	26	28	26	28
Зима (январь—март)	47,1	11,2	3,2	13,0	19,1	1,1	19,4	3,9	9,5	6,6	3,0	20,0	53,2	4,1
Весна (май—июнь)	22,4	138,0	21,4	0,7	33,7	19,0	17,8	34,5	17,9	31,3	14,0	46,0	43,4	21,0
Лето (июль—сентябрь)	40,4	31,7	10,6	6,2	42,1	7,8	29,2	25,1	27,9	22,3	54,0	53,6	31,7	28,2

Таблица 7.22

Размерный состав икры шпрота (%) по районам моря в мае—июне в придонном и поверхностном слоях

Район	Слой	Диаметр икры в делениях окуляр-микрометра								
		47	49	51	53	55	57	59	61	63
Борнхольмский	Придонный	1,6	4,6	17,6	37,0	20,9	11,8	3,5	1,9	—
	Поверхностный	—	—	—	—	13,6	40,9	21,9	17,2	6,4
Готландский	Придонный	—	—	1,9	3,9	14,5	16,5	29,7	25,8	7,7
	Поверхностный	—	—	—	—	6,3	16,6	27,0	33,8	16,3

Порции икры шпрота различны в начале и в конце нерестового периода и зависят от условий среды, при которых происходит формирование каждой отдельной порции, и прежде всего от обеспеченности пищей.

Шпрот, являясь эвригалинной рыбой, освоил для нереста разные экосистемы: весной глубинные придонные слои, летом поверхностные, существенно различающиеся по температурному, солевому, кислородному режимам и освещенности. Весенне-нерестующий шпрот адаптирован к нересту при температуре воды 4—8 °С и солености 10—22‰, летне-нерестующий — соответственно 10—17 °С и 5—8‰. Различия в солености и температуре воды существенно влияют на диаметр икры шпрота, и в поверхностном слое при низкой солености воды она значительно крупнее, чем в придонном (табл. 7.22). В пределах Балтийского моря в придонных слоях также наблюдается изменение диаметра икры с юго-западных к северо-восточным районам; по мере уменьшения солености воды с 22 до 10—12‰ средний диаметр увеличивается от 1,2 до 1,6 мм. Увеличение объема икры обеспечивает лучшую ее плавучесть в опресненных слоях и является важным примером приспособления бореального шпрота к размножению в более холодных и менее соленых водах Балтики по сравнению с другими районами обитания.

Длина вылупившихся предличинок шпрота значительно варьирует в зависимости от температуры воды при инкубации. В придонных слоях предличинки шпрота выклевываются длиной 3,2—4,0 мм (температура воды 4—7 °С), в поверхностных слоях их длина меньше — 2,5—3,0 мм (10—17 °С). Предличинки имеют большой желточный мешок, глаза не пигментированы и пигмент появляется к моменту полного рассасывания желточного мешка. Развитие личинки от вылупления до метаморфоза длится несколько месяцев, в течение которых происходят кардинальные изменения в строении тела и органов. У личинки с длины 9 мм начинается дифференциация лучей в спинном плавнике. Появление анального плавника отмечено при длине 11,0—12,5 мм и заканчивается к 18—20 мм. Личиночное развитие шпрота обычно заканчивается при длине 24—28 мм.

Сроки нереста шпрота и его продолжительность по районам и годам подвержены большим колебаниям и определяются в большой степени как региональными различиями (большой протяженностью моря с юга на север), так и условиями преднерестового нагула, качественным составом производителей. Нерест весьма растянут и продолжается с февраля по август. Однако в южных и юго-западных районах (более теплых) он начинается раньше (с февраля—марта), по мере продвижения на северо-восток и север нерест смещается на более поздние сроки (апрель—май). Таким образом, в южных и юго-западных районах он продолжается 6—7 мес, на северо-востоке его длительность сокращается до 3—3,5 мес [47, 48, 52].

Шпрот в Балтийском море имеет широкий нерестовый ареал от Кильской бухты до Финского залива [45, 47, 73, 211].

Величина нерестового ареала шпрота очень изменчива по районам, месяцам и годам, что определяется протяженностью нерестилищ с юга на север, большой изменчивостью гидрологического режима, главным образом температурным и кислородным режимами (для придонного нереста).

В условиях Балтики температурный фактор особенно влияет на распределение шпрота и его созревание в период нереста. Икра распространена в тех горизонтах, где температура воды была не ниже 4 °С. Так, в феврале нерест раньше всего начинается в юго-западных и южных районах в узкой глубоководной придонной толще над глубинами более 90 м и икры еще мало. В марте—апреле нерестовая площадь расширяется до Ирбенского пролива и в пределах каждого нерестилища икра распределяется уже над широкой зоной глубин между изобатами 70 и 160 м, нерестилища изолированы друг от друга (рис. 7.14). Таким образом, в весенний период шпрот имеет ограниченный ареал, так как температурный барьер на границе 60—70 м служит препятствием для распространения икры в вышележащие слои (за пределы 60-метровых глубин) с температурой воды менее 4 °С. В конце мая, июне с прогревом поверхностной толщи (более 8 °С) икра шпрота появляется в поверхностных слоях, ареал ее распространения значительно расширяется и нерестилища соединяются между собой, граница нереста простирается до Финского залива и икра встречается как в открытых, так и прибрежных районах. В момент разгара икрометания (июнь—июль) икра распространена на большой площади от открытых до прибрежных районов и охватывает зоны глубин от 20 до 170 м. В августе уменьшение зоны глубин нерестилищ (от 60 до 130 м) вызывается сокращением численности нерестового шпрота и икрометание заканчивается, как правило, одновременно по всей акватории (от Борнхольмского района до Финского залива) как над большими, так и над малыми глубинами [47].

Плотность скоплений икры и личинок шпрота в пределах нерестилищ меняется по глубинам и зависит от изменений сезонных и гидрологических условий. В весенний период прослеживается во всех районах моря общая тенденция к уменьшению их количества от больших глубин к меньшим. На-

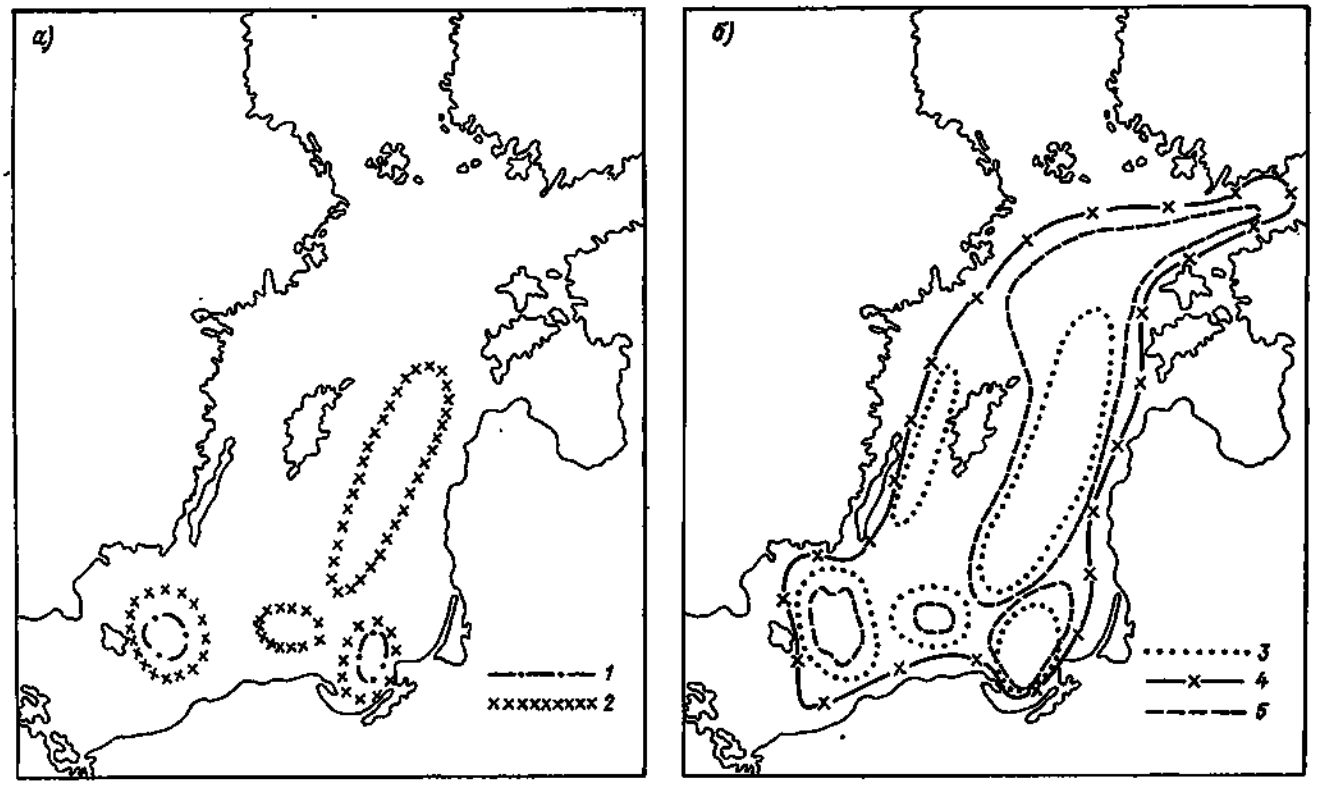


Рис. 7.14. Границы нереста шпрота в феврале—мае (*а*) и в мае—августе (*б*).
1 — в феврале над глубинами 90—100 м; *2* — в марте—апреле над глубинами 80—150 м; *3* — в мае над глубинами 70—150 м; *4* — в июне—июле над глубинами 30—200 м; *5* — в августе над глубинами 60—130 м.

ибольшие концентрации икры и личинок в южных районах моря приурочены к изобатам 100—110 м, в центральных и северо-восточных районах — 110—150 м (табл. 7.23). Одним из основных факторов, обусловливающих такое распределение икры, является изменение толщины глубинного слоя с температурой более 4 °С.

В летний период нерест перемещается в верхние, более прогретые слои (температура воды выше 9—10 °С) и икра в пределах нерестилищ занимает широкий диапазон глубин — от 20 до 170 м. Площади, занятые личинками, значительно расширяются и выходят за пределы репродуктивной части ареала под воздействием ветров и течений [45].

Вертикальное распределение икры и личинок шпрота в пределах всего слоя ото дна до поверхности неравномерное в связи с неоднородностью водной толщи по температуре, солености и содержанию кислорода.

Икра шпрота имеет широкий диапазон вертикального распределения. Эврибионтность шпрота по отношению к солености способствовала широкому расселению его в пелагиали в период нереста. Вертикальное распределение его икры связано с сезонными изменениями термического режима в толще воды. Основными факторами, влияющими на распределение икры шпрота по вертикали в зимне-весенний период, являются температура воды и со-

Таблица 7.23

Средняя численность икры и личинок шпрота (%) под 1 м² под различными глубинами в весенний и летний сезоны 1969—1978 гг.

Район	Сезон лова	Глубина, м														
		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Икра																
Южный	III—V	—	1,3	1,1	5,6	10,7	9,7	15,9	28,3	27,4	—	—	—	—	—	—
	VI—VIII	8,4	1,2	3,9	8,6	20,5	12,7	15,5	17,6	11,5	—	—	—	—	—	—
Центральный	III—V	—	1,7	0,9	7,5	1,7	3,0	5,8	5,8	11,2	11,4	9,0	14,3	20,6	4,6	2,4
	VI—VIII	1,9	1,3	4,9	3,5	6,1	9,7	6,9	7,8	6,2	6,5	6,7	10,1	11,3	11,2	5,9
Северо-восточный	III—V	—	—	—	—	3,7	4,9	3,7	6,4	36,1	5,6	9,3	7,4	9,3	13,9	—
	VI—VIII	—	4,3	7,9	4,0	5,3	4,3	14,9	9,7	8,4	8,8	8,4	11,1	6,9	5,8	—
Личинки																
Южный	III—V	—	8,5	4,3	4,3	7,5	11,7	7,4	28,7	27,6	—	—	—	—	—	—
	VI—VIII	1,7	3,7	2,6	6,8	7,7	11,9	17,9	19,7	28,2	—	—	—	—	—	—
Центральный	III—V	—	7,3	0,6	4,5	2,6	2,6	5,8	5,8	12,3	10,3	3,9	23,9	12,9	10,3	3,2
	VI—VIII	0,7	4,1	5,4	4,0	2,0	4,0	6,1	6,1	14,2	3,4	7,4	14,9	9,5	10,1	8,1
Северо-восточный	III—V	—	—	—	8,5	2,9	1,4	4,3	5,7	12,9	4,3	11,4	15,7	14,3	18,6	—
	VI—VIII	—	0,9	5,0	8,0	2,3	3,5	4,7	7,0	18,6	5,8	7,0	5,8	9,3	22,1	—

держание кислорода. Икра в это время находится только под слоем температурного скачка, где температура воды выше 4 °С. Летом с прогревом поверхностных слоев икра распределяется по всей толще ото дна до поверхности. Максимальное ее количество сконцентрировано в верхних (0—20 м) прогретых слоях, минимальное — в слое температурного скачка (20—50 м).

Численность икры шпрота в верхних слоях в летний период значительно превышает ее количество в придонных слоях в весенний сезон.

Распределение личинок шпрота по вертикали несколько иное, чем икры.

В весенний период личинки шпрота на ранних стадиях, имеющие желточный мешок, находятся в узком придонном слое. По мере роста и после рассасывания желточного мешка они поднимаются в верхние освещенные и богатые кормом слои. Толщина слоя вод, которую необходимо преодолеть личинке по пути в верхние слои, меняется по районам: в южных и западных 50—70 м, в центральных и северо-восточных 80—110 м. Меняется по вертикали от весны к лету соотношение численности личинок и их размерный состав: в феврале — апреле личинки преобладают в придонных слоях, в июне—июле — в поверхностных. Размеры личинок шпрота увеличиваются от придонных горизонтов к поверхностным.

Икра и личинки шпрота длительный период времени с марта по август развиваются в поверхностных горизонтах и их распределение по акватории моря в большой степени определяется ветровыми течениями.

Нерестилища шпрота в Балтийском море не изолированы и с помощью поверхностных течений происходит обмен водных масс и смешивание личинок между соседними районами. Установлены довольно высокие связи между численностью личинок в близлежащих районах: Борнхольмском и Штольпенском $r=0{,}74$; в южной части Готландской впадины и Лиепайском районе $r=0{,}95$; в южной части Готландской впадины и Вентспилсском районе $r=0{,}84$ [19, 48, 49].

Основной вынос икры и личинок в поверхностных слоях при устойчивых западных и южных ветрах происходит в восточном направлении над самой глубоководной зоной Борнхольмско-Штольпенского нерестилища в Гданьский залив и южную часть Готландской впадины. Из Гданьского залива дрейф личинок затруднен и они выносятся к восточному побережью залива. Из южной части Готландской впадины личинки дрейфуют по восточному склону Готландской впадины в северо-восточном направлении, приближаясь в районе Вентспилса к берегу. Часть личинок может выноситься в Рижский залив (рис. 7.15). В районах, где создаются добавочные течения и водовороты вдоль берега и мелководья, они могут задерживать икру и личинки в том или ином районе.

Ветры северных и восточных румбов ослабляют и меняют генеральное направление дрейфа шпрота на ранних стадиях развития, о чем свидетельствуют данные о снижении численности и размеров личинок на Готландском нерестилище (1973, 1976 гг.) и увеличении их количества и размеров в Борнхольмском районе.

Протяженность пассивных миграций личинок очень различается по районам и сезонам. В весенний период, когда личинки сконцентрированы над большими глубинами открытых районов, их вынос происходит на значительно большие расстояния от мест выклева, чем в летний сезон, когда большое количество личинок выклевывается вблизи берегов и протяженность их дрейфа меньшая.

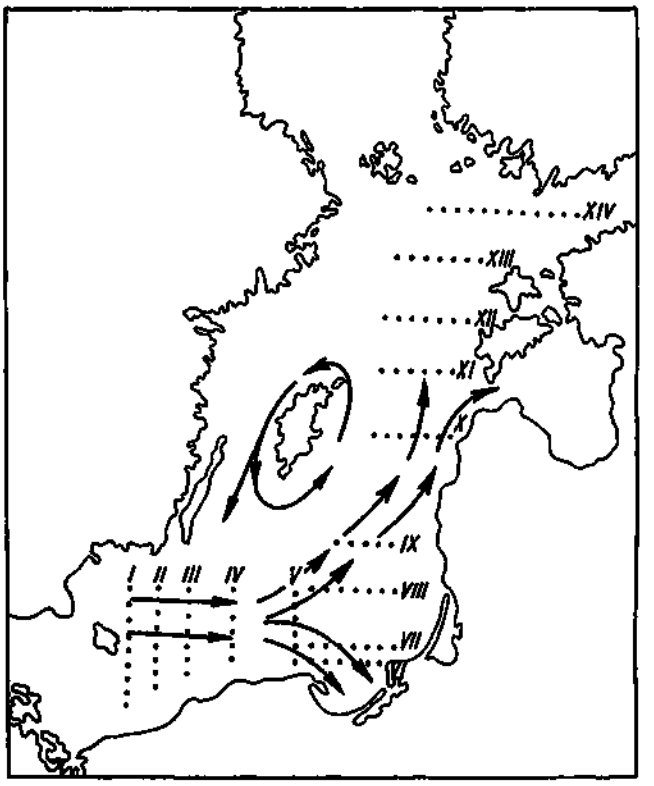


Рис. 7.16. Схема расположения разрезов и основное направление дрейфа икры и личинок шпрота.
Римские цифры — номера разрезов.

Вынос личинок шпрота из открытых районов моря в прибрежные происходит с мая по сентябрь. К сентябрю личинки и мальки держатся в основном в мелководных районах (изобаты 10—50 м). Длина личинок увеличивается от больших глубин к меньшим (от 8,0 до 22,6 мм).

Длительная пелагическая фаза и пассивный дрейф на ранних стадиях онтогенеза шпрота обеспечивают виду широкое расселение в Балтике и ослабляют опасность перенаселения в южной части ареала, где отмечается более продолжительное и активное икрометание балтийских рыб.

Распределение шпрота на ранних стадиях онтогенеза по акватории моря в различные годы неравномерное и связано с особенностями гидрометеорологических, кормовых условий, распределением и численностью производителей, смертностью икры и личинок и их пассивным дрейфом.

Наибольшая численность икры шпрота под 1 м^2 наблюдается всегда в южных и юго-западных районах (Борнхольмский, Штольпенский и Гданьский), наименьшая — в северо-восточном (Сааремо-Хийумааский). Приуроченность нереста шпрота в весенний период к южным районам обусловлена более благоприятными гидрологическими и кормовыми условиями [48, 52, 132].

По численности личинок наиболее репродуктивным районом является Готландский, куда осуществляется вынос личинок из близлежащих районов при устойчивых западных и юго-западных ветрах.

Таблица 7.24

Численность икры и личинок шпрота (%) в мае—июне на различных нерестилищах

Район нереста	Икра	Личинки
Борнхольмский	46,8	23,6
Гданьский	19,0	24,6
Готландский	28,4	42,3
Сааремо-Хийумааасский	5,8	9,5

Меньшая численность личинок отмечается в Сааремо-Хийумааском районе (табл. 7.24). В годы с ослабленным дрейфом личинок в северо-восточном направлении максимальные их скопления отмечаются в Борнхольмском районе.

Соотношение количества выметываемой икры и продуцируемых личинок в весенний (март—май) и летний (июнь—август) сезоны существенно колеблется по районам в зависимости от разных причин (суровости зим, кислородных условий весной, состава нерестового стада). Так, в целом по морю весной после теплых зим икры улавливается до 29 % общего количества выметанной за весь сезон, после холодных — только 17 %, личинок — соответственно 31 и 20 %. Максимальная численность шпрота во времени и пространстве совпадает с появлением максимального количества кормовых форм зоопланктона (ювенильных стадий) в мае и июле. Выделяются две группы личинок шпрота весеннего и летнего нереста, различающиеся по размерам и численности, а также количеству туловищных миомеров, которые можно использовать как экологическую метку при изучении сезонных группировок шпрота [52].

Годовые колебания численности икры и личинок шпрота существенны и в большой степени связаны с изменениями гидрометеорологических условий, количественного и качественного состава производителей. В многолетней динамике нереста шпрота четко выделяются два периода: 1962—1970 гг., соответствующие холодным зимам и пониженной численности икры и личинок, и 1971—1977 гг. с теплыми и умеренными зимами и повышенной численностью икры и личинок (табл. 7.25). Максимумы численности икры и личинок шпрота в 1971—1975 гг. совпали с высокой численностью нерестового запаса [32, 96] и благоприятными условиями воспроизводства [44, 51].

После 1975 г. наблюдалось постепенное снижение во всех районах моря (особенно северных) среднего количества икры и личинок шпрота, которое продолжалось до 1981 г. и связано с неблагоприятными абиотическими и биотическими условиями в раннем онтогенезе шпрота и уменьшением нерестового запаса. С 1982 по 1984 г. наметилась тенденция к повышению численности икры и личинок шпрота во всех районах моря (но особенно в Борнхольмском). Это обусловлено в большой степени благоприятными условиями в эмбриональный и личиночный периоды.

Распределение, поведение и миграции

У шпрота как типичной пелагической рыбы весь жизненный цикл проходит в толще воды. Распространен шпрот в Балтийском море практически повсеместно, однако в различные сезоны года значение отдельных слоев воды и участков моря в распределении его различна.

В течение года можно условно выделить два горизонта обитания шпрота: 1) в летне-осенний период в верхнем прогретом слое воды выше термоклина, т. е. в слое воды от 10 до 40 м, где температура выше 4 °С; 2) в зимне-весенний период главным образом в глубинных слоях воды (от 70 до 100 м) под термоклином. В этот период верхней границей обитания шпрота является изотерма около 4 °С, а нижней — изооксигена 1 ‰ по объему (рис. 7.16).

Образование летних скоплений шпрота в поверхностных слоях воды происходит обычно в мае—июне. По мере прогрева верхнего слоя воды они начинают постепенно перемещаться из глубинных слоев в поверхностные, одновременно происходит миграция шпрота в более мелководные прибрежные участки моря. К началу июля, как правило, основная масса шпрота находится в верхнем прогретом слое воды (выше термоклина) и держится над глубинами от 30 до 70 м. В этом слое у шпрота в июле—октябре проходит нагул, в июле—августе завершается нерест.

В ноябре—январе происходит образование зимних скоплений шпрота, т. е. переход его из верхнего слоя моря, где он нагуливается, в глубинный слой, где происходит зимовка и частично нерест. Осенне-зимний период — основной период промысла шпрота, поэтому знание закономерностей образования зимних скоплений шпрота крайне важно. Особенности формирования зимних скоплений шпрота обус-

Таблица 7.25

Колебания численности икры и личинок шпрота под 1 м² по районам моря в 1962—1970 и 1971—1977 гг.

Стадия развития рыб	Период, годы	Район								
		южный			средний			северо-восточный		
		мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.
Икра	1962—1970	39	210	94	25	237	62	3*	13	9
	1971—1977	229	404	289	89	241	148	13	72	36
Личинки	1962—1970	1	37	9	1	42	10	—	—	—
	1971—1977	18	56	30	7	30	17	2	7	3

* За 1968—1970 гг.

ловливают его поведение и распределение в этот период и соответственно оказывают влияние на ход и успешность промысла. Например, зимой 1976/77 г. в восточной части Балтийского моря отмечались устойчивые скопления шпрота и вследствие этого была благоприятная промысловая обстановка. В то же время в зимний период 1978—1979 гг. наблюдалось резкое ухудшение промысловой обстановки, что было вызвано отсутствием устойчивых скоплений шпрота.

Для выяснения закономерностей формирования зимних скоплений шпрота были рассмотрены особенности его распределения (на основе статистики промысла) в различные месяцы на отдельных участках моря и гидрологические условия в осенне-зимний период 1976—1977 и 1978—1979 гг., т. е. в годы, резко различающиеся поведением шпрота. При этом необходимо учесть следующие положения:

— осенью и в начале зимы шпрот нагуливается в поверхностном, относительно теплом слое моря (выше термоклина) до охлаждения этого слоя и перемешивания его с холодным промежуточным слоем, после чего рыба опускается в более теплый глубинный слой для зимовки (в рассматриваемые годы установление гомотермии и размыв термоклина происходил после снижения температуры воды в поверхностном слое ниже 5 °С);

— в местах зимовки шпрота (глубинный слой) нижняя граница распространения рыбы определяется глубиной расположения изооксигены 1 ‰ по объему;

— зимой 1978/79 г. шпрот держался в слое воды с температурой 5 °С и выше, следовательно верхней границей зимнего обитания шпрота можно принять глубину залегания изотермы 5 °С.

Осенью 1976 г. наблюдалось раннее выхолаживание верхних слоев воды: в третьей декаде октября температура воды в верхнем слое колебалась от 6,3 до 6,5 °С, а к началу третьей декады декабря понизилась до 4,3—4,5 °С, т. е. установилась гомотермия (рис. 7.17).

В 1978 г. в третьей декаде декабря температура воды в поверхностном слое была все еще высокой (выше 5 °С), но уже во второй декаде она снизилась до 3 °С (см. рис. 7.17).

Таким образом, в осенне-зимний период 1976—1977 гг. имело место более раннее выхолаживание поверхностного слоя моря, чем в 1978—1979 гг. Кроме того, в 1976—1977 гг. наблюдалось постепенное охлаждение и медленный переход температуры воды через 5 °С (более 50 сут), в то время как в зимний период 1978—1979 гг. наблюдалось быстрое выхолаживание поверхностных вод (около 20 сут).

Поведение рыбы в период перехода температуры поверхностного слоя через 5 °С резко меняется.

Из приведенных на рис. 7.18 данных видно, что в 1976—1977 гг. в рассматриваемые месяцы промысловая обстановка оставалась стабильной, в то время как в январе 1979 г. произошло резкое снижение уловов шпрота, что было вызвано отсутствием устойчивых промысловых скоплений (в 1976—1977 гг. переход температуры через 5 °С произошел в декабре, в 1978—1979 гг. — в январе).

Следовательно, в условиях медленного охлаждения поверхностных вод в период перехода температуры через 5 °С шпрот держится в косяках,

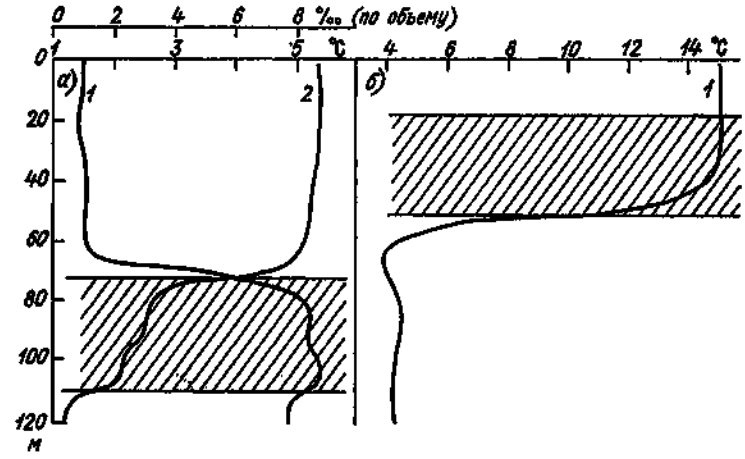


Рис. 7.16. Схема расположения слоев воды, благоприятных для обитания шпрота (заштрихованы) в зимне-весенний (*а*) и в летне-осенний (*б*) периоды.

1 — температура воды, °С; *2* — содержание растворенного кислорода, ‰ по объему.

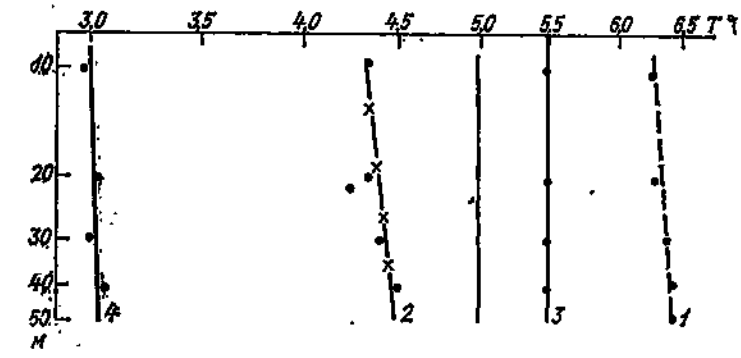


Рис. 7.17. Динамика температуры воды *T* в поверхностном слое моря на ст. 37.

1 — 29 сентября 1976 г.; *2* — 22 декабря 1976 г.; *3* — 22 декабря 1978 г.; *4* — 13 января 1979 г.

постепенно перемещаясь из поверхностного слоя, где он нагуливался, в глубинные слои, где происходит его зимовка.

При быстром интенсивном охлаждении верхнего слоя воды косяки шпрота не успевают переместиться на места зимовки. В результате этого наблюдается их рассеивание и увеличение подвижности рыбы. Через определенный промежуток времени шпрот появляется на местах зимовки и образует устойчивые скопления, что обусловило в феврале 1979 г. увеличение уловов (см. рис. 7.18).

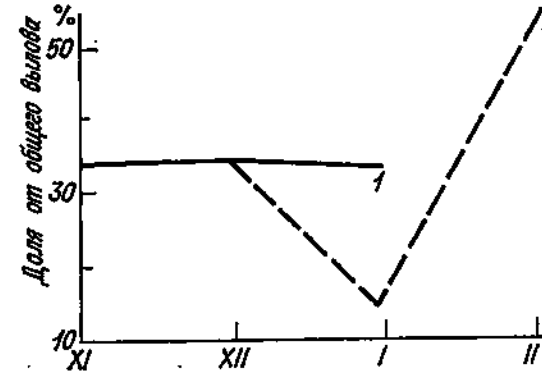


Рис. 7.18. Динамика вылова шпрота в осенне-зимний период 1976—1977 гг. (*1*) и 1978—1979 гг. (*2*).

Таблица 7.26

Доля вылова шпрота (%) в подрайонах 26 и 28 в первом полугодии

Подрайон	Год				
	1979	1980	1981	1982	1984
26	58,4	82,5	50,3	91,7	57,0
28	41,6	17,5	49,7	8,3	43,0
Всего, тыс. т	14 979	17 782	3658	12 650	12 273

Существенные различия в распределении шпрота, особенно в зимний период, наблюдаются по отдельным годам в зависимости от гидрологических условий. Так, в подрайонах 26 и 28 четко прослеживаются годы, когда шпрот в зимне-весенний период держится в основном в подрайоне 26, и годы, когда он относительно равномерно распределен в Гданьской впадине и по всей Готландской котловине, т. е. зимует как в подрайоне 26, так и в подрайоне 28. Соответственно в эти годы и промысел велся либо в основном в подрайоне 26, либо в обоих подрайонах (табл. 7.26).

Для того чтобы показать влияние гидрологических факторов на распределение шпрота в подрайонах 26 и 28, рассмотрим их динамику в зимне-весенний период 1980 и 1984 гг. (рис. 7.19 и 7.20). Как видно из приведенных на рис. 7.20 данных, в 1980 г. в зимне-весенний период в Готландской котловине в глубинных слоях отмечался дефицит кислорода, который особенно четко был выражен в подрайоне 28 (станции 43 и 37). В результате этого в центральной и северной частях Готландской котловины благоприятный для зимнего шпрота слой воды (верхняя граница слоя — изотерма 4 °С, нижняя — изооксигена 1 ‰ по объему) составлял всего около 10 м, что было недостаточно для образования скоплений шпрота. В то же время в Гданьской впадине (ст. 55) в течение всего зимне-весеннего периода, а в северо-западной части подрайона 26 (южная часть Готландской котловины, ст. 46) начиная с марта толщина слоя воды, благоприятного для зимовки шпрота, превышала 30 м. На этих участках располагались основные зимние концентрации шпрота, и поэтому основной его промысел в 1980 г. велся в подрайоне 26 (см. табл. 7.26).

Иная гидрологическая ситуация сложилась в 1984 г. (см. рис. 7.20). В этот год в зимне-весенний период как в Гданьской впадине, так и в Готландской котловине отмечалась хорошая аэрация глубинных слоев воды. В подрайоне 26 в придонных слоях содержание кислорода превышало 1 ‰ по объему (станции 55 и 46), а в подрайоне 28 изооксигена 1 ‰ залегала на глубинах свыше 110 м. Это привело к тому, что в глубоководных участках моря как в подрайоне 26, так и в подрайоне 28 образовались благоприятные для зимовки шпрота слои воды толщиной до 30 м и более. Благодаря этому шпрот в 1984 г. зимовал как в Гданьской впадине, так и повсеместно в Готландской котловине, подтверждением чему является статистика его вылова (см. табл. 7.26).

На рис. 7.21 показано распределение шпрота в мае 1977—1979 гг. Эти данные были получены на основе специальных тралово-учетных съемок. На рис. 7.21 *а* и *б* видно, что в 1977 и 1978 гг. плотные скопления шпрота держались как в подрайоне 26, так и в подрайоне 28, а в мае 1979 г. (см. рис. 7.21 *в*) плотные концентрации были лишь в подрайоне 26. Такой характер распределения шпрота в эти годы также объясняется толщиной глубинного слоя воды, пригодного для его обитания. В 1977 и 1978 гг. наблюдалась хорошая аэрация глубинных слоев воды в Гданьской впадине и Готландской котловине (рис. 7.22), что обеспечивало образование под слоем термоклина большого слоя воды, благоприятного для обитания шпрота (толщина более 30 м). В то

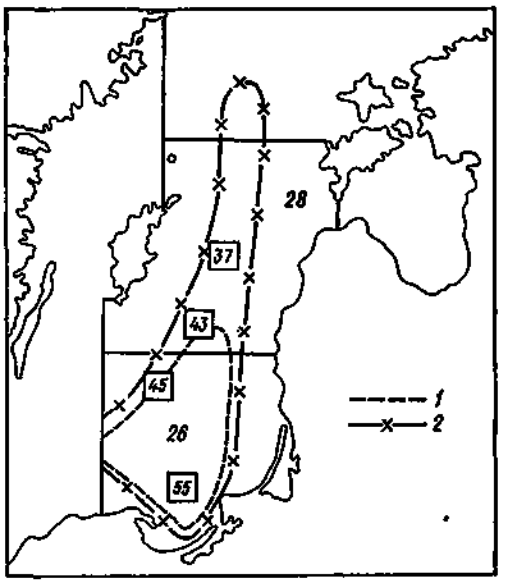


Рис. 7.19. Условные границы районов зимовки шпрота в 1980 (*1*) и 1984 гг. (*2*).
Номер гидрологической станции заключен в квадрат; 26 и 28 — номера подрайонов.

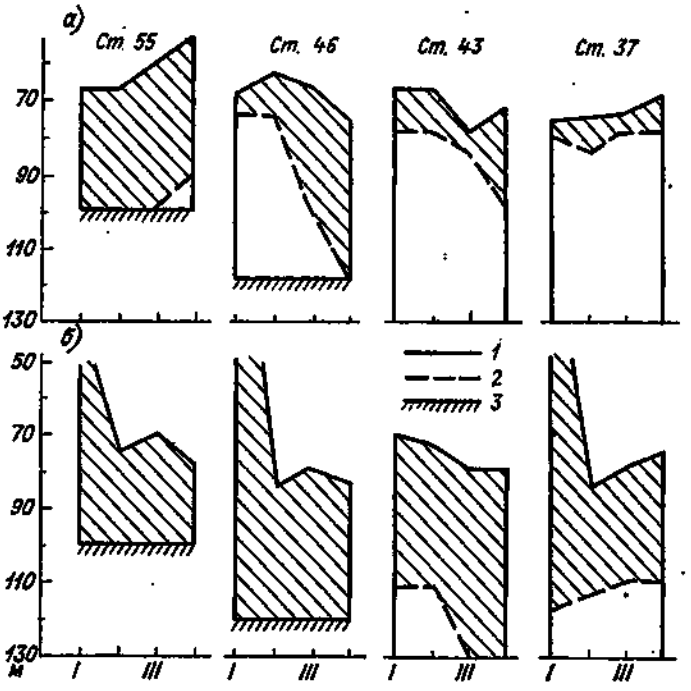
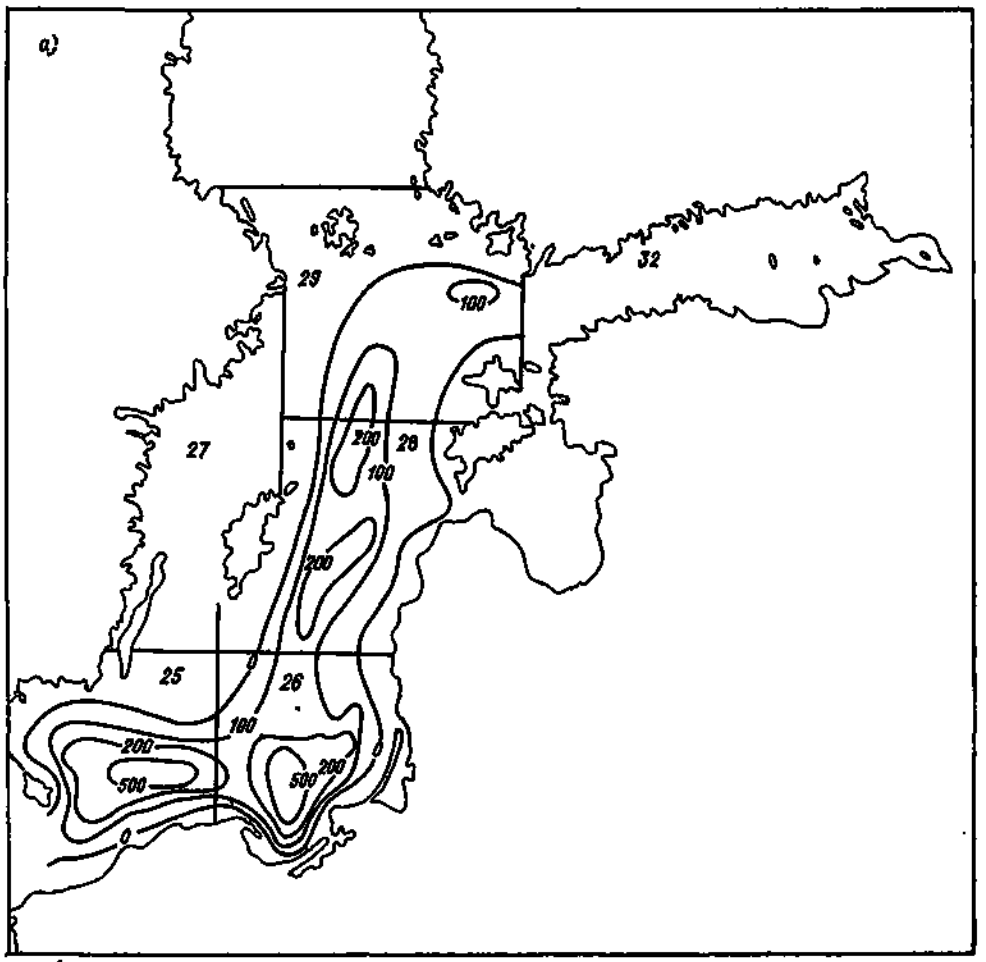
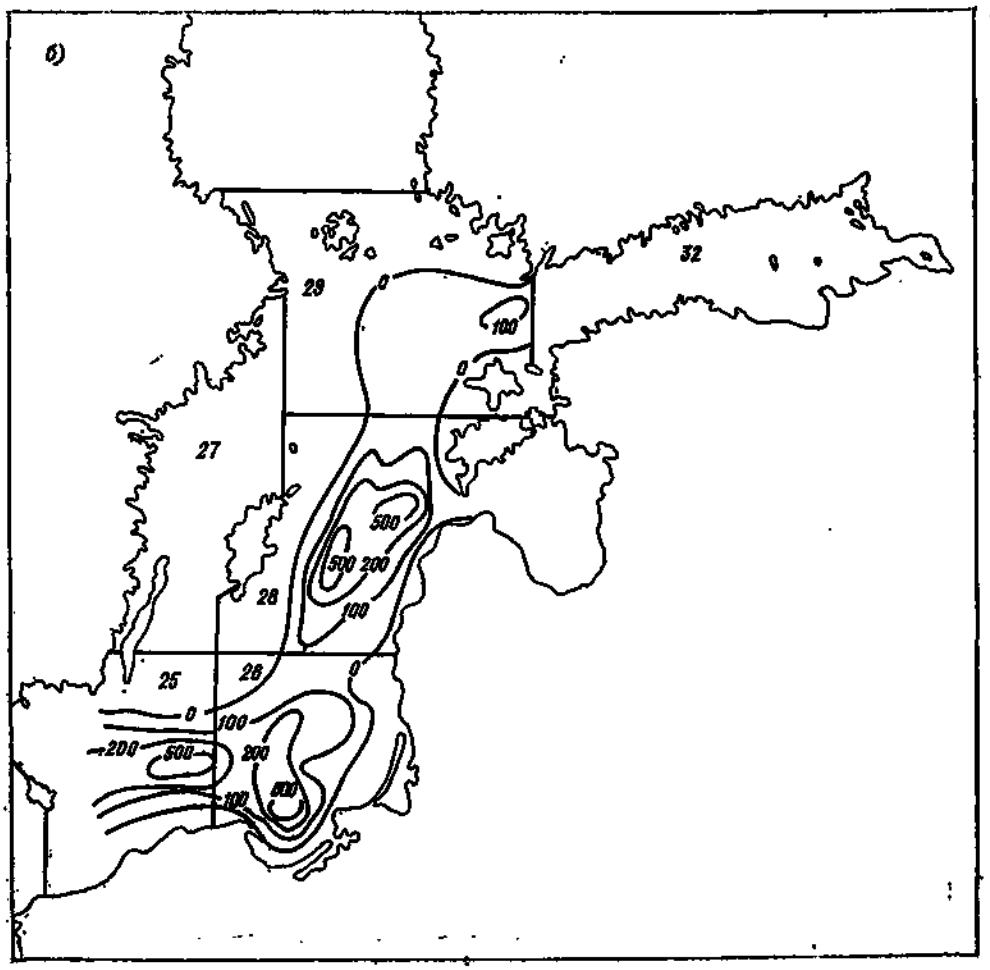


Рис. 7.20. Динамика толщины слоя воды (заштрихован), благоприятного для зимнего обитания шпрота, в 1980 (*а*) и 1984 гг. (*б*).
1 и *2* — соответственно горизонты залегания изотермы 4 °С и изооксигены 1 ‰ по объему; *3* — дно.


а)
29
32
0
100
27
200
28
100
200
25
26
100
200
500
200
500
0


б)
29
0
32
100
0
27
500
500
200
28
100
25
26
0
0
100
200
500
200
500
100

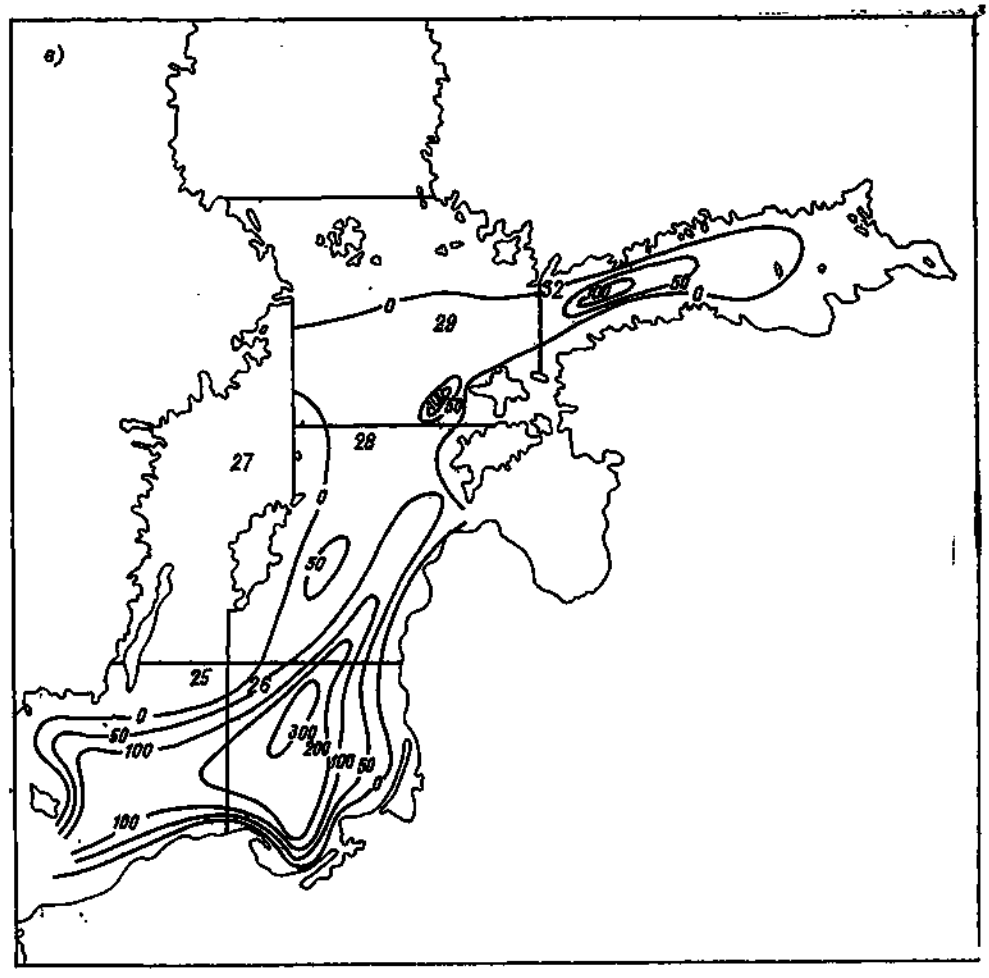


Рис. 7.21. Распределение шпрота (кг за часовое траление) в мае 1977 (*а*), 1978 (*б*) и 1979 гг. (*в*) по подрайонам.

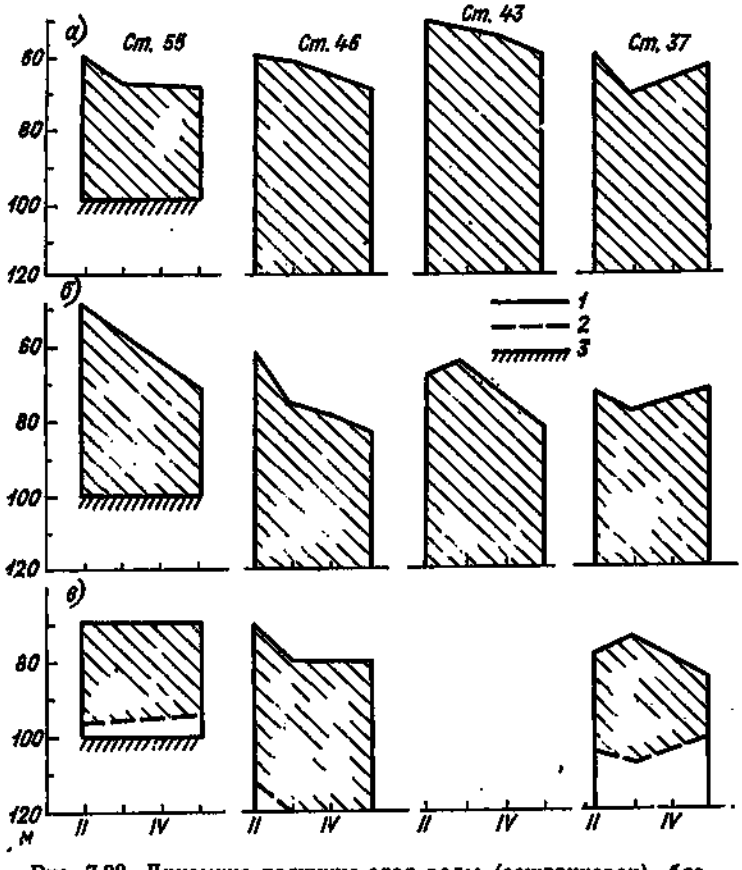


Рис. 7.22. Динамика толщины слоя воды (заштрихован), благоприятного для зимнего обитания шпрота, в 1977 (*а*), 1978 (*б*) и 1979 гг. (*в*).

Условные обозначения см. на рис. 7.20.

же время в 1979 г. появились уже признаки стагнации (см. рис. 7.22), и если в подрайоне 26 обстановка была достаточно благоприятной (станции 55 и 46), то в подрайоне 28 (ст. 37) в мае толщина благоприятного для обитания шпрота слоя сократилась почти до 15 м. Это, вероятно, и явилось основной причиной того, что скопления шпрота в мае 1979 г. держались в основном в подрайоне 26 (см. рис. 7.21 *в*).

Кроме сезонных миграций, для шпрота характерны суточные изменения в его поведении и распределении. Для всех сезонов в суточном поведении шпрота можно выделить одну общую закономерность: в светлое время суток он держится отдельными косяками, в темное время суток — рассеяно. Однако время суток, когда происходит образование косяков и их распад, различается по сезонам. В общем виде схема суточных миграций шпрота представляется в следующем виде: в вечернее время косяки начинают подниматься из нижних слоев воды в верхние, где с наступлением темноты рассеиваются. В таком состоянии шпрот держится в течение всего темного периода суток. С наступлением рассвета он начинает формироваться в косяки и опускаться в более глубокие слои воды. В мае—июне, когда шпрот днем держится ниже термоклина, в вечернее время он поднимается в поверхностный прогретый слой воды, где и находится в рассеяном состоянии в течение ночи, следовательно, в эти месяцы он мигрирует с горизонтов 70—90 м на горизонты 10—20 м. В июле—сентябре днем основные скопления шпрота держатся выше термоклина в верхнем прогретом слое воды (20—50 м),

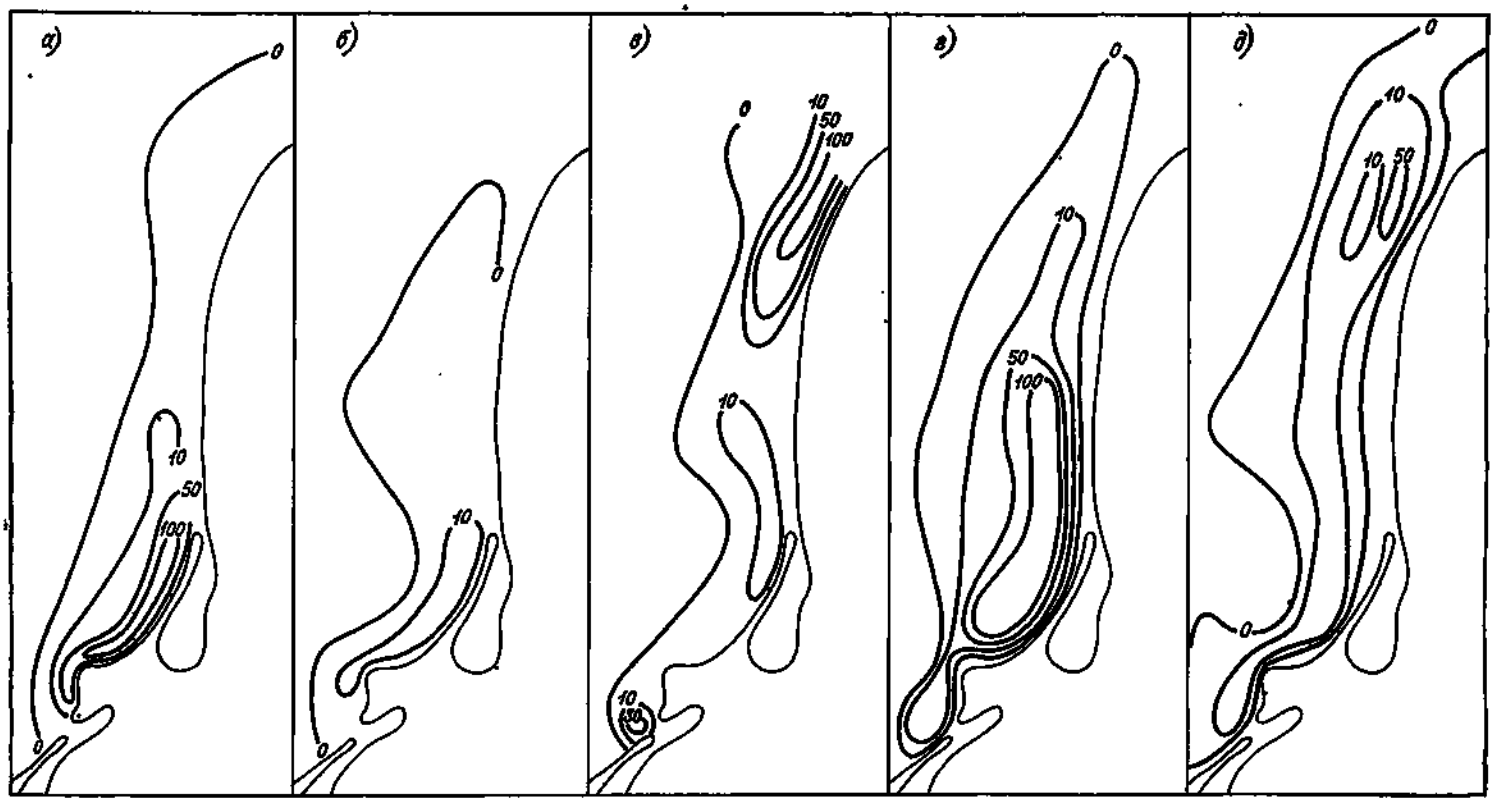


Рис. 7.23. Распределение сеголетков шпрота (шт. на траление) в сентябре 1980—1984 гг. (соответственно *а—д*).
Траление производилось тралом Айзекса—Кидда.

ночью он в основном концентрируется в слое 10—30 м, где держится в рассеяном состоянии. Следовательно, в этот период протяженность вертикальных миграций значительно сокращается по сравнению с маем—июнем.

Несколько иные, чем у взрослого шпрота, закономерности в распределении его молоди (в возрасте от сеголетка до годовика). В осенний период сеголетки шпрота держатся в верхнем прогретом слое воды в прибрежной зоне. Ширина прибрежной зоны, где держатся сеголетки, в разные годы может существенно различаться (рис. 7.23, табл. 7.27). Так, в сентябре 1980 г. сеголетки в подрайонах 26 и 28 встречались в узкой прибрежной зоне над глубинами от 15 до 60 м, причем максимальные концентрации были приурочены к глубинам 15—25 м. В сентябре 1984 г. зона прибрежных вод, где встречались сеголетки шпрота, имела максимальную ширину за период с 1980 по 1984 г. В этот год сеголетки встречались над глубинами от 20 до 100 м.

В 1981 г. сеголетки шпрота распределялись равномерно на всем своем ареале в подрайонах 26 и 28. В 1980 и 1983 гг. в подрайоне 26 концентрация сеголеток была выше, чем в подрайоне 28, а в 1982 и 1984 гг. более высокая концентрация была отмечена в подрайоне 28 (см. рис. 7.23). Пока не удалось установить точные причины, обусловливающие то или иное распределение сеголеток в рассматриваемых подрайонах, тем не менее можно предположить, что молодь шпрота в осенний период образует максимальные концентрации на тех участках, на которых в летний период было больше его личинок, и соответственно где была выше их выживаемость, т. е. осеннее распределение молоди шпрота определяется летним распределением личинок.

На примере поколений шпрота 1982 и 1983 гг. рождения рассмотрим распределение молоди по сезонам.

В сентябре 1982 г. сеголетки шпрота встречались от Ирбенского пролива до Гданьского залива, однако основные концентрации наблюдались в Вентспилсской зоне (см. рис. 7.23). В январе 1983 г. площадь распространения молоди по сравнению с сентябрем увеличилась (рис. 7.24, табл. 7.28), а площадь участка с максимальной концентрацией сократилась более чем в два раза (рис. 7.23 и 7.24). При этом в январе произошло смещение части рыбы в южном направлении. В марте 1983 г. подавляющая часть молоди шпрота держалась на юге. На севере остался лишь небольшой участок в районе Ирбенского пролива, где была обнаружена молодь (см. рис. 7.24, табл. 7.28).

Иным был характер распределения молоди шпрота поколения 1983 г. рождения. В сентябре 1983 г. сеголетки шпрота держались от Гданьского залива до Ирбенского пролива, максимальные концентрации были приурочены к южной части. В январе 1984 г. площадь распространения молоди со-

Таблица 7.27

Распределение молоди шпрота в сентябре 1980—1984 гг.

Год	Зона глубин обитания, м	Площадь ареала, миля²	Зона глубин с максимальной концентрацией, м	Площадь участков с максимальной концентрацией, миля²
1980	15—60	4946	15—25	653
1981	20—60	4483	—	—
1982	20—60	5322	20—60	713
1983	20—90	6956	20—70	1735
1984	20—100	7767	20—60	561

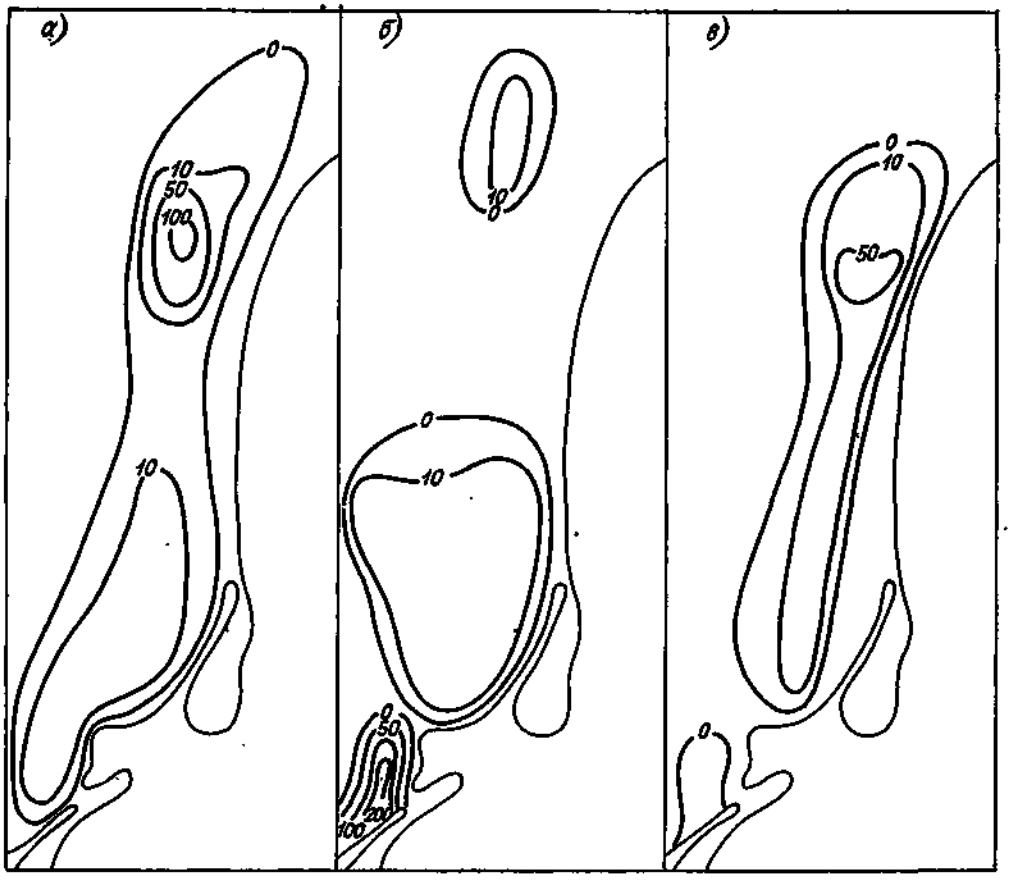


Рис. 7.24. Распределение молоди шпрота в январе (*а*) и марте (*б*) 1983 г. и в январе 1984 г. (*в*).

Таблица 7.28

Сезонное распределение молоди шпрота поколений 1982 и 1983 гг. рождения

Месяц и год	Зона глубин обитания, м	Площадь, миля²	Зона глубин с максимальной концентрацией, м	Площадь участка с максимальной концентрацией, миля²
		1982 г. рождения		
IX 1982	20—60	5322	20—60	713
I 1983	20—100	6493	50—80	314
III 1983	20—90	4203	20—90	315
		1983 г. рождения		
IX 1983	20—90	7768	20—50	226
I 1984	20—90	5459	40—70	167

Таблица 7.29

Средние численность и биомасса зоопланктона в подрайонах 26 и 28 Балтийского моря в феврале 1983 и 1984 гг. (данные представлены Р. Я. Лине)

Показатель	1983 г.		1984 г.	
	26	28	26	28
Численность, экз/м³	4836	671	3078	3450
Биомасса, мг/м³	211,2	19,2	124,0	142,0

кратилась по сравнению с сентябрем (см. табл. 7.28), причем на юге плотность концентраций снизилась, а в Вентспилсской зоне — увеличилась (см. рис. 7.23, 7.24).

Таким образом, молодь шпрота поколения 1982 г. зимой мигрировала из северных районов в южные, а у молоди поколения 1983 г. рождения отмечалась тенденция смещения в северном направлении.

Характер распределения молоди шпрота в зимний период хорошо согласуется с динамикой численности зоопланктона по районам моря. Из приведенных в табл. 7.29 данных видно, что зимой 1983 г. как численность, так и биомасса зоопланктона в подрайоне 26 была значительно выше, чем в подрайоне 28. Соответственно и молодь шпрота в зимний период в основной массе мигрировала на юг. В зимний период 1984 г. численность и биомасса зоопланктона были выше в подрайоне 28, хотя и в подрайоне 26 они оставались на относительно высоком уровне. Соответственно, как было показано выше, и молодь шпрота держалась в зимний период 1984 г. как в подрайоне 26, так и в подрайоне 28, но более плотные концентрации были приурочены к подрайону 28.

Таким образом, распределение и миграции молоди шпрота в зимний период определяются динамикой зоопланктона в различных районах моря.

7.2.3. Промысел и состояние запасов

Сезонная и годовая динамика уловов

Шпрот является традиционным объектом промысла на Балтике, но до 1957 г. его добыче не уде-

лялось должного внимания и вылов всеми странами не превышал 20,0 тыс. т в год. Отечественный промысел шпрота носил случайный характер.

В районе латвийского побережья Рижского залива шпрот брали преимущественно как прилов к салаке. В Эстонии постоянно существовал самостоятельный промысел шпрота сетями и килечными ставными неводами, главным образом в Финском заливе. В некоторых районах (например, в Пярнуской бухте) шпрота ловили вместе с салакой. В открытом море в эти годы отечественный промысел не велся, в то же время в других прибалтийских странах давно существовал самостоятельный активный морской промысел кильки тралами (Польша, Германия) и кошельковыми неводами (Германия, Швеция, Дания). Широко применялся также близнецовый лов тралами с двух судов.

В конце 50-х годов произошло увеличение запасов шпрота в результате появления трех урожайных поколений (1955, 1957 и 1959 гг.). В этот период активизировался его промысел в открытом море за счет использования донных тралов. В результате этого начиная с 1957 г. уловы шпрота начали неуклонно возрастать (рис. 7.25) и в 1964 г. советский вылов составил уже 56,5 тыс. т, а общий вылов всеми странами — 96,2 тыс. т.

В середине 60-х годов с вступлением в промысловый запас рыб неурожайных поколений 1960, 1961 и 1962 гг. произошло значительное сокращение запасов, однако значительного снижения уловов в эти годы не произошло, так как возросла интенсивность промысла. Начиная с 1963 г. отечественный промысел шпрота увеличился за счет внедрения более эффективных орудий лова — разноглубинных близнецовых тралов.

В конце 60-х — начале 70-х годов запасы шпрота вновь увеличились, что было обусловлено вступлением в промысловый запас рыб урожайных поколений 1967, 1969 и 1972 гг. рождения. Соответственно в период с 1968 по 1974 г. произошло резкое увеличение объема вылова шпрота (см. рис. 7.25). Однако следует отметить, что увеличение вылова было обусловлено не только ростом запаса, но и значительным увеличением интенсивности промысла. Так, в 1970—1974 гг. промысловая смертность шпрота колебалась в пределах 0,5—0,6, что для шпрота является чрезмерно высокой. В период с 1974 по 1983 г. произошло резкое сокращение вылова шпрота (в 1972 г. — 234,1 тыс. т, в 1983 г. — 37,1 тыс. т), которое было обусловлено снижением промыслового запаса из-за вступления в него рыб неурожайных поколений 1974, 1977, 1978 и 1979 гг. В 1984 г. после вступления в промысловый запас урожайных поколений 1980 и 1982 гг. вновь началось увеличение вылова шпрота.

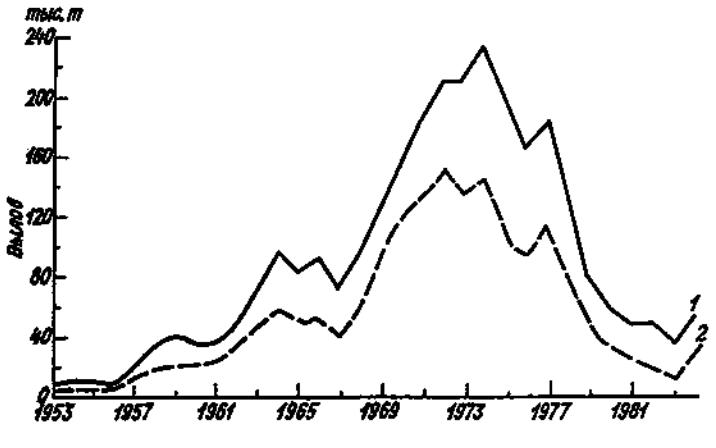


Рис. 7.25. Динамика вылова балтийского шпрота всеми странами (*1*) и СССР (*2*).

Таблица 7.30

Вылов шпрота (% годового улова) по периодам года

Период, годы	Январь—апрель	Май—август	Сентябрь—декабрь
1953—1958	14,8	52,4	32,8
1980—1984	50,0	6,8	43,2

Таблица 7.31

Средний возрастной состав шпрота (%) в уловах 1975—1982 гг.

Период	Возраст, лет						
	2	3	4	5	6	7	8
3	35,5	24,5	20,4	10,6	5,1	1,4	1,5
1	—	37,0	24,9	20,7	10,8	5,2	1,4

Одной из составных частей рациональной эксплуатации запасов рыб является выбор оптимального периода года, когда наиболее рационально вести промысел.

Установление определенного периода года для промысла преследует задачу — получение более высокой численности остатка запаса при условии изъятия рыбы в объеме, определенном квотой.

Из приведенных в табл. 7.30 данных видно, что в 50-х годах более 50 % улова шпрота приходилось на летние месяцы (май—август), а в 1980—1984 гг. в эти месяцы вылавливалось только 6,8 % годового улова.

Исходя из особенностей биологии и экологии шпрота, календарный год промысла шпрота можно разделить на три периода: 1) январь—апрель; 2) май—август; 3) сентябрь—декабрь. К 3-му периоду годовики шпрота достигают промыслового размера и вступают в промысловое стадо. В связи с тем что пополнение оказывает существенное влияние на структуру запаса и динамику средней массы шпрота в уловах, целесообразно рассматривать в качестве естественного периода биологического регулирования интервал, включающий 3-й период одного года и 1-й и 2-й периоды следующего года. На 2-й период приходится основной нерест шпрота. Качество сырья в это время наихудшее (наименьшая жирность, низкая стойкость сырца при хранении), скопления рыбы — неустойчивые. Учитывая это, ведение промысла во 2-м периоде нецелесообразно. Поэтому при выборе оптимальных сроков промысла шпрота следует остановиться более подробно на 3-м и 1-м периодах года. В качестве примера рассмотрим ход промысла шпрота с 1975 по 1982 г. Возрастной состав шпрота в уловах в возрасте двух лет и старше в 3-м периоде и соответственно в возрасте трех лет и старше в 1-м периоде характеризуется показателями, представленными в табл. 7.31. Средняя масса шпрота по воз-

Таблица 7.32

Средняя масса (г) шпрота по возрастным группам и периодам года

Период	Возраст, лет							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	3,5	9,1	12,6	14,2	15,6	16,4	17,1	17,6
2	4,4	10,8	14,2	15,7	16,9	17,8	18,6	19,1
3	8,0	13,4	15,4	16,3	17,3	18,2	18,9	19,4

Таблица 7.33

Средняя масса шпрота в уловах (г) при различных уровнях пополнения

Период	Доля пополнения						
	1,0	0,8	0,6	0,48	0,4	0,2	0,0
3	8,0	9,5	10,9	11,8	12,4	13,8	15,3
1	9,1	10,1	11,2	11,8	12,2	13,3	14,3

Таблица 7.34

Отношение остатка промыслового запаса шпрота N_3/N_1 на начало 2-го периода при условии ведения промысла в 3-м или 1-м периоде

Доля пополнения	1,0	0,8	0,6	0,48	0,4	0,2	0,0
W_3/W_1	0,88	0,93	0,98	1,00	1,01	1,04	1,08
$N_3/N_1 (M_1=M_3=0{,}50)$	1,014	1,048	1,078	1,092	1,098	1,116	1,144
$N_3/N_1 (M_1=1{,}26, M_3=0{,}40)$	1,076	1,117	1,155	1,172	1,179	1,208	1,241

растным группам и периодам года приведена в табл. 7.32.

Исходя из возрастного состава рыб в уловах (см. табл. 7.31) и средней массы рыб по возрастным группам (см. табл. 7.32), можно определить среднюю массу шпрота в возрасте двух лет и старше в 3-м периоде и в возрасте трех лет и старше в 1-м периоде. Она составила соответственно 15,3 и 14,3 г.

Средняя масса особи шпрота в уловах зависит от доли пополнения и может быть определена по формуле

$$W = W_п\alpha + W_о(1-\alpha),$$

где $W_п$ и $W_о$ — средняя масса одной рыбы пополнения и остатка соответственно; α — доля пополнения в уловах. В нашем случае для 3-го периода $W_3 = 8{,}0\alpha + 15{,}3(1-\alpha)$, для 1-го периода $W_1 = 9{,}1\alpha + 14{,}3(1-\alpha)$.

Как видно из приведенных в табл. 7.33 данных, при доле пополнения свыше 0,48 средняя масса шпрота в уловах в 1-м периоде выше, чем в 3-м, а при доле пополнения менее 0,48 — наоборот.

Использовав метод когортного анализа, можно написать уравнение для определения численности остатка шпрота на начало 2-го периода (периода массового нереста) при условии ведения промысла в 3-м или 1-м периодах. Результаты расчета приведены в табл. 7.34.

Как видно из приведенных в табл. 7.34 данных, в обоих вариантах при любой доле пополнения наиболее рационально вести промысел в 3-м периоде. В этом случае остаток промыслового запаса на начало 2-го периода (что равнозначно величине нерестового запаса) будет в варианте I на 1,4—14,4 %, а в варианте II на 7,6—24,1 % (в зависимости от доли пополнения) выше, чем при ведении промысла в 1-м периоде, несмотря на то, что в ряде случаев средняя масса особи от 3-го к 1-му периоду увеличивается.

Динамика запасов

Динамика запасов шпрота обусловлнвается урожайностью поколений, составляющих промысловый запас. Для шпрота характерны значительные колебания урожайности поколений (табл. 7.35).

Как видно из приведенных в табл. 7.35 данных, урожайность поколения 1982 г. в подрайонах 22—25 в 13,6 раза выше, чем поколения 1974 г., в подрайонах 26—28 урожайность поколения 1972 г. в 13,8 раза выше, чем поколения 1977 г., а в подрайонах 27, 29—32 поколение 1975 г. оказалось в 29,6 раза урожайнее, чем поколение 1977 г.

Колебания урожайности поколений приводят соответственно к значительным колебаниям запасов шпрота по годам (табл. 7.36).

Начиная с 1975 г. по всем подрайонам Балтийского моря наблюдалось падение запасов шпрота, которое продолжалось до 1981 г., а затем в подрайонах 26 и 28 началось его повышение, а в подрайонах 27, 29—32 запас стабилизировался, хотя и на низком уровне (см. табл. 7.36).

Анализ динамики численности поколений шпрота в подрайонах 26 и 28 показал наличие определенной цикличности в чередовании урожайных и неурожайных поколений. Начиная с 1960 г. можно выделить следующие периоды:

1) с 1960 по 1966 г. — период неурожайных поколений шпрота; средний индекс численности составляет 0,56;

2) с 1967 по 1973 г., когда преобладали урожайные поколения шпрота; средний индекс численности равен 1,5;

3) с 1974 по 1981 г. — период преобладания неурожайных поколений шпрота; средний индекс численности составил 0,64.

Выявление подобной периодичности в динамике численности представляется перспективным при разработке прогнозов на далекую перспективу. Так, для подрайонов 26 и 28 уже сейчас есть основания ожидать, что с 1982 г. у шпрота начался период урожайных поколений и увеличение его запасов, вероятно, продлится в течение 7—8 лет, после чего возможно наступление нового периода падения численности. Исследования в этом направлении необходимо продолжать, причем их целью должно быть не только выявление периодичности в чередовании урожайных и неурожайных поколений, но и выяснение причин, их обусловливающих.

7.2.4. Методы прогнозирования запасов и уловов балтийского шпрота

Одним из основных направлений в исследовании динамики численности является оценка численности рыб. Основным методом при оценке численности шпрота, принятым в Рабочей группе МСИМ, является метод анализа виртуальных популяций. Однако по ряду причин этот метод может допускать существенные погрешности в оценке численности поколений рыб, поэтому для получения более досто-

Таблица 7.35

Индексы урожайности поколений шпрота *

Подрайон	Поколение, год													
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
22—25	0,60	0,61	1,02	0,56	0,26	1,06	0,56	0,34	0,49	0,90	1,91	1,20	3,53	0,96
26—28	1,21	1,64	2,20	1,22	0,35	1,66	0,66	0,16	0,30	0,35	1,08	0,58	1,71	0,88
27, 29—32	0,68	0,97	3,52	0,82	0,29	4,44	0,35	0,15	0,21	0,30	0,75	0,32	0,80	0,39

* За 1,0 принята средняя численность шпрота поколений 1970—1983 гг.

Таблица 7.36

Динамика общего запаса шпрота (тыс. т) за период с 1970 по 1983 г.

Подрайон	Год													
	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
22—25	144,8	144,2	157,0	144,5	140,0	153,2	131,4	120,1	84,7	89,2	159,3	189,0	272,8	352,1
26—28	1195,3	1081,6	1025,6	886,4	718,3	670,0	526,8	427,5	293,4	183,3	249,1	253,8	372,2	401,4
27, 29—32	572,1	484,6	487,2	491,1	363,7	438,5	426,2	304,6	209,1	151,2	132,1	114,6	111,8	108,8

верных оценок желательно проводить определение запаса несколькими независимыми методами. С этой целью с 1977 г. в БалтНИИРХ для определения абсолютного запаса балтийского шпрота в подрайонах 26 и 28 использовали результаты тралово-учетных съемок распределения скоплений рыб, ихтиопланктонных съемок, данные о плодовитости и другие биологические показатели шпрота.

Весной 1977 г. по данным ихтиопланктонной съемки и биологическим показателям рыбы определили абсолютный запас шпрота в подрайоне 26, который составил 190 тыс. т. По данным тралово-учетных съемок были оконтурены зоны с различной плотностью концентраций (уловы на часовое траление) шпрота и определен относительный запас для исследуемых подрайонов с помощью равенства

$$P' = \sum_{i=1}^{n} Y_i S_i,$$

где P' — относительный запас шпрота в подрайоне; Y_i — средний улов на траление для i-й зоны; S_i — площадь i-й зоны.

Тралово-учетные съемки в 1977—1981 гг. проводили однотипными судами одинаковыми орудиями лова в одних и тех же координатах и в одни и те же сроки (10—15 мая), поэтому считаем, что значения относительного запаса шпрота, определенные по траловым съемкам, сравнимы между собой и соотношение их по годам и подрайонам пропорционально соотношению значений абсолютного запаса. Для удобства анализа относительный запас в подрайоне 26 в 1977 г. приняли за единицу. Индексы запаса в других подрайонах в 1977 г. и во всех подрайонах в 1978—1981 гг. определяли, исходя из равенства

$$K_i^\tau = P_i^{\prime\tau} / P_{26}^{\prime 77},$$

где K_i^τ — индекс запаса в i-м подрайоне в году τ; $P_i^{\prime\tau}$ — относительный запас в i-м подрайоне в году τ; $P_{26}^{\prime 77}$ — относительный запас в подрайоне 26 в 1977 г.

Результаты расчета индексов запаса шпрота по подрайонам приведены в табл. 7.37.

Исходя из абсолютного запаса шпрота в подрайоне 26 в 1977 г. (190 тыс. т), определенного по ихтиопланктонной съемке, и индексов запаса, был проведен расчет абсолютного запаса в подрайонах 26 и 28 для рыб в возрасте два года и старше (табл. 7.38).

Как видно из табл. 7.38, запас, определенный по результатам тралово-учетной съемки, оказался практически равным данным гидроакустических съемок, в то же время существенно отличаясь от запаса, определенного в тот же год по методу VPA. В частности, запас шпрота в 1977 г. по данным МСИМ (метод VPA) оказался в 2,0, а в 1978 г. — в 1,5 раза выше, чем по данным тралово-учетной съемки. В то же время в 1981 г. расчеты по методу VPA дали для 1977 и 1978 гг. запасы, близкие к результатам, полученным в эти годы методом тралово-учетной съемки. Аналогичная закономерность отмечена в определении численности двухгодовиков. По данным тралово-учетной съемки численность двухгодовиков (пополнение промыслового запаса) в 1977 и 1978 гг. оказалась практически в два раза ниже, чем рассчитанная в эти годы по методу VPA (данные МСИМ). В то же время по результатам расчета, проведенного по методу VPA в 1981 г., численность двухгодовиков в 1977 и 1978 гг. оказа-

Таблица 7.37

Индексы запаса шпрота по данным тралово-учетных съемок

Подрайон	Год				
	1977	1978	1979	1980	1981
26	1,000	0,445	0,765	0,365	0,266
28	0,682	1,114	0,278	0,303	0,177

Таблица 7.38

Промысловый запас балтийского шпрота (тыс. т) в подрайонах 26 и 28, определенный различными методами

Год, когда проводилось определение запаса	Метод	Год, для которого определялся запас				
		1977	1978	1979	1980	1981
1977	Тралово-учетная съемка	319,2	—	—	—	—
	VPA	639,9	—	—	—	—
1978	Тралово-учетная съемка	—	296,1	—	—	—
	VPA	434,0	443,3	—	—	—
1979	Тралово-учетная съемка	—	—	196,2	—	—
	Гидроакустическая съемка	—	—	198,0	—	—
	VPA	405,3	424,5	230,6	—	—
1980	Тралово-учетная съемка	—	—	—	126,8	—
	VPA	284,0	231,7	123,9	194,5	—
1981	Тралово-учетная съемка	—	—	—	—	84,3
	Гидроакустическая съемка	—	—	—	—	79,3
	VPA	296,3	219,4	147,7	122,9	95,5

Таблица 7.39

Численность двухгодовиков шпрота (млн шт.) в подрайонах 26 и 28, определенная различными методами

Год, когда проводилось определение численности	Метод	Год, для которого определяли численность				
		1977	1978	1979	1980	1981
1977	Тралово-учетная съемка	17 600	—	—	—	—
	VPA	36 493	—	—	—	—
1978	Тралово-учетная съемка	—	9 480	—	—	—
	VPA	31 596	19 839	—	—	—
1979	Тралово-учетная съемка	—	—	1020	—	—
	VPA	28 263	20 082	2257	—	—
1980	Тралово-учетная съемка	—	—	—	3 590	—
	VPA	18 159	9 472	2765	13 315	—
1981	Тралово-учетная съемка	—	—	—	—	1600
	VPA	19 215	8 564	1702	7 201	2757
1982	VPA	18 583	5 981	912	2 456	1525
1983	VPA	17 499	6 431	1354	2 989	1703
1984	VPA	17 499	6 405	1150	2 522	1878

Таблица 7.40

Прогнозируемый ОДУ и фактический вылов балтийского шпрота (тыс. т) в 1977—1980 гг.

Год	1977	1978	1979	1980
Вылов:				
по прогнозу	275,0	184,0	161,0	80,5
фактический	181,3	132,7	77,1	57,2

лась близкой к определенной в 1977 и 1978 гг. методом тралово-учетной съемки (табл. 7.39).

Исходя из вышеизложенного, будем считать, что использование в настоящее время для определения запаса балтийского шпрота метода анализа виртуальных популяций (VPA) приводит к завышению запаса и соответственно значения, прогнозируемого ОДУ. Этим, вероятно, объясняется то, что в последние годы фактический вылов шпрота в Балтийском море значительно ниже, чем прогнозируемый ОДУ (табл. 7.40).

Одними из основных причин неудовлетворительных результатов расчета запаса балтийского шпрота по методу VPA являются, по нашему мнению, следующие: 1) при расчетах используются значения M и F, не подтвержденные какими-либо убедительными расчетами; 2) большие ошибки допускаются при прогнозировании численности пополнения.

В целях дальнейшего уточнения естественной (M) и промысловой (F) смертности шпрота нами сделана раздельно их оценка в подрайонах 26 и 28 Балтийского моря с мая 1981 г. до мая 1982 г., выделив в естественной смертности компоненты, вызванные выеданием треской M_T и другими причинами M_e.

В связи с явно выраженной сезонностью промысла шпрота и внутригодовыми особенностями распределения трески и шпрота упомянутый годовой период был разделен на три четырехмесячных интервала: 1) май—август 1981 г., 2) сентябрь—декабрь 1981 г., 3) январь—апрель 1982 г., для которых также получены оценки упомянутых параметров.

На основании ежегодно проводимых БалтНИИРХ майских тралово-учетных съемок была получена численность шпрота в подрайонах 26 и 28 в мае 1981 и 1982 гг. (табл. 7.41).

Используя статистику вылова и биологические анализы трески и шпрота, было рассчитано количество шпрота рассматриваемых поколений, съеденное треской n^i и изъятое промыслом y^i в i-м интервале (табл. 7.42).

По численности рыб поколения 1979 г. и старше в начале и конце периода находим общую смертность Z взрослого шпрота, которая составляет 0,99. Она разделена на компоненты по суммарным данным за год пропорционально доле каждой из со-

Таблица 7.41

Численность шпрота в подрайонах 26 и 28 в мае 1981 и 1982 гг.

Год	1981	1982	1982
Поколение	1979 г. и старше	1979 г. и старше	1980 г.
Численность, млн. шт.	7800	2888	7847

Таблица 7.42

Количество шпрота (млн. шт.), изъятого промыслом и съеденного треской за период с мая 1981 г. до мая 1982 г.

Поколение, год	Вылов			Съедено треской		
	V—VIII 1981 г.	IX—XII 1981 г.	I—IV 1982 г.	V—XII 1981 г.	IX—XII 1981 г.	I—IV 1982 г.
1980	67	1074	1512	696	1206	2766
1979 и старше	57	399	367	1281	302	1289

ставляющих смертности в общей убыли рыб. Результаты этого расчета помещены в последних столбцах табл. 7.43.

Для того чтобы проследить, как меняются $M_т$ и F в течение года, запишем для каждого из определенных ранее интервалов обычные соотношения Бевертона—Холта

$$(y^i+n^i)/N^i=(F^i+M^i)/(F^i+M_т{}^i+M_e)\times$$
$$\times\{1-\exp[-1/3(F^i+M_т{}^i+M_e{}^i)]\};$$
$$N^{i+1}=\exp[-1/3(F^i+M_т{}^i+M_e)]N^i;$$

где N^i — начальная численность; F^i, $M^i_т$ — промысловая и «тресковая» смертности соответственно для i-го интервала; M_e — естественная смертность шпрота от других причин, предполагаемая постоянной.

Используя данные табл. 7.41 и 7.42 для шпрота 1979 г. рождения и старше, получаем систему уравнений, решая которую, находим параметры смертности, представленные в табл. 7.43.

Следует отметить, что полученные для M_e оценки 0,23—0,24 оказались близкими к полученной ранее естественной смертности шпрота Финского залива, равной 0,22. Учитывая, что треска, как правило, не встречается в больших количествах в Финском заливе и поэтому не оказывает там существенного влияния на шпрот, можно предположить, что естественная смертность шпрота в Балтийском море без учета влияния трески составляет 0,22—0,24.

По результатам майской тралово-учетной съемки 1982 г. была определена численность шпрота поколения 1980 г., составившая 7847 млн шт. (см. табл. 7.41). Располагая данными о вылове рыб этого поколения и их количестве, съеденном треской, получаем оценки компонента смертности за рассматриваемый период, используя метод VPA для отдельных интервалов или всего периода и предполагая, что M для данного поколения равна 0,24.

Результаты расчетов приведены в табл. 7.44.

Как видно из данных табл. 7.44, динамика промысловой смертности шпрота поколения 1980 г. отличалась от динамики этих показателей для более старших рыб (см. табл. 7.43). Промысловая смертность у них в сентябре—декабре 1981 г. оказалась равной, что объясняется, вероятно, тем, что рыбы поколения 1980 г. в этот период держались вместе с более старшими рыбами и одинаково испытывали влияние промысла. Но уже в январе—апреле промысловая смертность рыб поколения 1980 г. значительно превысила промысловую смертность более старших рыб. Мы считаем, что это произошло из-за того, что часть более старших рыб в этот период отошла в другие участки моря для нереста, а промысел шпрота велся в районах, где зимовали рыбы поколения 1980 г., которые в массе оставались еще не половозрелыми.

Динамика смертности от выедания треской у шпрота поколения 1980 г. была аналогичной с данными показателями у более старших рыб, хотя некоторые отличия в абсолютных значениях и наблюдались.

В среднем за период с мая 1981 по май 1982 г. общая смертность и смертность от выедания треской у рыб поколения 1980 г. рождения оказалась ниже, а промысловая смертность — выше, чем у более старших рыб (см. табл. 7.43 и 7.44).

Дальнейшее совершенствование методов оценки параметров смертности шпрота позволит не только

Таблица 7.43

Динамика параметров смертности шпрота для рыб поколения 1979 г. и старше

Параметр	V—VIII 1981 г.	IX—XII 1981 г.	I—IV 1982 г.	VI 1981 г.— IV 1982 г.
F	0,03	0,22	0,29	0,17
$M_т$	0,56	0,17	1,03	0,58
M_e	0,23	0,23	0,23	0,24
Z	0,82	0,62	1,55	0,99

Таблица 7.44

Динамика параметров смертности шпрота поколения 1980 г.

Параметр	V 1982 г.	I—IV 1982 г.	I 1982 г.	IX—XII 1981 г.	IX 1981 г.	V—VIII 1981 г.	V 1981 г.	V 1981 г.— V 1982 г.
N млн шт.	7847	—	12 938	—	16 393	—	18 544	—
F	—	0,44	—	0,22	—	0,01	—	0,22
$M_т$	—	0,82	—	0,25	—	0,12	—	0,40
Z	—	1,50	—	0,71	—	0,37	—	0,86

повысить точность определения его численности, но и выявить факторы, определяющие динамику запаса балтийского шпрота.

7.3. Треска

7.3.1. Краткая история исследований

Историю исследования трески условно можно разделить на два периода: до 1945 г., когда основные исследования ее проводились учеными других стран (главным образом Германии и Дании), и с 1945 г. по настоящее время, когда в эти работы активно включаются ученые СССР, ГДР и ПНР. Интерес к балтийской треске уже появляется в прошлом веке: в 1866 г. об икре трески пишет Сарс. В 1883 г. в справочнике «Рыбы Балтийского моря» Мёбиус и Хейнке [404] приводят данные о питании, миграциях, нересте и развитии икринок и личинок трески.

Уже в начале нашего века проводились научно-промысловые экспедиции. С 1903 по 1907 г. в систематических морских рейсах биологию нереста морских рыб изучал Штродтман [489]. В исследованиях Балтики принимали участие и русские ученые. Так, согласно постановлениям Международного совета по исследованию моря, в котором Россия принимала участие, в целях выполнения программы международных исследований северной части Атлантического океана, включая Балтийское море, в 1908 г. была организована Балтийская экспедиция для научно-промысловых исследований Балтийского моря, Финского и Рижского заливов [30].

В составе Балтийской экспедиции работали А. А. Лебединцев (гидрология), И. Арнольд (планктон), Е. К. Суворов (рыбы и рыболовство). Руководил экспедицией О. П. Гримм. Результаты этой экспедиции опубликованы в двух выпусках «Трудов Балтийской экспедиции» (1910 и 1913 гг.). Собранный гидрологический, гидробиологический и ихтиологический материал дал возможность установить

общую картину условий жизни в Балтийском море, его биологическую и рыбопромысловую продуктивность.

Суворов первым из наших ученых провел определение возрастного состава уловов камбалы и тем самым показал значение возрастного состава рыб в научно-промысловых экспедициях. Ихтиологические исследования в Балтийском море Суворов продолжил в последующие годы (1910, 1912, 1913) и опубликовал работу «К ихтиофауне Балтийского моря» («Труды Балтийской экспедиции», Т. 1, 1910 г., Т. 2, 1913 г.).

С 1925 по 1938 г. на судне «Посейдон» систематические экспедиции проводились Германией, результаты исследований обобщены Кендлером [344]. Районами этих исследований были Балтийское море от Кильской бухты до Готландской котловины. Первая обстоятельная биологическая характеристика балтийской трески Готландского района и Ботнического залива дана Хессле в 1923 г. [317]. Он рассматривает присутствие трески в этих районах в связи с условиями среды, ее миграции, время и места нереста, ранние стадии развития, флюктуации, питание и рост, которые сильно отличаются по районам.

По датским материалам с 1903 по 1929 г. подробное описание биологии трески сделано Поульсеном [444]. В работе рассматривается треска Северного моря, проливов Скагеррак, Каттегат, Бельтов, Арконской и Борнхольмской впадин, флюктуации ее численности и их причины, проведены расовые исследования.

Исследованиями ранних стадий занимались Апштейн [240], Э. Эренбаум, Штродтман [489], Хейнен [313], Кендлер [342], Шнейдер [462] и др.

Исследованиями популяций трески в Балтийском море занимались Шмидт [468], Цицик [507], Кендлер [364], питания — Хертлинг [316].

С 1939 по 1945 г. в Балтийском море треску ловили в основном паровые траулеры Германии, которые были сюда переведены из Северного моря. В связи с этим и исследования в это время проводились учеными Германии, которые позднее были всесторонне обобщены Мейером [392, 398].

С 1945 г. в исследования балтийской трески активно включаются ученые СССР, ПНР и ГДР. Исследования ведутся в разных направлениях. Популяционные исследования (морфометрический анализ) проводили Фендер [296] и Н. П. Бирюков [21, 24], серологические — К. Сик [481]. Широко проводились эксперименты мечения трески всеми странами, в том числе и СССР [77, 197]. Работы по мечению учеными ПНР обобщены Нетцелем [416], в ГДР — Бернер [251], ФРГ — Ламп, Тивс [362], Дании — Багге [303], Швеции — Оттерлинд [430].

Методическим вопросам оценки возраста и результатам исследований структуры отолитов посвящены работы Бернер [250], Г. И. Токаревой [185, 186], М. В. Мина [117], в последние годы — Т. Д. Барановой [15, 16].

Рост балтийской трески и параметры популяции рассматриваются в специальных исследованиях Г. И. Токаревой с привлечением обширных литературных данных, Н. П. Бирюковым, М. Я. Широковой [25], Бернер [249—251], Косиор [356], Туровым [495], М. Н. Лишевым, И. А. Лаблайка [375], Н. П. Бирюковым [21, 24] и др.

В системе комплексного изучения состояния запасов балтийской трески важное значение имеют также половое созревание и особенности размножения. М. Я. Широкова [205, 206] исследовала индивидуальные и внутривидовые различия в темпе полового созревания, годичный и жизненные половые циклы. Анализом соотношения полов в нерестовом стаде, в уловах в целом занимались Туров [495], Н. П. Бирюков [21] и Бернер [253].

Как известно, пополнение промыслового стада, в целом запас трески ежегодно резко меняются, и в этой связи важное значение приобретает исследование особенностей размножения. В рассматриваемый период наиболее подробные работы по этому вопросу проведены Г. Грауман [41—44, 46]. Ею дана характеристика нереста и условий размножения трески, оценка отдельных нерестилищ в воспроизводстве трески, рассматриваются факторы, определяющие численность балтийской трески и др. Учет молоди в Балтийском море начат в 1954 г. в восточной части моря [21], с 1962 г. в Гданьском заливе, несколько позже в Борнхольмском районе такие работы начинает проводить Нетцель (ПНР) [414, 415], с 1968 г. в более северных районах — БалтНИИРХ [97, 361].

Наряду с развитием исследований разных направлений биологии трески, усиливается и изучение ее питания [67, 106, 119, 183], особенно в 70-е—80-е годы [190, 191, 244], когда начинаются попытки разработки многовидовой модели экосистемы Балтики. Выявление трофических связей трески и оценка ее влияния на запасы кормовых объектов является необходимым элементом для разработки таких моделей. Регулярные исследования питания балтийской трески с 1963 г. проводит БалтНИИРХ [377, 496].

В южных районах моря (в основном Гданьский залив) детальные исследования по составу пищи трески и объему годового рациона проводят польские исследователи [488, 491, 504].

В 1963—1985 гг. БалтНИИРХ проводил регулярные исследования питания трески в восточных районах, а в 60-е и в начале 70-х годов также в южных и западных районах моря. Изучается спектр питания и накормленность трески на разных этапах жизненного цикла от молоди до взрослой рыбы по районам, сезонам и годам [81, 97, 191, 361]. Определяется влияние биомассы и распределения корма (рыб и беспозвоночных) на условия питания трески [168, 190, 376].

Изучается влияние условия питания на физиологическое состояние половозрелой рыбы, созревание, нерест [72, 106, 496]. Рассчитан естественный (экологический) рацион и годовое потребление треской корма [106, 377]. Данные о количестве и динамике естественного изъятия треской рыб дают основу для определения влияния трески на запасы сельди и шпрота [81, 105, 190, 353, 377].

Урожайность поколений и колебания запаса трески привлекли внимание ученых разных прибалтийских стран [252, 323, 342, 344]. В СССР динамикой численности балтийской трески занималась Т. Ф. Дементьева [54—56], Г. И. Токарева [186, 187], Н. П. Бирюков [21, 24], а в настоящее время систематические исследования для оценки запасов и составления прогнозов проводит БалтНИИРХ [97].

В последние годы в БалтНИИРХе [104, 376, 377] большое внимание обращается на изучение возмож-

ности построения достаточно корректной и реальной биологической основы для моделирования экосистемы Балтики, связанной с треской, и расчета по этой модели био- и промыслового прогноза условий жизни, величины, распределения и качества запасов и уловов восточно-балтийской трески.

7.3.2. Биология

Систематическая принадлежность и внутривидовая дифференциация

Балтийская треска относится к отряду Gadiformes — трескообразные, семейству Gadidae — тресковые, роду *Gadus* трески — *Gadus morhua L.* Она имеет три дорсальных плавника и два анальных, нижняя челюсть не достигает конца верхней. В нижней челюсти хорошо выраженный усик.

Один вид с несколькими подвидами: ID 14—16, IID 14—17, IIID 17—20, IA 17—33, IIA 18—21. Число позвонков 51—56, на первой жаберной дуге имеется 18—23 тычинок [172].

Треску Балтийского моря по биологическим, биостатическим, биохимическим и генетическим признакам [21, 173, 296, 327, 481] можно разделить на две популяции: западно-балтийскую (*Cadus morhua morhua L.*) и восточно-балтийскую (*Gadus morhua callarias L.*). Первая из них обитает в подрайонах 22—24, вторая — в подрайонах 25—32 и приспособилась к жизни в водоеме с низкой соленостью и расслоением моря.

Западная треска характеризуется низкими средними значениями общего числа позвонков (51,09± ±0,074), числа позвонков с неполными гемальными дугами (18,08±0,045), а также высоты первого анального плавника (2,95±0,027), количества лучей в первом спинном плавнике (13,97±0,045) и более короткими отростками плавательного пузыря. Восточно-балтийская треска, кроме перечисленных признаков, отличается также сроками нереста, его условиями, диаметром откладываемой икры, характером миграций и возрастной и размерной структурой нерестовых промысловых концентраций.

Популяция восточно-балтийской трески по своей структуре не является однородной, очевидно, из-за довольно значительной географической и экологической разобщенности отдельных нерестилищ (Борнхольмская, Готландская, Гданьская впадины). Тем не менее анализ морфометрических и биологических данных не дает права утверждать наличие полной изоляции трески, размножающейся в Борнхольмской, Гданьской и Готландской впадинах.

Отмечаются также заходы восточно-балтийской популяции трески в Западную Балтику, в основном в подрайон 24.

Структура популяции, рост и половое созревание

Размерно-весовой и возрастной состав запаса и уловов зависит от численности поколений, составляющих этот запас, а по отдельным районам и сезонам и от закономерностей его распределения. Большое влияние на структуру популяции оказывает изменение обеспеченности пищей и роста рыб в популяции.

С 1976 по 1984 г. в научных исследовательских уловах встречалась треска длиною (общей) от 4 до 115 см массой от нескольких грамм до 13—14 кг и возрастом до 12—14 лет. Максимальная длина рыбы отмечена 125 см (масса 25 кг). В промысловых уловах преобладает треска длиной 35—45 см по проценту общего числа штук и 40—50 см — по проценту общей массы (табл. 7.45) в возрасте 3—5 лет (табл. 7.46).

В нерестовом стаде главное значение имеют 3—5-годовики по проценту числа штук и 4—6-годовики по проценту общей массы (табл. 7.47) длиною 35—55 и 40—60 см соответственно (табл. 7.48).

Возрастной и размерный состав нерестового стада меняется по годам и зависит от численности поколений, пополняющих этот запас (табл. 7.49, 7.50).

В начале нереста на нерестилищах присутствует более крупная рыба, которая созревает раньше, потом идет более молодая (табл. 7.51).

Балтийская треска отличается от основных близких ей подвидов значительно меньшими размерами. Ее средняя длина в уловах обычно не превышает 40—45 см, в то время как средняя длина атлантической трески в большинстве случаев колеблется от 50 до 60 см.

Подобная разница в размерах, очевидно, является следствием раннего наступления половой зрелости трески в условиях относительно теплого Балтийского моря и последующего закономерного снижения ее роста. Подтверждением этого является тот факт, что до четырехлетнего возраста средняя длина возрастных групп атлантической трески почти не отличается. Разница становится заметной лишь по достижении 4 лет, т. е. после того как балтийская треска в массе созреет и темп ее роста снизится.

Характер роста трески в Балтийском море различен. Имеется несколько групп рыб, отличающихся приростом на том или ином году жизни. Разница в приросте первого года явилась результатом неодновременного нереста трески и вследствие этого разного по продолжительности периода ее питания.

Наибольшую длину в течение первых 4 лет жизни имеют особи с наилучшим ростом на первых годах жизни. Такая треска в нерестовый период обычно составляет не менее 75 % уловов. Медленно растущие особи, как правило, имели меньшие приросты на первом и последующих годах жизни.

Характерной особенностью балтийской трески является также ее интенсивный рост не в летние месяцы, как это отмечено для многих видов рыб, а в октябре—ноябре — в период особенно интенсивного питания.

В последующие месяцы, т. е. в январе—июне, когда происходит созревание и нерест, скорость роста трески заметно снижается и на отолитах у большинства особей образуются годовые кольца [186, 187].

Средние длина и масса трески отдельных возрастных групп меняются по районам, периодам лет и годам (табл. 7.52). Теоретическая длина по возрастным группам приведена в табл. 7.53.

Массовое созревание самок восточно-балтийской трески происходит в возрасте 3 или 4 лет при длине 35—40 см, самцов — в возрасте 2 или 3 лет при длине 25—30 см. Западно-балтийская треска созревает несколько раньше: при длине 37,8 см в возрасте 2,7 лет становятся половозрелыми 50 % самок и при длине 35,2 см в возрасте 2,2 лет — 50 % самцов [253].

Таблица 7.45

Размерный и массовый состав промысловых уловов восточно-балтийской трески (средний за 1978—1984 гг.)

Показатель	Длина, см											
	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Процент общего числа штук	3,1	14,9	24,8	22,9	17,6	7,8	3,6	2,2	1,5	0,8	0,7	0,1
Процент общей массы	0,8	6,0	15,4	20,6	20,5	12,9	7,3	5,4	4,4	2,5	4,0	0,2

Таблица 7.46

Возрастной и массовый состав промысловых уловов восточно-балтийской трески (средний за 1978—1984 гг.)

Показатель	Возраст, лет									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10+
Процент общего числа штук	1,4	9,4	24,6	32,3	19,6	8,6	2,6	1,2	0,2	0,1
Процент общей массы	0,1	2,1	12,1	27,6	26,7	17,1	6,7	5,7	1,2	0,7

Таблица 7.47

Возрастной и массовый состав запаса трески на нерестилищах в Восточной Балтике в период нереста (в среднем за 1960—1984 гг.)

Показатель	Возраст, лет									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10+
Процент общего числа штук	4,2	7,4	22,1	33,7	21,1	7,9	1,9	1,0	0,6	0,1
Процент общей массы	0,3	1,7	10,7	28,4	28,4	15,6	4,8	4,7	4,7	0,7

Таблица 7.48

Размерный и массовый состав запаса трески на нерестилищах в Восточной Балтике в период нереста (средний за 1960—1984 гг.)

Показатель	Длина, см														
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Процент общего числа штук	4,3	2,0	3,8	5,7	7,2	12,5	20,6	18,2	11,5	6,4	4,1	2,3	1,0	0,3	0,1
Процент общей массы	0,1	0,1	0,5	1,2	2,5	6,9	17,6	19,7	16,9	12,4	10,1	6,8	3,5	1,3	0,5

Таблица 7.49

Возрастной состав трески (% общего числа штук) в Восточной Балтике (Готландская котловина) в марте—июне в 1960—1980 гг.

Год	Возраст, лет							
	1	2	3	4	5	6	7	8+
1960	0,8	2,8	39,1	34,2	17,8	4,6	0,6	0,1
1961	3,1	11,6	21,4	41,4	16,5	5,1	0,8	0,1
1962	0,3	11,0	31,3	25,0	25,6	5,0	1,4	0,4
1963	0,3	8,8	34,7	29,1	19,3	6,2	1,3	0,3
1964	0,5	4,8	24,3	33,7	24,1	8,0	3,1	1,5
1965	13,1	20,3	20,0	23,1	14,5	5,9	2,3	0,8
1966	5,7	21,4	28,6	25,3	13,3	4,1	1,4	0,2
1967	1,6	4,8	35,4	32,5	18,2	5,8	1,7	0,1
1968	9,2	5,6	25,8	31,2	18,3	7,6	1,7	0,6
1969	2,6	4,3	13,8	38,2	29,8	8,9	2,1	0,3
1970	4,8	1,5	13,2	31,2	35,6	10,2	2,8	0,7
1971	0,3	7,6	9,2	26,2	36,6	16,8	3,0	0,3
1972	0,9	2,7	21,9	42,2	20,6	9,0	2,0	0,7
1973	4,3	0,8	11,8	46,2	21,4	11,9	3,8	0,5
1974	1,7	9,9	23,1	27,7	22,2	9,8	4,3	1,3
1975	0,8	3,5	36,0	46,8	9,8	3,1	—	—
1976	1,6	0,6	10,0	41,6	30,6	13,1	2,2	0,2
1977	28,6	2,0	8,1	30,3	18,0	10,0	2,3	0,7
1978	9,4	26,6	13,4	23,1	17,0	7,9	2,3	0,3
1979	0,3	19,2	33,4	30,1	7,8	5,6	3,0	0,6
1980	—	1,0	18,4	46,8	22,6	7,9	2,3	1,0

Возрастной, размерный и массовый состав трески отличается по районам (табл. 7.51).

Так, в период нереста наиболее крупная зрелая треска держится на нерестилищах в Восточной Балтике, в Готландской котловине, в более мелководных Вентспилсском, Лиепайском и Клайпедском районах остается более молодая незрелая рыба. В Гданьском заливе обычно держится много молоди.

Созревание трески по районам показано в табл. 7.54.

Темп созревания трески меняется по годам и зависит от характера ее роста в годы, предшествующие созреванию [186, 187]. Так, если условия роста поколения перед созреванием оказывались благоприятными и рост хорошим, пополнение промыслового стада впервые созревшими трехгодовиками увеличивается. При ухудшении роста возрастает численность рыб, впервые созревающих в возрасте 4 лет.

Темп созревания восточно-балтийской трески показан в табл. 7.55.

Количество участвующих в нересте рыб также меняется по годам. Так, в период нереста на Готландском нерестилище доля самок в стадиях зрелости от III и более у трехгодовиков колеблется от 12 до 90 % (в среднем составляя 57 %), у четырех-

Таблица 7.50

Размерный состав траловых уловов трески (% общего числа штук) на Готландском нерестилище

Месяц	Длина, см												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Март	7,0	9,1	20,7	24,9	13,0	9,7	7,9	4,6	1,7	0,9	0,4	0,1	49,1
Апрель	14,5	11,3	16,6	23,5	14,3	9,1	4,4	2,6	2,2	1,1	0,2	0,2	47,8
Май	19,8	13,2	13,2	18,0	13,4	11,6	6,6	1,9	1,2	1,0	—	—	46,4
Июнь	22,5	20,4	11,4	19,4	11,1	8,7	2,4	3,8	0,3	—	—	—	44,1

Таблица 7.51

Возрастной состав траловых уловов трески (% общего числа штук) в Восточной Балтике в марте—апреле

Район	Возраст, лет								
	1	2	3	4	5	6	7	8+	средний
Готландская впадина	0,9	2,0	11,8	28,9	23,4	20,9	8,5	3,6	4,9
Вентспилсский	3,7	30,4	30,6	23,2	8,1	1,9	1,3	0,8	3,2
Лиепайский	2,4	19,1	29,1	29,5	13,6	3,6	1,8	0,9	3,6
Клайпедский	11,1	36,7	21,4	16,2	6,7	3,6	1,6	0,7	2,9
Гданьский	37,9	12,4	14,1	21,0	7,7	4,7	1,4	0,8	2,7

годовиков — от 47 до 96 % (в среднем 81 %), у пятигодовиков — от 20 до 100 % (в среднем 84 %), у шестигодовиков — от 90 до 100 % (в среднем 98 %). Д. В. Узарс [190] показано, что ход созревания гонад, сроки и масштабы перехода рыбы на преднерестовый этап в основном определяются обеспеченностью пищей в осенне-зимний период, в это время определяется и темп роста особей и в известной мере состав и величина нерестового стада.

Для балтийской трески характерно то, что в ходе годичного полового цикла половозрелые особи (самки) этого вида имеют яичники II стадии зрелости, которые визуально неотличимы от яичников II стадии неполовозрелых самок [205, 206]. Известно, что нерестовые метки на отолитах балтийской трески отсутствуют, и поэтому ни одним из существующих методов не представляется возможным определить у балтийской трески соотношение между половозрелой и неполовозрелой частью популяции. Балтийская треска характеризуется порционным типом вителлогинеза, возникающего на базе растянутого (до 4 мес) вступления ооцитов в период трофоплазматического роста. В ходе одного нерестового сезона балтийская треска выметывает 3 порции икры. Высказывается также предположение, что часть балтийской трески нерестится не ежегодно.

Для определения годичного полового цикла балтийской трески в нашей стране используется шестибалльная шкала (табл. 7.56), в других прибалтийских странах — восьмибалльная.

Сезонные изменения в яичниках в связи с переходом от II к III стадии начинаются в ноябре. В ходе годичного цикла наиболее продолжительной является III стадия (4 мес), срок пребывания яичников в IV стадии — около месяца. В семенниках сезонные изменения, связанные с созреванием, наступают несколько раньше, чем у самок — в октябре. Наиболее продолжительной также является III стадия. Примерно за месяц до нереста семенники переходят в IV стадию развития. Соотношение самцов и самок по возрастным и размерным группам по районам несколько отличается, но везде сохраняется тенденция преобладания самцов в младших возрастных группах и уменьшение их доли в старших (табл. 7.57, 7.58).

Плодовитость различных возрастных групп трески показана в табл. 7.59.

Особенности питания трески и пищевые взаимоотношения

Треска имеет широкий пищевой спектр. Она потребляет *Mysidacea (Mysis mixta), Amphipoda (Pontoporeia affinis, P. femorata, Hyperia galba, Gammarus salinus), Cumacea (Diastylis rathkei), Polychaeta (Hirmothoe sarsi), Isapoda (Mesidotea entomon), Priapuloidae (Halicryptus spinilosus), Decapoda (Crangon crangon), Sprattus sprattus b., Clupea harengus m., Pomatoschistus minutus, Osmerus eperlanus, Enchelyopus cimbrius.*

По составу пищи, особенностям питания и распределения, характеру роста у трески выделяются три размерные группы: от 5 до 20 см, от 20 до 30 см и более 30 см.

Молодь длиной менее 20 см поедает *Mysis mixta* и *M. sarsi*, которые составляют 85 % пищи (табл. 7.60). У трески длиной 20—30 см доля *M. mixta* в питании снижается до 40 %, а доля *Mesidotea* и прочей рыбы — увеличивается до 30—40 % (см. табл. 7.60). Смена состава пищи происходит весной, когда молодь переходит во вторую размерную группу (длина рыбы 18—20 см), и обусловлена не только снижением численности основного корма — *M. mixta*. Характер роста и потребности организма в питательных веществах в каждый из периодов жизни рыбы различаются. Годовики трески основные энергетические ресурсы расходуют на увеличение длины тела, прирост массы на единицу длины у них невелик (0,3—0,6 г/см). У двухгодовиков основная функция организма — обеспечение формирования и созревания гонад. Этот период характеризуется увеличением прироста массы на единицу длины тела (0,7—0,9 г/см). Для обеспечения этого треска переходит на питание более разнооб-

Таблица 7.52

Средние длина и масса балтийской трески по возрастным группам

Район	Период, годы	Возраст, лет										Автор
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Средняя длина, см												
Борнхольмская впадина	1953—1955	—	36,1	43,7	50,6	59,2	67,5	68,9	90,3	82,5	105,5	Бернер, 1960
юг	1967—1976	16,7 (13,6—22,6)	28,3 (24,3—30,7)	38,8 (36,7—41,8)	46,0 (43,7—47,8)	54,0 (50,4—56,8)	63,6 (60,6—68,4)	70,8 (66,5—78,0)	79,2 (66,0—86,0)	88,3 (78,0—98,0)	—	Бернер, 1960 „
север	1967—1976	20,3 (16,2—23,9)	29,7 (25,9—33,8)	40,1 37,2—42,6	47,2 (44,9—49,7)	55,3 (52,4—59,2)	64,8 (60,7—70,0)	71,6 (65,8—77,3)	77,0 (66,0—92,0)	88,6 (78,0—100,0)	97,3 (92,0—102,0)	„
Гданьская впадина	1959—1966	—	28,9	33,9	41,5	49,0	59,0	68,5	80,2	82,5	—	Н. П. Бирюков, 1970
	1972—1973	—	31,1	38,6	44,3	51,8	60,1	67,5	69,0	—	—	Косиор, 1977
Готландская котловина	1956—1966	—	29,0	34,9	42,0	50,0	59,2	63,0	79,2	81,0	82,5	Н. П. Бирюков, 1970
	1975—1984	—	— (25,1—33,0)	36,1 (32,1—38,7)	42,5 (40,5—44)	49,6 (46,0—53,0)	56,4 (52,0—62,6)	61,8 (54,4—72,1)	64,1 (47,0—85,0)	66,0 (55,0—86,0)	70,3 (60,0—86,0)	Т. Д. Баранова, 1985
Средняя масса, г												
Борнхольмская впадина	1953—1955	—	431	793	1252	1977	3037	3024	6800	5413	10560	Бернер, 1980
юг	1967—1976	49 (23—108)	214 (112—289)	565 (485—704)	955 (825—1044)	1534 (1278—1724)	2441 (2091—2877)	3562 (2985—4242)	5068 (3695—6803)	7045 (4290—9550)	— —	„ „
север	1967—1976	79 (56—110)	240 (147—284)	612 (492—732)	1010 (847—1162)	1617 (1469—2072)	2616 (2043—3458)	3718 (2722—5442)	5005 (3266—9500)	7365 (4620—11325)	— —	Бернер, 1980 „
Гданьская впадина	1959—1966	—	289	457	789	1292	2035	2920	4526	7300	—	Н. П. Бирюков, 1970
	1965—1974	144	296	571	959	1518	2352	3609	4604	8536	11127	Косиор, 1977
Готландская котловина	1956—1966	—	324	488	764	1290	1979	2864	4099	6500	6100	Н. П. Бирюков, 1970
	1975—1984	—	219 (142—330)	452 (313—558)	754 (614—860)	1195 (975—1549)	1761 (1360—2494)	2271 (1407—3675)	2664 (970—5460)	2862 (1435—6310)	3277 (1620—4400)	Т. Д. Баранова, 1985

Таблица 7.53

Теоретическая длина балтийской трески по возрастным группам

Район	Возраст, лет										Автор
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Борнхольмская впадина	18,3	29,6	39,4	47,8	55,1	61,5	67,0	71,7	75,8	—	Бернер, 1980
Гданьская впадина	12,5	25,3	36,2	45,5	53,6	60,5	66,4	7-,6	75,8	79,6	Коснор, 1977
Готландская котловина	14,4	25,9	35,9	44,5	51,9	58,4	63,9	68,7	72,9	76,5	И. А. Лаблайка, 1975

разной пищей, а также более крупными объектами, добыча которых требует меньших энергетических затрат.

По особенностям распределения и питания молоди трески можно выделить следующие периоды:

1. Осенне-зимний. Основной пищей молоди являются *M. mixta*, которые составляют 50—70 % рациона. Потребление *M. mixta* различается по районам моря: более интенсивно этот вид поедается в подрайоне 28, в подрайоне 26 их доля ниже (табл. 7.60).

2. Весенне-летний. Треска поедает *H. sarsi*, *H. mixta*, *Mesidotea* и рыбу. Доля *H. sarsi* и *M. mixta* в подрайоне 26 составляет в среднем 50 и 15 % пищи соответственно. В подрайоне 28 более интенсивно, чем в подрайоне 26, поедается *M. mixta* (39 % пищи), а значение *H. sarsi* меньше (около 30 %). *Mesidotea* поедается треской длиной 20—30 см.

Отмечаются различия в накормленности и составе пищи трески по глубинам моря. В марте—апреле молодь длиной 5—20 см более интенсивно питается на глубинах свыше 70 м червями, что обусловлено для нее лучшими кормовой базой и термикой. Треска длиной 20—30 см обитает в зоне глубин 50—90 м и поедает *Mesidotea* и рыбу. В мае—июне интенсивное питание у молоди трески происходит в основном в зоне глубин менее 70 м и обусловлено перемещением беспозвоночных и рыбы в прибрежные районы моря. Состав пищи и накормленность трески различаются по годам и определяются в значительной мере температурным режимом моря и суровостью зим. У молоди длиной 5—20 см наибольшая накормленность отмечается после средних и суровых зим. Значение мизид в пище в холодные годы в 1,5—2 раза выше, чем в теплые. Треска длиной 20—30 см, имея более широкий пищевой спектр, потребляет различные по экологии пищевые организмы (*M. mixta*, *Mesidotea*, сельдь и шпрот). Влияние температурных условий на интенсивность питания четко не проявляется.

Обеспеченность пищей молоди трески определяется главным образом биомассой кормовых орга-

Таблица 7.54

Созревание трески (для 50 % самок и 50 % самцов) по районам

Район	Возраст созревания, лет			Длина зрелости, см		
	Самец	Самка	В среднем	Самец	Самка	В среднем
Кильская бухта	2,20	2,70	—	35,2	37,8	—
Мекленбургская бухта	2,60	3,08	2,89	40,9	45,1	43,3
Арконская впадина	2,52	3,15	2,90	38,6	45,9	43,0
Борнхольмская впадина	2,42	3,14	2,77	30,3	37,3	33,5

Таблица 7.55

Темп созревания самцов и самок 1955—1961 гг. рождения, % общего числа штук

Год промысла	Самки года рождения					
	1956	1957	1958	1959	1960	1961
1961	99	95	64	5	—	—
1962	89	89	74	64	10	—
1963	—	—	87	82	68	16

Год промысла	Самцы года рождения					
	1956	1957	1958	1959	1960	1961
1961	97	99	98	61	—	—
1962	—	94	87	89	60	—
1963	—	92	97	96	91	68

Таблица 7.56

Годичный половой цикл (стадии зрелости) восточно-балтийской трески

Пол	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Самка	III	III	IV	V	V	VI—II	VI—II	II	II	II	III	III
Самец	III	III—IV	IV	V	V	VI—II	VI—II	II	III	III	III	III

Таблица 7.57

Доля самок (% общего числа штук) по возрастным группам по районам

Подрайон	Возраст, лет								Автор
	1	2	3	4	5	6	7	8+	
22	51,4	55,0	59,6	70,0	69,4	86,7	100,0	—	Бернер, 1981
24	52,6	56,0	58,0	64,5	83,7	85,3	—	—	
25	45,6	44,9	36,9	45,7	57,8	64,5	78,3	—	
25 (север)	55,0	34,9	33,5	42,9	53,8	59,3	76,3	—	
25 (юг)	42,9	49,3	39,8	49,4	65,8	82,0	90,0	—	
26, 28 *	36,7	51,8	49,7	54,2	65,1	64,2	88,1	94,4	Данные БалтНИИРХа
26 **	—	26,7	33,4	36,6	45,5	52,3	58,4	64,5	

* Промысловые уловы в среднем за год.
** Научно-исследовательские уловы на нерестилищах.

Таблица 7.58

Доля самок (% общего числа штук) по размерным группам по подрайонам

Подрайон	Длина, см													Автор
	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	
22	60,0	45,5	54,1	50,3	54,5	58,7	60,5	74,6	75,0	80,0	83,3	90,9	100,0	Бернер, 1981
24	56,9	42,7	49,6	50,1	54,2	60,7	57,0	70,6	75,5	78,3	81,0	89,7	86,1	
25	15,1	48,3	44,5	38,2	34,5	39,6	45,8	53,0	57,7	68,9	70,2	81,2	93,9	
25 (север)	50,0	30,6	39,7	29,3	29,1	38,4	41,1	50,7	54,0	68,5	65,6	77,3	91,7	
25 (юг)	44,4	53,8	47,6	42,5	39,1	41,1	53,0	56,9	65,0	70,0	85,7	90,0	100,0	
26,28		27,0	43,0	46,5	47,6	50,6	56,1	59,0	64,9	74,0	79,5	97,3	98,0	Данные БалтНИИРХа

Таблица 7.59

Плодовитость (тыс. шт.) различных возрастных групп балтийской трески

Плодовитость	Возраст, лет							Автор
	2	3	4	5	6	7	8	
Средняя	156	427	626	1061	1727	2388	2796	Широкова, 1971
Максимальная	197	974	1056	2325	2697	4491	7595	
Средняя	337	600	984	1582	2369	3589	3589	Бернер, 1960

Таблица 7.60

Состав пищи трески (% общей массы) различной длины по сезонам (1963—1984 гг.)

Подрайон	Компонент	Длина, см											
		5—20				20—30				более 30			
		I	III—IV	V—VI	IX—XII	I	III—IV	V—IX	IX—XII	I	III—IV	V—VI	IX—XII
28	*Mysidacea*	74	54	42	69	44	14	10	41	18	5	4	17
	Mesidotea	2	3	6	5	24	42	25	27	38	45	26	43
	Pontoporeia	7	6	7	10	10	4	26	13	4	2	6	10
	Harmathae	12	32	29	8	10	25	17	8	7	10	10	4
	Прочие беспозвоночные	4	4	8	5	5	1	4	3	1	1	—	1
	Сельдь	—	—	—	—	2	5	3	1	15	15	20	12
	Шпрот	—	—	—	1	3	8	14	4	12	17	26	9
	Прочая рыба	1	—	8	3	2	1	1	3	5	5	8	3
26	*Mysidacea*	47	32	15	54	21	14	1	39	14	4	2	15
	Mesodotea	—	2	4	4	30	15	14	16	24	12	12	32
	Pontoporeia	15	2	8	17	3	2	5	3	1	2	1	1
	Harmathae	30	62	66	15	21	36	55	20	14	17	30	17
	Прочие беспозвоночные	4	1	5	4	4	1	4	10	1	—	4	1
	Сельдь	—	—	—	—	1	6	6	3	15	17	10	13
	Шпрот	3	1	1	4	16	25	15	6	26	43	31	12
	Прочая рыба	1	—	1	2	4	1	1	3	5	5	11	9

низмов и соотношением видов, которые меняются в течение вегетационного периода (от весны к осени) в зависимости от гидрологических условий и экологических особенностей самих организмов.

Изучение особенностей экологии молоди трески дает возможность определить более репрезентативные районы и сезоны для проведения учета годовиков и двухгодовиков. В Восточной Балтике таким является Вентспилсский район. В целях заблаговременной оценки урожайности поколений для прогноза учетные работы можно проводить в декабре—январе (годовики и двухгодовики обитают в одном общем ареале и условия зимы еще мало влияют на их миграции по зонам глубин).

Этап половой зрелости организма характеризуется своим составом корма и спецнфикой пищевых отношений. Треска по достижении длины 30 см становится хищником. Она потребляет рыб, в основном сельдь и шпрот, из беспозоночных в основном *Mesidotea* (см. табл. 7.60). Треска длиной более 40 см больше потребляет *Mesidotea*, сельдь и прочую рыбу и меньше питается мелкими беспозвоночными, такими, как *M. mixta, Pontoporeia, H. sarsi*, чем треска длиной 30—40 см. Доля шпрота в пище у обеих размерных групп одинакова.

Питание и распределение половозрелой трески различаются по сезонам.

Осенью треска обитает в прибрежных районах и питается сельдью, *Mesidotea* и *M. mixta*. Можно выделить два типа нагула:

— высокая накормленность, общий индекс больше 100‰, значительную долю пищи составляет рыба — это годы в основном высокой численности сельди;

— низкая накормленность, общий индекс 80 ‰, доля рыбы очень небольшая, основная пища — *Mesidotea* и *M. mixta*.

Зимой треска еще обитает в прибрежной зоне моря, состав пищи по сравнению с осенью не меняется. Отмечается только увеличение доли шпрота в отдельные годы. Интенсивность питания зимой определяется условиями нагула предшествующей осенью: после интенсивиого осеннего нагула она зимой снижается, а при слабой накормленности осенью повышается.

Весной нерестовая треска обитает на нерестилищах, а преднерестовая еще нагуливается в прибрежных районах моря. Накормленность трески ниже, чем осенью и зимой. Состав пищи различается по годам и районам и определяется количеством потребления сельдевых в годы с различным гидрологическим режимом. В годы аэрации глубинных вод в Восточной Балтике треска в основном обитает на нерестилищах и питается шпротом (83 % пищи); оставшаяся в прибрежных районах треска поедает *Mesidotea*, сельдь и шпрот (доля последнего в пище составляет только 27 %).

В годы стагнации накормленность трески на глубинах низкая, значение рыбы невелико, в прибрежных районах интенсивность питания выше и основной пищей является *Mesidotea* и сельдь.

В годы частичной аэрации накормленность трески на глубинах ниже, чем в годы аэрации. Основным кормом является шпрот (30 % рациона), сельдь и *H. sarsi*. В прибрежных районах накормленность выше, чем на нерестилищах. Треска питается сельдью, шпротом, *Medotea*, доля сельди в пище составляет около 40 %.

Летом нерестовая треска обитает на нерестилищах, а отнерестившаяся — в прибрежных районах моря. Накормленность взрослой трески, как и молоди, в прибрежных районах выше, что обусловлено не только более интенсивным питанием послеиерестовой трески, но и условиями питания (летом продуктивная зона моря перемещается на меньшие глубины).

Наблюдаются различия в характере обмена у самцов и самок трески, в составе пищи и поведении. Наибольшая интенсивность питания наблюдается у самок на II—IV стадиях зрелости гонад. Основную пищу (около 65 %) составляет рыба. У самцов интенсивность питания и значение рыбы в пище ниже. Особенно низкая накормленность у самцов на III и IV стадиях зрелости гонад: они по интенсивности питания близки к нерестовым самкам и самцам.

Питаясь сельдевыми более интенсивно, чем самцы, самки в марте—мае держатся выше над грунтом и донными тралами вылавливаются в меньшей степени. Это свидетельствует о более высокой смертности самцов как по физиологическим причинам, так и от вылова в период нереста.

Обеспеченность пищей является одним из факторов среды, определяющих интенсивность генеративных процессов.

3. Осенне-зимний. Ход созревания гонад, сроки и масштабы перехода рыбы на преднерестовый этап определяются обеспеченностью пищей в период нагула. В годы высокой обеспеченности пищей треска интенсивно питается (рыба, *Mesidotea*, *M. mixta*), относительная масса печени высокая (около 40 % самок в январе на III стадии зрелости гонад). В годы средней и низкой обеспеченности пищей уменьшается доля рыбы и *M. mixta* в питании, относительная масса печени в конце нагульного периода обычно низкая и треска созревает медленно (доля самок на III стадии зрелости в январе составляет 20—30 %).

4. Весенний. Нерестовое стадо формируют особи с большей относительной массой печени и гонад. Малоупитанные рыбы в основном находятся на II стадии зрелости и встречаются в прибрежных районах моря. Сроки и эффективность нереста в весенний период определяются также гидрологическими условиями.

В годы аэрации глубинных слоев условия для нереста трески хорошие, но эффективность нереста может быть различной. Высокая урожайность поколений отмечается в годы благоприятного нагула предшествующей осенью. В холодные зимы и при худших условиях осеннего нагула успешность нереста ниже.

В средние по гидрологическому режиму годы толщина пригодного для нереста слоя воды сокращается, условия нереста ухудшаются. Нерест проходит по-разному. При благоприятных условиях осеннего нагула биологическое состояние трески хорошее, созревание гонад весной проходит успешно, эффективность нереста средняя и высокая. В случае усиления стагнации созревание задерживается, выживание икры и нерест мало эффективны. При неблагоприятных условиях осеннего нагула треска откармливается весной, но созревание гонад проходит медленно: в апреле около 30 % самок находится на II стадии зрелости гонад, т. е. в нересте не участвуют. Успешность нереста средняя или очень

низкая. В годы стагнации глубинных вод в Восточной Балтике условия нагула и размножения трески плохие.

Треска питается в течение суток с разной интенсивностью. У молоди (длина 10—20 см) два пика в питании — утренний и вечерний, причем утреннее питание более ярко выражено. У рыб длиной 20—30 см время активного питания продолжительнее (дневные и вечерние часы), максимум накормленности наблюдается вечером. Имеются различия в суточной ритмике питания по сезонам (у всех размерных групп) и в зависимости от состояния рыбы. Осенью усиленное питание начинается утром или днем и заканчивается вечером, основные кормовые объекты — ракообразные. Весной начало питания — вечером, с усилением ночью и утром; молодая треска питается ночью в пелагиали, а преднерестовая рыба — утром в придонных слоях воды, основные объекты — рыба и черви.

Время питания зависит от состава и экологии пищевых объектов, т. е. питание происходит в периоды их наибольшей концентрации и доступности. *M. mixta* треской поедается утром и вечером, *Mesidotea* — днем и вечером, сельдь и черви — днем, шпрот — ночью (в пелагиали) и в первой половине дня (в придонных слоях).

Рацион трески определяется на основе суточных наблюдений за ее питанием, проведенных в полевых условиях. Методом математической статистики проанализирована суточная динамика питания. Расчет рациона производился по теоретическим законам распределения случайной величины индекса наполнения желудка в течение суток. Был определен средний статистический экологический рацион, который составляет от 0,60 до 2,25 % массы тела. Полученный таким путем рацион отражает обеспеченность пищей в придонных условиях. Значение экологического рациона ниже рациона, полученного в эксперименте, когда пища рыбе дается в избытке и доступность ее лучше. Количество съеденной треской пищи в подрайонах 28 и 26 составляет около 800 тыс. т при среднем и 1300 тыс. т при высоком запасе трески. Из них на долю сельдевых приходится около 200—300 тыс. т, *Mesidotea* — 300—600 тыс. т, *H. sarsi* — около 100 тыс. т.

Количество съеденных *M. mixta* и *Pontoporeia* различается по периодам лет в 2—3 раза, что также указывает на колебание их биомассы.

Являясь хищником, треска отрицательно влияет на популяцию шпрота и сельди. Шпрота треска в среднем за год съедает около 100—150 тыс. т, что составляет до 35 % запаса шпрота 1978—1979 гг. Потребление треской шпрота увеличивается в периоды аэрации глубинных вод в Готландской впадине. Воздействие трески, видимо, является в эти годы первостепенной причиной естественной смертности шпрота.

Треска потребляет ежегодно около 120 тыс. т сельди. Изъятие треской сельди увеличивается вследствие появления урожайных поколений сельди, при малом запасе молодой сельди треска питается другой пищей (шпротом, беспозвоночными).

Одновременно треска интенсивно потребляет *Mesidotea* и *H. sarsi*, которые другими рыбами используются слабо. Известно, что чрезмерное развитие этих организмов оказывает неблагоприятное влияние на другие кормовые беспозвоночные. Истребляя интенсивно в течение года всеядную изоподу *Mesidotea* и хищного *H. sarsi*, треска регулирует их численность и способствует поддержанию сбалансированной экосистемы.

Воспроизводство

Специфические географические особенности и гидрологические условия (большая опресненность, двухслойность водных масс, ограниченность сообщения с Атлантикой, особенности рельефа дна, большая протяженность в направлении с юга на север) Балтийского моря, являющегося окраиной ареала трески, сказались на особенностях ее размножения в этом водоеме.

Треска в период нереста особенно требовательна к солености воды и кислородному режиму. Поэтому места ее нереста в Балтийском море располагаются в придонных слоях глубоководных впадин, где отмечается повышенная соленость, необходимая для развития пелагических икринок, и более постоянная температура воды. В результате недостатка кислорода в глубинных слоях нерестовые площади ограничены. Нерестовая акватория, пригодная для развития икринок трески составляет около 27 % всей площади открытого моря.

Треска размножается на большой акватории моря от Кильской бухты на западе до северной части Готландской впадины на северо-востоке во впадинах, где соленость воды превышает 10 ‰ и нет дефицита кислорода [41, 43, 285, 288, 342, 344]. Глубина нереста меняется в пределах моря: в Кильской бухте треска размножается на глубине 20 м, в Арконской впадине — на глубине 40 м, по мере продвижения на восток и северо-восток глубина нереста увеличивается (более 120—140 м) [48, 351, 344].

В пределах моря нерестилища трески изолированы друг от друга и представляют собой отдельные бассейны. По своим размерам и положению, подводному рельефу и гидрологическим условиям они значительно отличаются между собой. Гидрологический режим на них неустойчив и зависит от интенсивности притока в Балтику каттегатских вод. Поступление этих вод происходит почти ежегодно, но объем их различен. В периоды мощных притоков обновление вод происходит в широкой зоне, т. е. по глубинному и придонному слоям, а в периоды слабого поступления — в узкой зоне, т. е. только по глубинному [24].

Условия на нерестилищах, расположенных ближе к проливам, более благоприятны для развития трески на ранних стадиях онтогенеза, так как здесь чаще происходит поступление свежих североморских вод, минимальный уровень солености придонных слоев гораздо стабильнее, реже отмечается дефицит кислорода, чем в восточных и северных районах моря. Условия для размножения трески с точки зрения объема соленых и насыщенных кислородом вод, обеспечивающие нормальное развитие икры и личинок, очень изменчивы не только по акватории моря, но и по годам и зависят в большой степени от пульсации североморских вод. В годы большого притока соленых вод нерестовые площади расширяются и соответственно улучшаются условия воспроизводства трески, в годы отсутствия или меньшего притока они сокращаются и условия для нереста и развития эмбрионов и личинок стано-

вятся неблагоприятными, особенно в восточных и северо-восточных районах моря [24, 43, 48].

Величина нерестилищ трески меняется не только по районам, но и месяцам и определяется прежде всего гидрологическими условиями. В начале нерестового сезона икры трески очень мало и она концентрируется на небольшой акватории над большими глубинами (свыше 80 м) в Борнхольмском и Штольпенском районах. В марте район икрометания простирается до Ирбенского пролива, икра распределяется над широкой зоной глубин от 90 до 170 м и численность ее возрастает под 1 м². В апреле—мае икра распространяется до Сааремо-Хийумааского района. Репродуктивный район охватывает более широкую зону глубин по сравнению с предыдущими месяцами (от 50 до 200 м). Самая широкая зона нереста отмечается в мае—июне. В июле и особенно в августе нерестовый ареал трески сокращается, за исключением Борнхольмского района из-за снижения интенсивности икрометания. Наиболее продолжительный период икрометания трески отмечается в самой глубоководной части нерестилищ, где наблюдается высокая соленость. В начале и конце нереста, когда производителей немного, они размножаются на небольшой акватории, в разгар икрометания треска осваивает более мелководные 50—60-метровые глубины (Борнхольмский район) и 70—80-метровые в центральной и северо-восточной части моря с меньшей толщиной соленых вод. Такое распределение, по-видимому, обусловливается ограниченностью нерестовой площади в Балтике.

Нерест трески в пределах моря в связи с большей его протяженностью с юга на север происходит в разные сроки и длится в некоторых районах до 4—6 мес. В Кильской бухте икра трески обнаружена уже в январе [239, 342, 404, 489], в Арконской и Борнхольмской впадинах — в феврале [48, 313, 489, 490], по мере продвижения на восток и северо-восток начало икрометания сдвигается на более поздние сроки — март—апрель.

Большая растянутость нереста является приспособлением трески к лучшему использованию нерестовых площадей и обеспечивается порционным икрометанием и неодновременным созреванием производителей.

Другим примером приспособления трески к размножению в опресненных водах Балтики является изменение диаметра икры. Диаметр икры у балтийской трески оказался большим по сравнению с другими морями (табл. 7.61). Увеличение размера икры обеспечивает икринкам лучшую плавучесть и нормальное развитие в менее соленых водах. Только благодаря способности икры изменять свою плавучесть в Балтийском море треска сумела освоить новые районы обитания и поддерживать в них максимально возможную численность.

Еще более наглядно изменение диаметра икры в пределах самой Балтики.

В западной части развитие икры происходит при большей солености (16—20‰) и размеры икры меньше, чем на востоке и северо-востоке, где икра встречается при меньшей солености 11—13‰ (см. табл. 7.61).

Наблюдающаяся неоднородность икры по размерам отражается и на ее распределении в толще воды. Вертикальное распределение икры трески в пределах высокосоленого глубинного слоя неравномерное и определяется не только микроструктурной плотностью воды этого слоя, но и разноразмерностью выметанной икры. В зависимости от диаметра икра рассредоточивается на разном расстоянии от грунта. Более крупные икринки, как правило, держатся выше от грунта, чем мелкие [24, 42, 48]. Такое распределение икры по вертикали связано с разной ее плавучестью. Крупные икринки (диаметром 1,8—2,0 мм) имеют меньшую плотность, чем мелкие (1,5—1,7 мм), и их выживаемость лучше, поскольку они развиваются выше от грунта и при большем насыщении воды кислородом.

Таблица 7.61

Изменение диаметра икры трески в разных морях [24, 48, 285, 288]

Район нереста	Соленость, ‰	Диаметр икры, мм
Норвежское море	34	1,20—1,47
Баренцово море	34	1,11—1,68
Северное море	33	1,16—1,60
Белое море	30	1,20—1,54
Балтийское море:		
юго-западная часть	13—20	1,30—1,80
юго-восточная и восточная части	11—13	1,50—2,00

Таблица 7.62

Изменение среднего размера и количества крупной икры в течение сезона размножения на основных нерестилищах в 1954—1968 гг.

Месяц	Борнхольмская впадина		Гданьская впадина		Готландская впадина	
	Размер икры, мм	Количество крупной икры, %	Размер икры, мм	Количество крупной икры, %	Размер икры, мм	Количество крупной икры, %
Март	1,80	67	1,82	52	1,80	53
Апрель	1,77	54	1,80	47	1,80	47
Май	1,71	34	1,75	42	1,76	39
Июнь	1,67	23	1,71	34	1,70	32

В течение нерестового сезона происходит перераспределение икры в толще воды, так как соотношение крупной и мелкой икры значительно меняется в связи с изменением размерного состава нерестящейся трески (табл. 7.62).

В марте—апреле, когда в планктоне преобладает крупная икра, она распределяется выше от грунта, а в июне, когда увеличивается количество мелкой икры, она опускается ближе к грунту.

Все перечисленные особенности, связанные с изменением диаметра икры и ее распределением на разных нерестилищах и в толще воды, можно объяснить приспособлением трески к условиям сильно опресненного Балтийского моря с дефицитом кислорода в придонных слоях впадин, и они направлены на поддержание ее численности на окраине ареала.

Диапазон глубин распространения икры может меняться по районам и годам в довольно широких пределах (от 5 до 70 м) и определяется толщиной соленого слоя, пригодного для нереста и развития эмбрионов. В годы аэрации (1954, 1964, 1970, 1976, 1977) толщина соленого, насыщенного кислородом слоя значительно увеличивается по районам моря

Таблица 7.63

Средняя численность икры и личинок трески над 1 м² (%) по глубинам

Район	Период, годы	Глубина, м																
		40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
Икра																		
Южный	1969—1978	6,0	3,8	10,3	17,9	25,0	13,6	22,8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1976—1978	1,4	7,2	19,0	15,4	21,7	23,5	11,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1973—1975	—	2,7	28,4	26,6	17,4	10,1	14,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Центральный	1969—1978	—	—	0,8	0,5	1,9	1,1	1,4	3,4	4,8	5,3	5,9	12,3	8,1	3,9	3,4	12,9	34,2
	1976—1978	—	—	0,3	0,3	0,5	0,8	1,4	2,4	6,9	3,3	9,3	19,9	7,0	15,5	3,4	7,9	21,1
	1973—1975	—	—	—	7,7	5,1	5,1	10,3	20,5	18,0	12,8	15,4	—	—	—	—	—	—
Северо-восточный	1969—1978	—	—	—	8,6	2,9	2,9	11,4	17,1	5,7	14,3	8,6	2,9	5,7	5,7	11,4	2,8	—
	1976—1978	—	—	—	3,5	1,8	1,8	8,9	25,0	5,3	10,7	5,4	3,6	3,6	5,4	23,2	1,8	—
	1973—1975	—	—	—	—	—	8,3	16,7	16,7	8,3	25,0	25,0	—	—	—	—	—	—
Личинки																		
Южный	1969—1978	11,8	5,9	5,9	11,8	11,8	11,8	17,6	23,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1976—1978	9,5	4,9	9,5	14,2	9,5	14,2	14,2	24,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	1973—1975	—	—	10,0	10,0	10,0	20,0	20,0	30,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Центральный	1969—1978	—	—	2,7	2,7	2,7	5,4	5,4	5,4	8,1	13,5	5,4	13,5	13,5	21,7	—	—	—
	1976—1978	—	—	2,2	2,2	2,9	2,9	5,9	7,3	8,8	10,3	10,3	14,7	8,8	23,5	—	—	—
	1973—1975	—	—	—	—	14,3	14,3	14,3	14,3	14,2	28,5	—	—	—	—	—	—	—
Северо-восточный	1969—1978	—	10,0	15,0	5,0	10,0	15,0	10,0	15,0	5,0	15,0	—	—	—	—	—	—	—
	1976—1978	—	9,5	9,5	4,8	9,5	9,5	9,5	19,1	9,5	19,1	—	—	—	—	—	—	—
	1973—1975	—	—	—	—	25,0	25,0	25,0	25,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Примечание. 1972, 1976—1978 — годы аэрации; 1973—1975 — годы слабой аэрации.

до 30—70 м, в годы стагнации (1958, 1968, 1980) она сокращается до 5—15 м [44, 46]. Наблюдается хорошо выраженная связь между толщиной нерестового слоя и выживанием икры трески ($r=0{,}90$).

В распределении икры трески на всех нерестилищах отмечается общая закономерность: ее максимальное количество встречается над большими глубинами и снижается с уменьшением глубины, что определяется различной толщиной слоя вод с высокой соленостью [43, 46, 48].

Численность икры трески меняется по зонам глубин в зависимости от сезона лова: в весенний период, как правило, отмечаются большие скопления тресковой икры, чем в летний. Треска относится к аркто-бореальному комплексу и поэтому более активный нерест приурочен к холодному периоду года.

Большие изменения в скоплении икры над различными глубинами происходят в зависимости от гидрологических условий. В годы аэрации придонных слоев (1972, 1976—1978) отмечается не только большая численность икры по всем зонам глубин, но и распространение ее шире, чем в годы ухудшения газового и солевого режимов (1973, 1975) (табл. 7.63). Особенно значительное сокращение нерестового ареала отмечается в период стагнации (севернее Лиепайского района). Икра отсутствует над большими глубинами из-за дефицита кислорода, на окраинах нерестилищ — из-за малой солености. Изменения в численности икры резче всего проявляются в центральных районах, где часто отмечаются неблагоприятные условия для нереста. Максимальная численность икры (120 под 1 м²) над большими глубинами превышает максимальную (2 под 1 м²) над меньшими глубинами в 60 раз.

Только что выклюнувшиеся предличинки трески в большинстве случаев имеют длину от 3,0 до 4,2 мм. Тело их узкое, булавовидное. Голова плотно прижата к желточному мешку, ротовой щели нет, желточный мешок овальной формы, его длина 1,8—2,0 мм, высота 1,2—1,3 мм. Тело предличинки окаймлено эмбриональной плавниковой складкой. Уже на ранних стадиях развития на туловище и хвостовой части личинки наблюдается характерная пигментация в виде поперечных полосок. Глаза предличинок полностью пигментированы.

Обычно первые предличинки на нерестилищах появляются в марте—апреле — на 20 сут позднее, чем икра, что связано с температурой воды и длительностью инкубационного периода.

Предличинки в первое время пассивно парят в придонных слоях впадин желточным мешком кверху. Большой желточный мешок не позволяет им совершать значительных перемещений. По мере рассасывания желтка подвижность личинок увеличивается. Рассасывание желточного мешка происходит в течение 6—10 сут и его длительность зависит от температуры воды. За это время длина предличинок увеличивается до 4,5—5,0 мм.

Вертикальное распределение личинок трески, в отличие от распределения икры, не ограничивается солевым фактором, и они обитают по всей толще при солености от 7 до 20‰. Личинки, распределяющиеся по вертикали, неоднородны по размерному составу. Обычно только что выклюнувшиеся предличинки держатся в придонных слоях впадин, по мере роста они поднимаются в верхние слои, богатые кормовым зоопланктоном. При переходе личинок из придонных в поверхностные горизонты они попадают из более соленых и плотных, малонасыщенных кислородом придонных слоев в верхние, менее соленые и плотные слои, с высоким содержанием кислорода. Средняя длина личинок в придонных слоях в апреле—мае составляет 4,0—4,5 мм, в верхних — 5,1—6,5 мм.

Распределение личинок по акватории моря на отдельных нерестилищах довольно неравномерное и связано с гидрометеорологическими условиями (кислородный режим, течения), интенсивностью не-

реста и обеспеченностью кормом личинок. В начале нереста (февраль—март) их численность довольно невелика по районам моря и сконцентрированы они на небольшой площади, в основном в самой глубоководной зоне. В разгар нереста (апрель—май) граница ареала личинок значительно шире, чем икры. Широкое расселение по зонам глубин связано с возросшей их численностью и активностью.

Изменение гидрологического режима оказывает влияние на распределение и численность личинок по акватории моря и по зонам глубин. Повышенная численность личинок трески и более широкий ареал их распространения наблюдается в годы с благоприятным гидрологическим режимом (табл. 7.64). Наибольшие изменения численности личинок под 1 м² по зонам глубин так же, как и икры, проявляются в центральном районе. Максимальное количество их отмечается над большими глубинами, от 150 до 180 м (23 шт под 1 м²), минимальное (1 шт. под 1 м²) — над глубинами 50—70 м. Различается распределение личинок по зонам глубин в течение весеннего и летнего периодов. В летний сезон по сравнению с весенним отмечается некоторое увеличение численности личинок над меньшими глубинами. Используя для нагула верхние, более динамичные слои воды, личинки подвергаются большому сносу течениями. Поскольку в период нереста доминируют ветры западных и юго-западных направлений, пассивные миграции личинок связаны с доминирующими в это время течениями. Показатель «количество личинок в процентах от численности икры» увеличивается в направлении от южных районов к северо-восточным, несмотря на то, что выживание эмбрионов и их количество значительно выше в южных (см. табл. 7.64). Эти данные свидетельствуют о хорошо выраженном дрейфе личинок в восточном и северо-восточном направлениях.

Многолетняя практика показала, что численность поколений балтийской трески в основном характеризуется степенью выживания ее икры, т. е. эмбриональный период является одним из важных этапов в формировании численности ее поколений: смертность икры достигает иногда 99 % [44, 46]. Наибольшее количество икры гибнет на I и II стадиях развития. К концу эмбрионального периода отход икры практически прекращается. Самая высокая смертность икры отмечается на всех нерестилищах в годы стагнации, самая низкая — в годы аэрации (табл. 7.65).

Характерное увеличение смертности икры наблюдается с юга на север, что определяется соленостью и содержанием кислорода в придонных слоях, снижающимися в северо-восточном направлении.

В годы формирования урожайных поколений трески (1954, 1965, 1967, 1972, 1976, 1977) на всех основных нерестилищах выживаемость ее икры составляла 11,0—16,5 %, для поколений низкой урожайности (1956, 1958, 1968, 1982) она колебалась в пределах 1,5—5,8 %, для поколений средней урожайности (1955, 1959, 1963, 1966, 1974) — в пределах 3,4—11,0 % [46]. Между выживаемостью икры и урожайностью соответствующих поколений трески установлена статистическая связь ($r=0{,}70$, $t=4{,}06$).

Межгодовые колебания численности икры, личинок трески довольно существенны и связаны с изменениями климата, гидрологических условий, качественного и количественного состава производителей, их распределением по районам моря, количеством корма для личинок, разной смертностью на ранних стадиях развития.

Таблица 7.64

Количество личинок трески (% от численности икры) по районам и сезонам

Район	Весна	Лето
Борнхольмский	9,0	10,0
Готландский	22,7	30,9
Сааремо-Хийумаасский	39,4	47,6

Таблица 7.65

Выживаемость икры трески (%) на нерестилищах в годы с разным гидрологическим режимом

Тип гидрологического режима	Район о. Борнхольм		Район Готландской впадины	
	Среднее	Диапазон изменений	Среднее	Диапазон изменений
Аэрация	13,0	6,6—18,9	10,6	6,7—15,6
Переходный	8,2	4,1—18,0	5,4	3,4—10,4
Стагнация	3,1	1,9—4,7	2,2	0,6—3,2

Таблица 7.66

Средняя численность икры и личинок трески под 1 м² (шт.) в годы аэрации (1964, 1970, 1972, 1976, 1977) и стагнации (1968, 1982) по районам моря

Районы	Икра		Личинки	
	Аэрация	Стагнация	Аэрация	Стагнация
Южные	46	30	4,0	2,0
Центральные	32	12	5,0	1,0
Северо-восточные	12	3	2,5	0,5
Итого	30	15	3,5	1,0

Многолетняя практика показала, что численность поколений балтийской трески в основном характеризуется степенью выживания ее икры, т. е. эмбриональный период является одним из важных этапов в формировании численности ее поколений: смертность икры достигает иногда 99 % [44, 46]. Наибольшее количество икры гибнет на I и II стадиях развития. К концу эмбрионального периода отход икры практически прекращается. Самая высокая смертность икры отмечается на всех нерестилищах в годы стагнации, самая низкая — в годы аэрации (табл. 7.65).

Характерное увеличение смертности икры наблюдается с юга на север, что определяется соленостью и содержанием кислорода в придонных слоях, снижающимися в северо-восточном направлении.

В годы формирования урожайных поколений трески (1954, 1965, 1967, 1972, 1976, 1977) на всех основных нерестилищах выживаемость ее икры составляла 11,0—16,5 %, для поколений низкой урожайности (1956, 1958, 1968, 1982) она колебалась в пределах 1,5—5,8 %, для поколений средней урожайности (1955, 1959, 1963, 1966, 1974) — в пределах 3,4—11,0 % [46]. Между выживаемостью икры и урожайностью соответствующих поколений трески установлена статистическая связь ($r=0{,}70$, $t=4{,}06$).

Межгодовые колебания численности икры, личинок трески довольно существенны и связаны с изменениями климата, гидрологических условий, качественного и количественного состава производителей, их распределением по районам моря, количеством корма для личинок, разной смертностью на ранних стадиях развития.

Численность выметываемой икры трески по годам на разных нерестилищах неодинакова. Можно выделить два важных репродуктивных района в воспроизводстве трески: Борнхольмский и Готландский. Роль того или другого нерестилища в ее воспроизводстве значительно меняется по годам в зависимости от объема нерестовых площадей и условий для выживания эмбрионов и личинок (соленость воды и содержание растворенного кислорода). Обычно основным районом нереста трески в Балтике является Борнхольмская впадина, где поступление соленых североморских вод и аэрация придонных слоев нерестилищ более регулярны, чем в восточных и, особенно, северо-восточных районах моря [43, 48]. Этим и можно объяснить здесь более высокую численность икры трески, менее резкие ее колебания и большую частоту появления максимумов, меньшую смертность эмбрионов (табл. 7.66).

В целом по морю появление максимумов численности икры и личинок трески совпадает с годами адвекции каттегатских вод, а минимальная их численность наблюдается в годы ослабления подтоков (см. табл. 7.66).

Таблица 7.67

Средняя численность икры, личинок трески под 1 м² и выживаемость эмбрионов на Готландском нерестилище с различными условиями нагула производителей и благоприятным (1969, 1972, 1974, 1976, 1977 гг.) и менее благоприятным (1968, 1971, 1973, 1975 гг.) гидрологическим режимом

Показатель	Условия нагула *					
	хорошие			плохие		
	1971—1973, 1976, 1977 гг.	1972, 1976, 1977 гг.	1971, 1973 гг.	1968, 1969, 1974, 1975 гг.	1969, 1974 гг.	1968, 1975 гг.
Средняя численность, шт.:						
икры	27,0	43,0	10,0	16,0	22,0	9,0
личинок	4,7	6,0	1,5	1,0	1,5	1,0
Выживаемость икры, %	8,7	11,9	4,0	4,7	7,6	1,7

* Условия нагула производителей трески приводятся по данным Д. В. Узарс [190].

В годы осолонения моря происходит улучшение условий воспроизводства трески, нерестовый ареал ее значительно расширяется на восток и северо-восток (Сааремо-Хийумааский район), увеличивается роль Готландского района в репродукции трески. Повышение численности икры в Готландском и Сааремо-Хийумааском районах происходит за счет снижения смертности эмбрионов и активного нереста трески, которая в связи с улучшением кислородного режима не мигрирует в западные районы моря, а остается в вышеуказанных.

В годы опреснения и стагнаций сокращаются площади нерестилищ трески, значительно уменьшается количество икры во всех районах, в Сааремо-Хийумааском она, как правило, отсутствует, происходит перераспределение производителей. Наблюдается уход значительной части трески из северо-восточных и восточных районов в южные и юго-западные.

Для изучения влияния качественного состава производителей трески (условия нагула, накормленность [190]) на динамику нереста были сгруппированы годы (1971—1973, 1976, 1977), характеризовавшиеся хорошими условиями нагула, и годы (1968, 1969, 1974, 1975) с плохими условиями нагула (табл. 7.67). В среднем численность икры, личинок и выживаемость эмбрионов трески для группы лет с хорошими условиями питания оказались более высокими, чем для группы лет с плохой накормленностью производителей. Однако при одинаковой накормленности производителей как в годы с хорошими, так и с плохими условиями нагула успешность нереста возрастала при более благоприятных гидрологических условиях (см. табл. 7.67).

Приведенные данные подтверждают, что численность поколений трески в условиях сильно опресненного Балтийского моря с неустойчивым кислородным режимом в придонных слоях нерестилищ в большой степени зависит от абиотических условий в период нереста.

Распределение трески

Восточно-балтийская популяция трески обитает в открытой части Балтийского моря восточнее о. Борнхольм, в годы высокого уровня запаса и повышенной солености моря в массе заходит в Рижский и Финский заливы.

Зимой вся популяция восточно-балтийской трески обитает в слое глубин 25—75 м, т. е. выше галоклина [100, 104, 375]. Ее распределение на севере зависит от кормовой базы, степени увеличения солености и уровня запаса. Позднее ареал определяется температурой воды: при понижении температуры в северных районах треска в массе мигрирует в более теплые южные районы. Эти миграции более выражены у половозрелой трески.

При достижении III стадии зрелости гонад (по шестибалльной шкале), обычно в феврале—марте, треска мигрирует на глубину, ближе к местам нереста. Около 80 % зрелой и созревающей рыбы концентрируется в слое между изогалиной 10 ‰ и изооксигеной 15 %. В этот период зрелая рыба резко меняет свое отношение к условиям среды: доминирует соленостно-кислородный режим, температура воды больше не имеет значения.

Распределение нерестовой трески по районам моря зависит от расположения пригодных для нереста водных масс. В глубинной зоне преобладают тенденции стагнации и освежение вод зависит от характера влива и прохождения свежих североморских вод по основным впадинам моря (Борнхольмской, Гданьской, Готландской).

Можно выделить три типа режима Балтики и соответственно распределения трески:

— стагнация, когда нет влива свежих вод вообще или они не доходят до восточной части моря;

— слабая аэрация или «переходный» тип, когда условия на западе хорошие, а на востоке зона нереста очень невелика;

— аэрация, когда богатые кислородом североморские воды распространяются в восточные и северные районы.

В годы аэрации треска, зимовавшая в Восточной Балтике, совершает только короткие миграции — от берегов на глубины на склонах впадин. Если в западной части зимовало много рыбы, то часть ее переходит на восточные нерестилища. Успешность промысла в целом по морю чаще средняя и невысокая, так как треска рассеивается на большом объеме нерестилищ. В переходные годы в Восточной Балтике нерестовая треска концентрируется в небольшом объеме вод и уловы здесь бывают наивысшие. Часть рыбы в отдельные годы уходит на запад, где уловы увеличиваются. Это связано с уровнем запаса — при малом запасе на востоке рыба остается на месте, а при большом — переходит на западные нерестилища.

В годы стагнации нерестовая треска из восточных районов уходит в западные, где вообще режим лучше. Уловы на востоке уменьшаются, а на западе увеличиваются. После нереста треска рассредоточи-

вается в прибрежной зоне и при достаточной солености вод и хорошей кормовой базе заходит далеко на север Балтики; эмигрировавшая ранее на запад рыба возвращается обратно.

В летне-осенний период треска держится в слое до 60—70 м, ее распределение и концентрация связаны с распределением и концентрацией основных кормовых объектов — морского таракана, мизид и других беспозвоночных, а также шпрота и сельди.

Молодь трески длиной до 30 см (в основном неполовозрелая) на акватории Балтийского моря распространена широко: она обитает во всех районах моря до глубин 120—140 м. В Восточной Балтике наиболее значительные ее скопления наблюдаются в биологически более продуктивных Вентспилсском и Клайпедском районах, Саарема-Хийумаасском, Гданьском, в Колобжегском районе. Основной пищей у молоди в этих районах являются мизиды.

Характер распределения молоди трески меняется по сезонам и определяется, наряду с гидрологическими условиями, сезонными изменениями биомассы и распределения кормовой базы. Хотя молодь трески питается весь год, по особенностям ее распределения и питания можно выделить осенний (сентябрь—январь) и зимне-весенний (февраль—июнь) периоды.

В сентябре—январе наиболее значительные скопления молодь образует на глубинах от 30 до 80 м. Молодь трески в это время питается в основном мизидами, доля которых в ее пище составляет около 50—70 %, а также понтопореями и червями.

В феврале—марте молодь мигрирует в более глубинную зону (до глубины 120 м и глубже) и там обитает до мая—июня.

Одним из основных факторов, определяющих эти миграции, является температурный режим в мелководных районах моря: в феврале в Восточной Балтике происходит резкое охлаждение верхних водных масс и слой гомотермии достигает 60—70 м. В холодные зимы температура в слое гомотермии составляет 1—2 °С и треска из прибрежных районов перемещается на глубины более 70 м. При этом молодь длиной до 20 см встречается на глубинах 90—120 м, где температура воды составляет 3—4 °С, а треска длиной 20—30 см избирает более холодную зону на глубинах от 50 до 90 м. В теплые и умеренные зимы температура воды в поверхностном слое (0—50 м) составляет 3—4 °С и условия для зимовки молоди благоприятные как в прибрежных районах моря, так и на глубинах. В годы стагнации молодь обитает на больших глубинах, чем в годы аэрации, а также встречается в пелагиали над впадинами.

В мае—июне 80 % годовиков уже обитает в зоне до 60 м, но 70 % двухгодовиков остается на больших глубинах. В июле—августе перемещение молоди в прибрежной зоне на глубины до 50—60 м продолжается. У трески наблюдаются суточные вертикальные миграции, которые являются в основном пищевыми. Хорошие скопления у грунта наблюдаются в светлое время суток, ночью придонные скопления рассеиваются.

7.3.3. Промысел и состояние запасов

Сезонная и годовая динамика уловов

С 1945 г. все прибалтийские страны начали интенсивно развивать промысел в Балтийском море, в том числе и трески. С начала этого времени наблюдалось несколько максимумов вылова, но каждый следующий был значительно выше предыдущего. Максимумы уловов восточно-балтийской трески отмечались в 1956—1960 (100 %), 1966—1970 (130 %), 1975—1976 (168 %) и 1980—1984 гг. (287 %).

Вылов западно-балтийской трески таких резких колебаний не имеет и с 1965 по 1984 г. изменялся в пределах 38—54 тыс. т, составляя в среднем за этот период 46 тыс. т.

За последний пятилетний период средний вылов балтийской трески составляет 388 тыс. т, из них 12 % — западно-балтийской в подрайоне 22—24. Учитывая небольшое значение популяции западно-балтийской трески в уловах, в дальнейшем приводится характеристика промысла восточно-балтийской трески в подрайонах 25—32.

Значение отдельных подрайонов в промысле трески несколько меняется по годам и периодам лет, но 70—80 % вылова добывается в подрайонах 25 и 26, 10—15 % — в подрайоне 28, отдельные 5—10 % — в подрайонах 29—32 (табл. 7.68). В последний пятилетний период увеличилось значение более северных подрайонов 28—32: с 13,5 % в 1970—1979 гг. до 26,7 % в 1980—1984 гг.

Доля отдельных стран в общем вылове также менялась по периодам лет, и до настоящего времени основной промысел в подрайонах 25—32 вели Дания, ПНР, СССР (табл. 7.69, 7.70, 7.71).

Изменение успешности промысла и состав уловов по годам, сезонам, районам и глубинам моря в основном определяется как составом и уровнем запаса, так и гидрологическим режимом и реакцией на него как отдельных рыб, так и популяции в целом.

Отечественный траловый промысел в сезонном аспекте распределяется довольно равномерно, однако наибольшие уловы приходятся на II квартал, т. е. в период нереста, когда наблюдаются повышенные ее концентрации на нерестилищах. Другие страны, например ПНР, более 70 % улова берут

Таблица 7.68

Доля отдельных подрайонов (% общего вылова) в промысле восточно-балтийской трески

Период, годы	Подрайон					
	25	26	27	28	29	30—32
1970—1979	42,3	44,2	1,2	11,1	0,7	0,5
1980—1984	39,5	33,8	2,1	16,6	3,1	4,9

Таблица 7.69

Доля отдельных стран (% общего вылова) в промысле восточно-балтийской трески

Период, годы	Страна							Средний общий улов, тыс. т
	СССР	ПНР	ГДР	ФРГ	Дания	Швеция	Финляндия	
1965—1969	26,0	38,3	6,2	1,6	13,4	14,4	0,1	145
1970—1974	20,0	39,3	3,6	5,3	20,8	10,9	0,1	142
1975—1979	25,4	35,6	2,5	6,2	20,7	9,0	0,6	189
1980—1984	28,9	29,8	0,4	4,6	21,7	12,5	2,1	340

Таблица 7.70

Изменение вылова (%) восточно-балтийской трески разными странами в подрайоне 25—32

Период, годы	Страна						
	СССР	ПНР	ГДР	ФРГ	Дания	Швеция	Финляндия
1965—1969	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
1970—1974	74,9	100,2	57,3	331,4	151,0	74,1	225,0
1975—1979	127,3	121,3	53,3	517,5	200,8	82,2	2 635,0
1980—1984	260,5	182,3	15,8	695,2	280,0	203,7	17 497,5

Таблица 7.71

Доля отдельных подрайонов в общем вылове разных стран в 1980—1984 гг., % общего вылова данной страны

Страна	Подрайон								
	22	23	24	25	26	27	28	29	30—32
СССР	—	—	—	—	40,0	—	43,9	4,9	11,2
ПНР	—	—	—	42,2	57,8	—	—	—	—
ГДР	14,6	—	71,8	—	13,5	—	0,1	—	—
ФРГ	34,2	—	3,2	53,0	8,7	—	0,9	—	—
Дания	14,8	1,8	7,9	75,5*				—	—
Швеция	—	1,1	12,0	51,2	3,6	13,1	15,6	2,0	1,4
Финляндия	—	—	—	—	—	—	—	58,0	42,0

* Суммарный процент вылова в подрайонах 25—28.

Таблица 7.72

Распределение вылова трески по кварталам, % годового

Страна	Квартал			
	I	II	III	IV
СССР	27,0 (16,4—34,8)	30,7 (23,8—36,8)	20,9 (11,6—29,1)	21,4 (12,7—34,0)
ПНР	44,0	29,5	13,6	12,9

в I полугодии (табл. 7.72). Вылов по месяцам в течение одного года и за месяц по годам колеблется в 3—4 раза и зависит от распределения запаса, численности пополнения, вступающего в промысел, метеорологических условий и интенсивности промысла.

Этими же причинами обусловлено колебание вылова на единицу промыслового усилия (табл. 7.73).

В Балтийском море треску ловят тралами, в основном донными, в некоторые периоды она попадается и в пелагических в качестве прилова при промысле сельди и шпрота. Небольшое значение в настоящее время имеет ярусный промысел — с небольших судов или мотолодок облавливаются места с каменными грунтами.

На специализированном промысле трески до 1 июля 1977 г. в кутках тралов применялась ячея 80 мм (внутренний размер), которая не обеспечивала Правил рыболовства по прилову молоди. В дальнейшем внутренний размер ячеи в кутках тресковых тралов был увеличен до 90 мм (до 1983 г.). На специализированном промысле трески, как показали расчеты, экономически целесообразно и еще большее повышение селективных свойств тралов [203]. С 1983 г. (по рекомендации МСИМ с учетом материалов БалтНИИРХ) все страны ввели минимальный внутренний размер ячеи в кутках тресковых тралов, равный 95 мм.

Технологические свойства трески в сезонном и годовом аспектах неодинаковы и зависят от биологического и физиологического состояния рыбы.

Масса тушки трески без внутренностей и головы колеблется в пределах 50—70 % общей массы целой рыбы, причем выход тушки и филе у мелкой трески (длиной до 50 см) больше, чем у крупной (длиной свыше 50 см), а отходов в виде голов и костей соответственно меньше.

Большим сезонным изменениям подвержены масса половых продуктов и печень трески, что связано с годовым циклом ее физиологического развития — гаметогенозом. С возрастанием степени зрелости гонад увеличивается их масса. Печень же достигает максимальных размеров к III стадии зрелости половых продуктов (табл. 7.74).

Треска относится к тощим рыбам и содержание жира в ее мышцах в разные сезоны года практически не меняется и составляет около 1 %. Более значительным изменениям в течение годового цикла развития рыбы подвергается химический состав печени и яичников трески. Максимальное содержание жира в печени наблюдается на II стадии зрелости половых продуктов, а в яичниках на IV стадии зрелости. У отнерестившейся трески содержание жира в печени снижается почти вдвое, а в яичниках бо-

Таблица 7.73

Улов на усилие восточно-балтийской популяции трески по кварталам

Квартал	Улов	Средний за 1977—1984 гг.	Диапазон изменений
I	Общий, %	27,0	16,4—34,8
	На 1 ч траления, т	0,39	0,19—0,88
	На судо-сутки промысла, т	3,96	2,04—6,53
	На судно, т	111,2	64,7—181,0
II	Общий, %	30,7	23,8—36,8
	На 1 ч траления, т	0,31	0,19—0,54
	На судо-сутки промысла, т	3,33	1,96—4,78
	На судно, т	125,3	60,7—204,4
III	Общий, %	20,9	11,6—29,1
	На 1 ч траления, т	0,31	0,20—0,44
	На судо-сутки промысла, т	3,79	1,62—4,24
	На судно, т	81,9	25,1—120,3
IV	Общий, %	21,4	12,7—34,0
	На 1 ч траления, т	0,36	0,26—0,50
	На судо-сутки промысла, т	4,40	2,08—4,60
	На судно, т	95,6	47,9—140,4

Таблица 7.74

Масса яичников и печени (% массы целой рыбы) трески на разных стадиях зрелости половых продуктов

Объект исследования	Стадия зрелости				
	II	III	IV	V	VI—II
Яичники	0,8	2,9	10,6	26,5	4,7
Печень	5,9	6,5	5,5	4,8	2,7

лее чем в 4 раза. Содержание белка также подвержено изменениям, максимум его в печени приходится на V стадию зрелости половых продуктов, в яичниках на IV стадию зрелости (табл. 7.75).

Таким образом, мясо и печень трески наибольшую ценность представляют на II и III стадиях зрелости половых продуктов (с июля по январь), а икра на IV—V стадии зрелости (с марта по июнь).

Таблица 7.75

Химический состав (% сырого вещества) различных тканей трески в зависимости от стадии зрелости половых продуктов

Объект исследования	Стадия зрелости				
	II	III	IV	V	VI—II
	Содержание жира				
Мышцы	1,1	1,1	1,2	1,1	0,8
Печень	67,5	65,4	65,2	35,2	54,6
Яичники	0,9	1,8	3,8	1,0	0,8
	Содержание белка				
Мышцы	16,6	—	15,9	15,6	15,1
Печень	5,5	—	7,6	12,4	10,6
Яичники	7,7	12,5	17,4	15,7	8,8

Динамика запасов

Одной из основных причин, определяющих динамику уловов трески, является уровень запаса, который в свою очередь определяется численностью поколений, составляющих этот запас. Изменение запаса трески за последние 20 лет показано в табл. 7.76.

Относительно причин, определяющих численность того или иного поколения балтийской трески, существует несколько точек зрения.

Некоторые исследователи указывали на необходимость сопоставления количества зоопланктона и личинок трески в целях обнаружения связи между их выживаемостью и обеспеченностью пищей [332, 444], так как у многих видов рыб численность поколений определяется именно этим фактором.

По мнению Кнудсена [355], возможно проникновение молоди трески через Датские проливы в Балтийское море. Иенсен [332] не считает возможным рассматривать вопрос о колебаниях численности молоди вне зависимости от пищевых отношений с другими видами рыб. Многие отечественные и зарубежные авторы [41—48, 54—56, 71, 344, 444] большое значение в формировании поколений трески придавали условиям выживания эмбрионов.

Сопоставление численности поколений трески и биомассы планктона показало, что при одной и той же биомассе могут выходить весьма разные по численности поколения, как, например, многочисленное поколение 1954 г. и малоурожайные поколения 1951 и 1958 гг. С другой стороны, при разной продуктивности планктона численность отдельных поколений может совпадать: например, численность неурожайных поколений 1955 и 1959 гг. рождения. Иначе говоря, на основании имеющихся данных нельзя было установить прямой зависимости между обеспеченностью личинок пищей и численностью будущего поколения.

Некоторое исключение представляет поколение 1957 г., формирование которого происходило в год, когда биомасса планктона была исключительно высокой, что, видимо, и определило его относительно высокую численность.

Появление всех урожайных поколений, численность которых определялась на основании количественного учета молоди и промыслового возврата, отмечалось в годы усиленного поступления североморских вод в Балтику. Так, именно после интенсивного притока вод в 1947—1948 и 1952—1953 гг. появились урожайные поколения 1947—1949 и 1953—1954 гг. рождения. В эти годы обычно увеличивается объем вод, в котором при данной солености содержится необходимое для массового выживания икры количество кислорода [187].

Также наблюдалось увеличение численности поколений трески в Балтийском море в последующие периоды усиления подтока свежих вод из Северного моря — в 1964 и 1976—1977 гг. Поэтому можно

Таблица 7.76

Изменение биомассы запаса восточно-балтийской трески в подрайонах 25—32

Год	Биомасса запаса			
	общего	нерестового	общего	нерестового
	тыс. т		%	
1966	495	278	100	100
1967	562	371	113	133
1968	552	371	111	133
1969	508	357	103	128
1970	463	230	93	119
1971	444	294	90	106
1972	505	317	102	114
1973	584	338	118	121
1974	730	420	147	151
1975	765	532	155	191
1976	739	488	149	175
1977	827	449	167	161
1978	1095	572	221	206
1979	1291	877	261	315
1980	1298	946	262	340
1981	1238	843	250	303
1982	1210	843	244	303
1983	1110	788	224	283
1984	940	729	190	262

сказать, что наблюдаемая периодичность изменений гидрологического режима Балтики и динамика запасов трески позволяют давать общие качественные оценки возможных колебаний их значений, однако этого оказалось недостаточно для решения практических рыбохозяйственных задач, так как требуются более четкие заблаговременные определения запасов и ожидаемые их изменения как на конкретный год, так и на более длительную перспективу.

Сказанное подтверждается, например, тем, что в годы аэрации придонных слоев воды на Готландском нерестилище (1970, 1972, 1976, 1977, 1978) абсолютная численность поколений в возрасте 2 года колеблется от 370 до 990 млн шт., т. е. в 2,7 раза.

В настоящее время регулярно проводятся расчеты абсолютной численности виртуальных популяций (VPA), накоплены материалы по траловому учету численности молоди, биологии. Это дает возможность при помощи ЭВМ начать количественный анализ связей численности поколений и факторов среды и параметров запаса.

В анализе были использованы следующие параметры среды и запаса:

— соленость и содержание кислорода в феврале и в мае в Готландской впадине в зоне глубин 100—130 м (ст. 15А);

— соленость и содержание кислорода в феврале и мае в Готландской впадине в слое 100—230 м (ст. 15А);

— соленость и содержание кислорода в феврале и мае в Готландской впадине в слое 100—120 м;

— толщина пригодного для нереста слоя воды в Готландской котловине в феврале—мае между изогалиной 11 ‰ и изооксигеной 15 ‰. Температура воды в зоне нереста трески на Готландском нерестилище не является лимитирующим фактором ее воспроизводства. В литературе имеются сведения, что наиболее успешное оплодотворение икринок и их развитие происходят в слоях с температурой воды 4,5—5,5 °С, а в зоне нереста в Готландской котловине температура воды ниже 4,5 °С обычно не бывает.

Для оценки влияния величины родительского стада на численность поколений в комплексном анализе в качестве аргументов использовались следующие параметры:

— общее количество самок в возрасте 3—7 лет;

— количество самок, участвующих в нересте, отдельно по возрастным группам 3, 4, 5 и 6 лет и суммарно в возрастах 3—5, 3—6 и 3—7 лет.

Далее рассчитывалась корреляционная матрица для всех факторов и был проведен множественный регрессионный анализ. Из всех полученных вариантов уравнений множественной линейной регрессии для дальнейшего анализа были выбраны те, в которых получены наивысшие значения критерия Фишера и наименьшие значения стандартной ошибки регрессии. Кроме стандартных статистических параметров регрессии вычислялся также процент влияния отдельных членов уравнений на общую сумму квадратов отклонений от среднего [97, 181]. Результаты расчетов показали, что во всех 9 рассмотренных вариантах, где показателем численности являлась выживаемость икры, влияние среды в среднем составляет 40 %, параметров запаса — около 35 %, а влияние пока не выявленных факторов — 25 %.

В вариантах, в которых в качестве показателя численности взято относительное количество молоди, влияние рассмотренных параметров среды составляет 20—25 %, запаса — 60—70 %.

В 15 вариантах, где зависимой переменной являлась абсолютная численность двухгодовиков, влияние среды составляет в среднем 29 % (колебания от 5,2 до 44,7 %), параметров запаса — 51 %, пока не выявленных факторов — остальные 20 %. Это согласуется с данными В. Пономаренко [152], который установил, что урожайность поколений Баренцева моря в большой мере (около 40 % общего влияния всех факторов) зависит от возрастного состава и численности производителей.

Таким образом, можно предположить, что численность поколений восточно-балтийской трески определяется комплексом факторов, в котором гидрологический режим Восточной Балтики имеет значительное влияние (около 40 %). Приблизительно такой же процент имеют параметры запаса, около 20 % — факторы, пока не выявленные.

Таблица 7.77

Промысловая смертность F и процент изъятия промыслом от запаса восточно-балтийской трески в подрайонах 25—32

Год	VPA при M=0,3	Промысловое изъятие, %	
		от общего запаса	от промыслового (нерестового) запаса
1966	0,65	27,2	48,5
1967	1,16	27,1	41,0
1968	0,81	29,8	44,3
1969	0,94	33,4	47,5
1970	0,90	33,4	46,8
1971	0,57	26,6	40,2
1972	0,60	28,4	45,3
1973	0,67	24,5	42,3
1974	0,62	20,2	35,1
1975	0,54	25,4	36,5
1976	0,75	27,5	41,6
1977	0,81	19,9	36,7
1978	0,51	14,0	26,9
1979	0,56	17,3	25,5
1980	0,67	26,6	36,6
1981	0,76	26,5	39,0
1982	0,95	25,7	36,9
1983	0,92	29,3	41,3
1984	0,92	40,7	52,4

Промысловая и естественная смертность, промысловое изъятие

На заседании Рабочей группы МСИМ по оценке запасов донных рыб, которое состоялось в Риге в 1974 г., впервые проводился анализ смертности балтийской трески. По уловам на усилие и возрастному составу стада была определена общая смертность и отмечено ее колебание по годам и в течение года, что является результатом не только интенсивности промысла, но и распределения рыб по районам, обусловленного особенностями гидрологического режима.

На основании данных всех стран была рассчитана общая смертность Z=1,0. Естественная смертность была определена в пределах 0,2—0,4. Все страны пришли к единому мнению, что естественная смертность должна быть выше 0,2 (как было получено для трески Северного моря), так как в Балтийском море условия для жизни трески хуже. До получения более точной оценки на основании имеющихся данных естественная смертность M для восточно-балтийской трески принята равной 0,3, для западно-балтийской — 0,2.

Промысловая смертность F определялась по методу VPA для периода с 1966 г., так как для определения запасов восточно-балтийской трески предыдущих лет информация недостаточна.

Промысловая смертность меняется по периодам лет и связана с изменениями численности запаса — в периоды высокой численности запаса промысловая смертность увеличивается. Выше среднего многолетнего значения она была в 1966—1970 гг., когда основу промысла составляли урожайные поколения 1963—1964 гг., хорошим был и 1967 г. В 1971—1975 гг. интенсивность промысла трески была ниже среднего значения, что обусловлено как низким запасом, так и уловом на усилие, вследствие чего ее промысел бывает менее рентабельным, чем промысел шпрота. Некоторое увеличение F вновь наблюдалось в 1976—1977 гг. (табл. 7.77). Значительно увеличилась промысловая смертность в последние годы. Промысловое изъятие за последние 20 лет колеблется в пределах 15—33 % общего запаса и 25,0—50,0 % промыслового запаса, составляя в среднем 26,6 и 38,9 % соответственно. Эти величины зависят от состояния и распределения за-

пасов, интенсивности промысла трески, последний показатель зависит от гидрометеорологических условий, состояния запасов других видов рыб, организационных причин.

7.3.4. Методы прогнозирования запасов и уловов трески

Методика составления прогноза запасов и уловов рыб показана на примере прогноза восточно-балтийской трески в подрайонах 25—32 на 1986 г. Расчеты ведутся по методу Бивертона—Холта, принятому МСИМ, с применением анализа виртуальных популяций. Особенно важное значение в этом методе имеет оценка пополнения.

Для оценки урожайности поколения, пополняющего промысловый запас, используются материалы по учету ранних стадий и молоди, возрастному составу нерестового стада.

Найдены формулы связи между вышеуказанными показателями и абсолютной численностью двухгодовиков для расчета численности пополнения на конкретный год. Так, например, по формулам связи между индексами численности молоди в подрайоне 28 и абсолютной численностью двухгодовиков, средними значениями индексов численности, полученных для подрайонов 26 и 28, и абсолютной численностью двухгодовиков, выживаемостью икры и численностью двухгодовиков определялась абсолютная численность двухгодовиков поколений 1983 и 1984 гг. Для поколения 1983 г. по учету молоди в подрайоне 28 их численность оказалась равной 565 млн шт., по формуле для подрайонов 26 и 28 — 542 млн шт., для поколения 1984 г. по учету годовиков в подрайоне 28 — 500 млн шт. и по формулам в среднем для подрайонов 26 и 28 — 480 млн шт. Для дальнейших расчетов численность поколения 1983 г. принята равной 560 млн шт., поколения 1984 г. — 500 млн шт.

Для расчетов биомассы запасов и ОДУ на 1986 г. были приняты следующие параметры:

— M=0,3, как это было принято Рабочей группой МСИМ по оценке запасов донных рыб Балтики в Риге в 1974 г. на основании допущения (расчетов), что M может быть в пределах 0,2—0,4;

— общий улов восточно-балтийской трески в подрайонах 25—32 для 1984 г. ориентировочно принят в объеме 330 тыс. т;

— абсолютная численность поколения 1983 г. в возрасте 2 года равна 560 млн шт., поколения 1984 г. — 500 млн шт.;

— средняя масса по возрастным группам принята Рабочей группой МСИМ по оценке запасов донных рыб Балтики;

— фактическая промысловая смертность за 1984 г. рассчитана методом анализа виртуальных популяций; получилось, что F в 1984 г. была примерно на 40 % больше, чем в 1983 г., и средней за 1977—1982 гг., но близка к средней промысловой смертности за период 1967—1972 гг. Поэтому прогноз на 1986 г. рассчитан с условием сохранения интенсивности эксплуатации на уровне 1984 г.

Численность рыб в общем улове рассчитана по данным БалтНИИРХ о возрастном составе промысловых уловов нашей страны без учета материалов других государств, так как в этот момент такие данные не имелись.

В 1984 г. была сделана попытка выделить нерестовый запас на основании анализа многолетних данных о созревании трески по возрастным группам. Было принято, что соотношение самцов и самок равно 1 : 1, с трехлетнего возраста созревают все самцы, а самки в трехлетнем возрасте составляют в среднем 60 %, в четырехлетнем — 80 %, в пятилетнем — 95 %. Таким образом, допущено, что в нерестовом стаде трехгодовики составляют 80 % общей численности, четырехгодовики — 90 %, пятигодовики — 97 %. Расчет сделан без учета снижения доли самцов в старших возрастных группах.

Результаты расчетов дали общую массу запаса, равную 730 тыс. т, промысловую — 472 тыс. т, улов может составлять около 200—220 тыс. т.

7.4. Речная камбала

7.4.1. Краткая история исследований

В основу исследований по балтийской речной камбале заложены работы Дункера по изучению изменчивости морфологических признаков речной камбалы различных популяций и уточнению систематического положения речной камбалы Балтийского моря, исследования Эренбаума и Стродтманна по биологии нереста, икре, личинкам, миграциям речной камбалы в Южной Балтике [285, 286, 289, 288, 490], исследования Е. К. Суворова по росту речной камбалы в Балтийском море [184], Сандманна по биологии данного вида около финского побережья [459]. Упомянутые работы нашли дальнейшее развитие в известных исследованиях Кэндлера по плодовитости, структуре нерестовых стад, численности молоди, миграциям, распределению, влиянию промысла на запас и на биологические характеристики рыб, по регулированию промысла камбалы в Южной и Средней Балтике [339—341, 347]. В подобном направлении вели исследования также Моландер, Блэгвалд, Фишер, Хессле [257, 297, 298, 319, 407]. Характеристику речной камбалы латвийского побережья дал Маннсфельд. Известны долголетние исследования Цингалевича по распределению, миграциям, росту, смертности, промыслу, структуре уловов речной камбалы Южной Балтики и Гданьского залива [267] и работы его последователей — Мулицкого, Рейманна по биологии, промыслу и состоянию запасов [409, 441]. Оттерлинд провел научные исследования распределения и миграций при помощи мечения [432, 433]. Динамику запасов в Финском заливе, Аландском море, Ботническом заливе исследовали Съеблом и Аро [484].

Большое научное и рыбохозяйственное значение имеют работы отечественных ученых по биологии питания, биологической характеристике стад, промыслу, регулированию промысла, по физиологии, экологии нереста и ранним стадиям [20, 29, 60—64, 78, 184, 212, 213, 216, 505, 506]. Подробную характеристику миграции, популяционной структуры, изменчивости морфологических признаков, биологии нереста, промысла речной камбалы в Северо-Восточной Балтике дает Я. Ф. Микельсаар [115, 116].

Изучению миграций, популяционной структуры, закономерностей распределения, динамики и структуры запасов, регулированию промысла речной камбалы в Восточной и Северо-Восточной Балтике посвящены и настоящие исследования в Балтике [34—38, 46, 50, 204, 479, 500].

7.4.2. Биология

Систематическая принадлежность и внутривидовая дифференциация

Согласно классификации Нормана, систематическая принадлежность речной камбалы следующая [74]:

отряд Pleuronectiformes — камбалообразные;

семейство Pleuronectidae — камбаловые;

род *Platichthys*;

вид *Platichthys flesus* — речная камбала;

подвид *Platichthys flesus flesus* — европейская речная камбала.

Данная классификация принята в МСИМ.

По систематике Берга речная камбала отнесена к роду *Pleuronectes*, виду *Pleuronectes flesus* и балтийская речная камбала выделена как подвид *Pleuronectes flesus trachurus Duncker*.

Выраженная популяционная и расовая дифференциация речной камбалы в Балтийском море позволяет ей приспособиться к чрезвычайно изменчивым условиям абиотической и биотической среды и максимально освоить данный водоем. Основные популяции привязаны к районам повышенной кормности [150], обусловленной более интенсивным выносом биогенов в трофогенный слой в основном процессами апвеллинга. Вдоль южного, восточного и северо-восточного побережья выделены следующие популяции: борнхольмская, гданьская, восточно-готландская, готландская, хийумааская, западно-финская и финская, аландская (рис. 7.26) [34, 115, 216, 432, 433, 484, 500]. Размеры ареалов отдельных популяций сходны — около 100—120 морских миль, и определяются максимальной протяженностью нагульных миграций, не превышающей 50—60 морских миль [34].

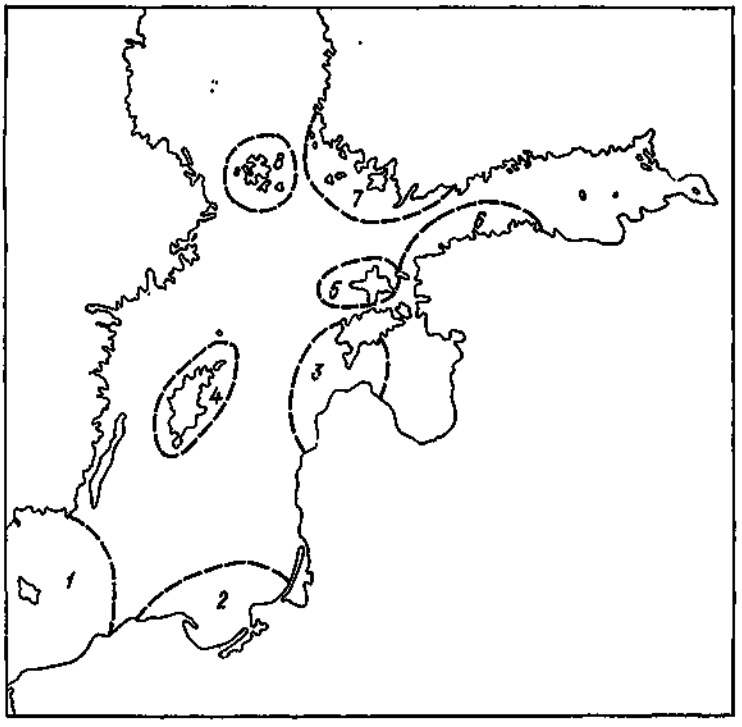


Рис. 7.26. Ареалы основных популяций речной камбалы вдоль восточного побережья Балтийского моря.

1 — борнхольмская; *2* — гданьская; *3* — восточно-готландская; *4* — готландская; *5* — хийумааская; *6* — западно-финская; *7* — финская; *8* — аландская.

Для балтийской речной камбалы характерно существование в некоторых районах (б-ка Одер-Банк, Финский залив), кроме основной, типичной для вида формы, нерестующей на максимальных глубинах при максимальной солености, также прибрежно-нерестующей биологической группировки, отличающиеся условиями и сроками нереста, условиями развития икры и личинок, показателями роста, морфологическими признаками [115, 339]. Численность прибрежно-нерестующей речной камбалы в общем запасе данного вида в Балтийском море незначительна.

Существование двух различающихся по биологии размножения группировок речной камбалы позволяет ей расширить ареал обитания за счет сильно опресненных районов моря.

Структура популяции

Размерно-возрастная структура популяций речной камбалы Балтийского моря в отдельных районах отличается и зависит от биологических параметров (темпа роста, созревания, естественной смертности) и характера эксплуатации данного стада (промысловой смертности по возрастным группам). Более северные популяции характеризуются пониженным темпом роста и созревания и большей продолжительностью жизни. Основу промыслового запаса в Западной Балтике составляют 2—5-годовики, в Южной — 3—7-годовики, в Восточной — 3—9-годовики, в Северной — 4—9-годовики. Максимальный возраст в северо-восточной популяции составляет 10—14 лет, максимальная длина — 45 см. Более высокая доля старших возрастных групп в северо-восточных популяциях обусловлена меньшей интенсивностью эксплуатации запасов в этих районах [36].

В балтийских популяциях речной камбалы средние, максимальные размеры и возраст самцов меньше, чем самок.

Различия в суровости гидрологической зимы между южными и северными районами обусловливают более ранний нерест (на 1—2 мес) и в связи с этим более продолжительный нагул в южных популяциях, что в свою очередь отражается на темпе роста, снижающемся в северном направлении (табл. 7.78). Выраженная популяционная изменчивость темпа роста — характерная особенность речной камбалы Балтийского моря.

В ходе онтогенеза рост речной камбалы наиболее интенсивен в первые 3 года жизни до наступления половозрелости. За этот период камбала достигает 70—80 % своей максимальной длины. Половозрелая камбала растет медленнее и равномерно (табл. 7.79). Такая специфика роста позволяет речной камбале быстрее миновать этап, в котором она наиболее доступна хищникам и в котором сильнее проявляется межвидовая пищевая конкуренция.

В сезонном аспекте линейный и весовой рост речной камбалы разделен, особенно у половозрелых особей. Основной прирост длины рыб достигается во время летнего нагула (с июля по август) в прибрежной мелководной зоне при температуре воды 10—15 °С. С понижением температуры (в сентябре) темп линейного роста снижается и интенсифицируются процессы гонадотрофии и жиронакопления.

Таблица 7.78

Средние длина и масса трехгодовиков по районам

Район	Длина, см	Масса, г
Финский залив	19,5	130
Вентспилсский	21,0	140
Гданьский	23,5	180
Борнхольмский	25,0	200
Море Бельтов	29,0	331

Таблица 7.79

Длина и прирост длины по возрастным группам восточно-готландской популяции в 1984 г.

Пол	Возраст, лет								
	1+	2+	3+	4+	5+	6+	7+	8+	9+
	Длина l, см								
Самка	8,0	16,3	21,7	22,7	24,2	25,7	26,2	28,2	29,4
Самец	8,0	16,1	20,4	22,3	22,9	24,1	25,3	26,3	26,6
	Годовой прирост длины, % от l_{max}								
Самка	27	28	18	3	5	5	1	7	4
Самец	30	30	16	7	2	4	4	4	1

В зимне-весенний период речная камбала в длину не растет [37].

В 80-е годы в Восточной Балтике наблюдается увеличение роста речной камбалы, что, по-видимому, на фоне процесса эвтрофикации Балтийского моря обусловлено также снижением пищевой конкуренции в популяции вследствие снижения ее численности (табл. 7.80).

Особенности питания и пищевые взаимоотношения

Речная камбала — бентофаг, потребляет в пищу наиболее массовые виды донных организмов Балтики [29, 60, 78, 212, 213, 216, 257, 316, 319, 456]. В ходе онтогенеза и в течение сезонного цикла состав пищи речной камбалы меняется.

Молодь длиной 10—40 мм потребляет в основном различные виды *Copepoda* и *Harpacticoida*. В пище рыб длиной 40—100 мм, помимо планктонных ракообразных, значение имеют представители *Amphipoda, Mysidae, Oligochaeta, Polychaeta*, молодь мелких рыб (бычки, песчанки, колюшки), личинки двухстворчатых и брюхоногих моллюсков. По мере роста речной камбалы доля ракообразных в пище снижается, а моллюсков — увеличивается. У крупной камбалы (длиной свыше 25 см) моллюски составляют 80—90 % пищи. Наиболее широкий спектр питания у речной камбалы длиной 15—24 см, включающий в Восточной Балтике следующие виды: 5 видов *Bivalvia — Macoma baltica, Cardium edule, Mya arenaria, Mytilus edulis, Astarte borealis*, 1 вид *Gastropoda — Hydrobia ballica*, 4 вида *Amphipoda — Pontoporeia affinis, Pontoporeia femorata, Bathyporeia pilosa, Corophium volutator*, 2 вида *Isopoda — Mesidotea entomon, Idothea baltica*, 2 вида *Polychaeta — Nereis diversicolor, Harmathoe sarsi*, 2 вида *Priapuloidea — Halicriptus spinulosus, Priapulus caudatus* и такие бентоносные организмы, как *Diastylis rathkei, Crangon crangon, Neomysis vulgaris* и молодь рыб *Pomatoschistus minutus, Myoxocephalus quadricornis*.

Таблица 7.80

Средняя масса (г) речной камбалы восточно-готландской популяции по возрастным группам в промысловых уловах

Возраст, лет	Год				
	1980	1981	1982	1983	1984
3	155	130	136	162	211
4	183	167	175	190	260
5	201	215	212	233	295
6	236	259	240	284	327
7	294	281	283	332	356
8	322	228	333	339	496
9	337	414	380	461	523
10	418	414	440	490	594

У речной камбалы ярко выражены сезонные изменения состава корма и интенсивности питания. Максимум наблюдается в мае—июле в прибрежной зоне (накормленность 200—300 ‰, основная пища — моллюски и ракообразные). Осенью с отходом камбалы от берегов она переходит на преимущественное питание ракообразными и червями, т. е. более калорийным кормом; интенсивность питания при этом снижается. Во время нереста камбала не питается. Молодь и мальки речной камбалы зимуют пассивно на глубинах 50—60 м. В мае после нагрева поверхностного слоя моря отнерестившаяся камбала мигрирует в прибрежную зону, где начинает интенсивный откорм.

Имеются половые различия: у половозрелых самок прибрежный нагул начинается раньше, в пище самцов больше доля ракообразных и червей.

Напряженность пищевых отношений с другими видами рыб у речной камбалы снижается по мере ее роста.

Воспроизводство

Популяционные различия в темпе роста обусловливают различие в сроках наступления половозрелости у речной камбалы в разных районах Балтийского моря: в Юго-Западной Балтике — в возрасте 2—3 года, в Северной — 3—5 лет (табл. 7.81). Самцы созревают примерно на год раньше самок. В восточно-готландской популяции первое созревание самок происходит постепенно в размерном интервале 17—24 см. Отдельные особи с незрелыми половыми продуктами встречаются и среди более крупных рыб — это, по-видимому, особи, пропускающие нерест. При достижении речной камбалой длины 34—37 см учащается дегенерация гонад и иногда наблюдается инверсия пола, т. е. ускоряется ее физиологическое старение и выход ее из воспроизводства (рис. 7.27).

Естественная смертность для речной камбалы восточно-готландской популяции по оценкам равна

Таблица 7.81

Минимальная длина впервые созревающих самок речной камбалы в различных районах моря

Район	Длина, см
Финский залив	18,5
Восточная Балтика	19,2
Южная Балтика	22,0
Западная Балтика	26,0

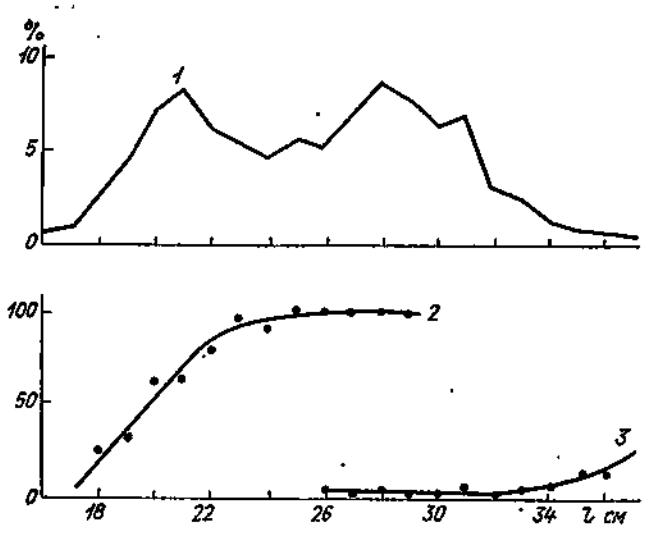


Рис. 7.27. Созревание и старение самок речной камбалы восточно-готландской популяции.

1 — размерный состав (%) самок в промысловых уловах; *2* и *3* — соответственно доля (%) зрелых самок и самок с атрофированными гонадами промысловой длины *l*.

0,3 [36]. В целом по Балтике она находится в пределах 0,2—0,3.

Годовой цикл созревания гонад речной камбалы характеризуется относительно быстрым прохождением стадии первоначального накопления желтка (III стадия, коэффициент зрелости 4—10%) — с сентября по ноябрь. Зимует речная камбала с декабря по февраль на стадии накопления желтка в овоцитах (IV стадия, коэффициент зрелости 10—15 %). Непосредственно перед нерестом в марте—апреле в короткий срок проходит процесс гидратации и гонады готовы к нересту (V стадия, коэффициент зрелости до 25 %). Период нереста балтийской речной камбалы ограничивается 2 мес, после чего через II стадию в мае—июле начинается новый цикл созревания к нересту в следующем году.

Возрастная структура нерестового стада в отдельных популяциях различается и зависит от темпа созревания и характера и интенсивности эксплуатации данного стада. В Восточной и Северо-Восточной Балтике нерестовое стадо в основном формируется из особей возраста 3—8 лет, суммарно составляющих 90 %, однако в нем встречаются особи до возраста 11 лет. Средний возраст нерестующих рыб — 5—6 лет. Самцы первыми приходят на нерестилища и держатся там дольше самок. Численное соотношение самцов и самок на нерестилищах 2 : 1.

Плодовитость балтийской речной камбалы в зависимости от массы и возраста самок в течение жизненного цикла находится в пределах 130 тыс.— 2 млн икринок.

Для балтийской речной камбалы по сравнению с речной камбалой других морей характерно размножение при относительно низкой солености, в стабильных термических, но неблагоприятных кислородных условиях. Нерест проходит в глубоководных впадинах при солености более 10‰, температуре воды 4—8 °С и содержании кислорода не менее 1 ‰ по объему. Глубина нереста увеличивается по направлению к северу (табл. 7.82). Максимальную глубину нереста лимитирует содержание кислорода ниже 1 ‰, минимальную — соленость менее 10‰.

На нерестилищах прибрежной речной камбалы кислородный режим всегда благоприятный, соленость низкая (5—6‰), сроки нереста определяются сроками прогрева прибрежных вод до 5—10 °С, что обычно наблюдается в июне [115, 339].

Нерест глубинно-нерестующей речной камбалы в целом по морю длится 3—4 мес, однако активное икрометание в каждой отдельной популяции длится около 2 мес со сдвигами сроков с юга к северу: в юго-западных районах в феврале—марте, в восточных — в марте—апреле, в северных — в апреле—мае.

Икра у глубинно-нерестующей речной камбалы пелагическая, развивается в глубинных слоях.

Диаметр икринок с юга на север увеличивается (табл. 7.83) [48, 50, 115].

Таким образом, сохраняется их плавучесть при снижении солености. Икра прибрежно-нерестующей камбалы Финского залива и б-ки Одер-Банк при солености 5—8‰ плавучесть сохранить не может, она оседает и развивается на грунте, в связи с чем ее смертность выше. Повышенная смертность икры прибрежной речной камбалы компенсируется меньшими ее размерами и, следовательно, большей плодовитостью [115, 339]. В годы осолонения и аэрации придонных слоев впадин (1972, 1976—1978) происходит не только расширение площадей нереста, но и увеличение численности икринок. В годы стагнации (1968, 1975, 1979—1983) нерестилища сокращаются и численность икры за счет ее повышенной смертности снижается. Наибольшее влияние стагнационных процессов на успешность воспроизводства речной камбалы наблюдается в северной части Готландской впадины [48, 50].

Развитие икры происходит в придонных слоях. Личинки при выклеве имеют длину около 3 мм, большой желточный мешок и вначале развиваются в придонном слое нерестилищ при солености 10—20‰. По мере роста и рассасывания желточного

Таблица 7.82

Характеристика условий нереста речной камбалы по районам

Район	Глубина (соленость > 10 ‰), м	Соленость, ‰	Температура, °С
Глубинно-нерестующая камбала			
Финский залив	90—100	10—11	4—6
Готландская впадина	85—140	10—12	4—6
Гданьская впадина	70—100	10—13	4—8
Борнхольмская впадина	50—90	10—18	5—8
Арконская впадина	30—45	10—22	2—8
Прибрежно-нерестующая камбала			
Финский залив	6—20	5—6	5—10
б-ка Одер-Банк	6—20	7—8	7—10

Таблица 7.83

Диаметр икринок речной камбалы в разных районах

Район	Диаметр, мм
Финский залив	0,83—1,2
Восточная Балтика	1,26—1,42
Гданьский залив	1,17—1,49
Борнхольмский	1,14—1,39
Арконский	1,1—1,32
б-ка Одер-Банк	0,93—1,14

мешка личинки поднимаются в поверхностные, уже прогретые слои с соленостью 6—8‰, где питаются, растут и пассивным дрейфом ветровыми течениями выносятся в прибрежную зону.

Если численность икры под 1 м² снижается с юга на север, то для личинок такой тенденции не проявляется, что можно объяснить широким разносом личинок течениями по акватории моря. Это подтверждается также тем, что ареал распространения личинок шире по сравнению с ареалом икры [50].

При возрасте личинки около 1 мес и длине 7—10 мм происходит ее метаморфоз и личинка оседает на дно. Дальнейшая жизнь малька и молоди проходит в прибрежной зоне.

Распределение, поведение и миграции

Распределение речной камбалы в Балтийском море характеризуется тремя типами миграций: отдаленными миграциями, обеспечивающими обмен между популяциями, сезонными нересто-нагульными миграциями и внутрисезонными локальными перемещениями.

Локальность и относительная изолированность отдельных популяций речной камбалы обеспечивают сохранение их приспособительных механизмов к изменчивым условиям среды в различных районах Балтийского моря. С другой стороны, между популяциями, даже отдаленными, осуществляется некоторый обмен генофондом. Во-первых, вследствие дрейфа икры и, в особенности, личинок и, во-вторых, путем отдаленных миграций взрослых особей. Проведенные БалтНИИРХ исследования при помощи мечения показывают, что взрослые особи в отдаленных миграциях (до 200 морских миль) составляют в среднем 2,7 % популяции, их численность колеблется по годам, в годы стагнации миграционная активность речной камбалы повышается, переход рыб в ареалы других популяций осуществляется в основном во время нерестовых миграций. При этом речная камбала способна длительное время находиться в пелагиали в 50 м и более над грунтом и, плывя в верхних слоях моря, покрывать значительные расстояния — 40—50 миль и более [34, 500].

Сезонные миграции сильнее выражены у половозрелой глубинно-нерестующей речной камбалы, распределение которой следующее. Нагул проходит с мая по август в прибрежной мелководной зоне или на банках на глубине 3—15 м при солености 5—7‰ и температуре воды 8—13 °С. В мае—июне на нагульных площадях численно преобладают самки (до 70 %), которые раньше самцов покидают нерестилища. К августу соотношение полов выравнивается. В начале нагула происходит компенсация энергозатрат на зимовку и нерест, с июня по август — интенсивный белковый рост рыбы, в конце нагула начинается жиронакопление и развитие гонад к следующему нересту. С охлаждением прибрежных мелководий половозрелая речная камбала постепенно перемещается в сторону глубин, продолжая интенсивно питаться. Зимовка с декабря по февраль происходит на глубинах 60—80 м, под слоем температурного скачка в районе, близком к нерестилищам. Нерестится речная камбала с марта по июль в зависимости от района моря, при этом придерживаясь максимальных глубин (до 140 м), где содержание кислорода не ниже 1‰ по объему при относительно стабильной температуре воды (4—7 °С). Во время нереста речная камбала прекращает питание. Самцы речной камбалы приходят первыми на нерестилища и дольше на них держатся. После нереста речная камбала мигрирует в ближайший к нерестилищам прибрежный район.

У биологической группировки речной камбалы, нерестующей в прибрежье, сезонные миграции короче, так как нерест и нагул проходят в прибрежной зоне, а зимовка — на глубине 60—70 м, под термоклином.

Мальки речной камбалы весь год проводят в прибрежной зоне, где они и зимуют в неактивном состоянии.

Во время нагула речная камбала постоянно перемещается, осваивая всю прибрежную полосу, однако, как показывает мечение, она не удаляется от нерестилищ дальше 50—60 миль. Например, Рижский залив, несмотря на его относительно богатую бентофауну, взрослой речной камбалой для нагула практически не используется, кроме прилегающего к Ирбенскому проливу района. В то же время он служит для нагула молоди данной популяции [34].

7.4.3. Промысел и состояние запасов

Общий годовой улов речной камбалы в Балтийском море, в отличие от других промысловых рыб, в историческом аспекте изменился незначительно: от 7—8 тыс. т в начале столетия, 10—11 тыс. т в 20-х годах до 11—14 тыс. т в 60—80-х годах. Это объясняется тем, что прибрежный лов речной камбалы уже в ранние годы был относительно интенсивным.

Вылов СССР, ПНР, ГДР и Дании составляет приблизительно по 20 % общего улова, доля Финляндии, Швеции и ФРГ в общем улове — по 2—3 %. Если общий улов по морю относительно стабилен, то вылов в отдельных районах колеблется в зависимости от состояния запасов. Так, в подрайоне 28 вылов в 80-х годах снизился в два раза по сравнению с предыдущим десятилетием, а в Северо-Восточной Балтике — возрос.

Около 60 % улова речной камбалы в Восточной и Северо-Восточной Балтике добывается смешанным траловым промыслом вместе с треской в осенний, зимний и весенний периоды. Остальной улов приходится на специализированный снюрреводный и траловый лов в летние месяцы в прибрежной зоне и на мелководных банках. Небольшую долю дает вылов также сетями, ярусами и мережами.

Речная камбала как локальная малоподвижная рыба быстро подвергается воздействию промысла, поэтому в Балтийском море он строго регулируется международными и национальными правилами рыболовства, учитывающими охрану нереста путем запрета промысла в период нереста (или вылова самок в этот период), охрану молоди установлением минимального размера ячеи, минимальной промысловой меры для рыбы и лимитированием объема вылова.

В целом по морю состояние запасов речной камбалы удовлетворительное. Интенсивность промысла выше в южных и западных районах ($F=1$) и ниже в Северо-Восточной Балтике ($F=0{,}15—0{,}30$).

Кроме воздействия промысла, запасы речной камбалы в Балтийском море, в особенности в восточных и северо-восточных районах, определяются также естественными условиями воспроизводства,

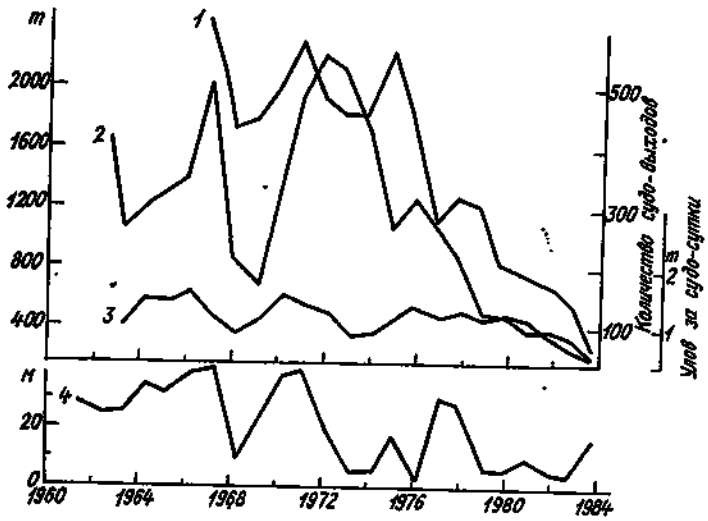


Рис. 7.28. Динамика характеристик промысла и условий воспроизводства речной камбалы в подрайоне 28.

1 — улов СССР, т; *2* — относительное количество судо-выходов снюрреводного промысла; *3* — улов за судо-сутки снюрреводом; *4* — толщина слоя между глубинами, где соленость 10 ‰ и содержание кислорода 1‰ по объему.

которые там относительно напряженные. Например, в подрайоне 28 вследствие постоянно неблагоприятных кислородных условий на нерестилищах в период с 1972 по 1983 г., несмотря на малоинтенсивный, «щадящий» режим промысла, общий запас снизился в 2 раза, а нерестовый — в 1,5 раза по сравнению с периодом, благоприятным для воспроизводства, но относительно интенсивного промысла (рис. 7.28, 7.29). Таким образом, снижение запасов в Восточной Балтике в конце 70-х—начале 80-х годов обусловлено постоянно низким пополнением вследствие плохих естественных условий воспроизводства — частыми и глубокими стагнациями в северной части Готландской впадины. Благодаря снижению интенсивности промысла в период низкого запаса структура его нерестовой части сохранилась относительно благоприятной — нерестовое стадо формируется из 5—6 возрастных групп и при существенном улучшении кислородных условий в впадинах возможно восстановление более высокой численности запаса. Такая тенденция в Восточной Балтике наблюдалась в 1984 и 1985 гг.

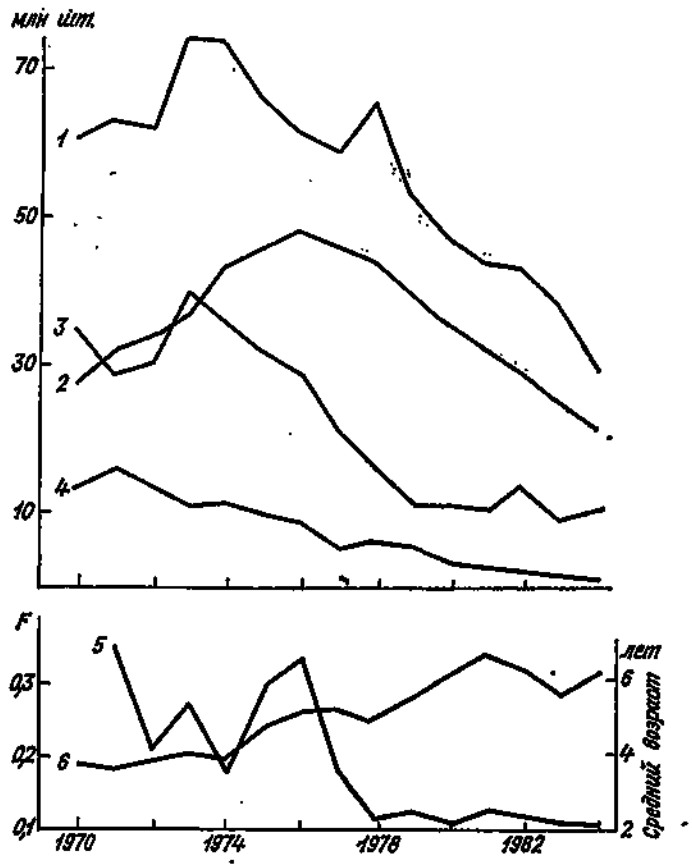


Рис. 7.29. Динамика параметров запаса и эксплуатации речной камбалы в подрайоне 28 в 1970—1984 гг.

1 — общий запас; *2* — нерестовый запас; *3* — численность трехгодовиков в запасе; *4* — вылов; *5* — промысловая смертность *F*; *6* — средний возраст рыб в улове.

7.4.4. Методы прогнозирования запасов и уловов балтийской речной камбалы

Запасы речной камбалы оцениваются методом анализа виртуальных популяций. Возрастная структура уловов определяется по раздельным размерно-возрастным ключам для самок и самцов. Пополнение для подрайона 28 оценивается по связи между глубиной залегания изогалины 10‰ и численностью поколения в возрасте 3 и 4 года ($r = -0{,}84$, $t = 4{,}9$), а для подрайона 32 — на основе индекса урожайности по условиям воспроизводства и средней численности рекрутов по VPA.

Для оценки урожайности поколений в подрайонах 22, 26, 28, 29 и 32 проводится учет сеголетков и годовиков речной камбалы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алтухов К. А. Материалы по биологии салаки литовского побережья Балтийского моря//Труды АН ЛитССР. Сер. Б. — 1959. — Вып. 2 (18). — С. 63—89.
2. Андрушайтис Г. П., Юрковска В. А., Апине С. О. Микробиологические исследования Балтийского моря// Труды XII конф. балтийских океанографов (Ленинград, 14—17 апр. 1980 г.) и VII совещания экспертов по водному балансу Балтийского моря (Ленинград, 17—19 апр. 1980 г.). — Л., 1981. — С. 465—471.
3. Апине С. О. Микрофлора грунтов прибрежной зоны Рижского залива//Среда и гидробиоценозы Рижского залива. Сер. Биология Балтийского моря. — Рига, 1982. — С. 131—137.
4. Апине С. О. Численность и продукция бактериопланктона в Рижском заливе//Гидробиология Рижского залива. Сер. Биология Балтийского моря. — Рига, 1984. — С. 28—39.
5. Апине С. О., Ботва У. Я. Санитарное состояние приурезовой зоны Рижского залива по микробиологическим показателям//Среда и гидробиоценозы Рижского залива. Сер. Биология Балтийского моря. — Рига, 1982. — С. 123—130.
6. Апс Р. А. К методике морфометрического анализа рыб// Основы биопродуктивности внутренних водоемов Прибалтики. — Вильнюс, 1975. — С. 193—196.
7. Апс Р. А. К вопросу о структуре популяции балтийского шпрота//Проблемы современной экологии. — Тарту, 1978. — С. 105—106.
8. Апс Р. А. Определение возраста балтийского шпрота по отолитам//Fischerei—Forschung. — 1982. — Jg. 20, H. 1. — S. 55—58.
9. Апс Р. А. Рост шпрота Финского залива//Fischerei—Forschung. — 1983. — Jg. 21, H. 3. — S. 55—57.
10. Апс Р. А., Муллат И. Э. О выборе признаков для морфометрического анализа//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1976. — Вып. 12. — С. 121—128.
11. Апс Р. А., Таннер Р. Х. О полиморфизме мышечных эстераз балтийского шпрота (*Sprattus sprattus*)//Биохимическая и популяционная генетика рыб. — Л., 1979. — С. 90—93.
12. Апс Р. А., Фальк У., Оэберст Р. О морфологической изменчивости зон роста отолитов балтийского шпрота// Fischerei—Forschung. — 1981. — Jg. 19, H. 2. — S. 27—30.

13. Артемчук Н. Я. Микрофлора морей СССР. — М.: Наука, 1981. — 192 с.
14. Бактериальное население открытых вод Балтийского моря/А. В. Цыбань, Г. В. Панов, Л. В. Дикш, В. А. Юрковска//Исследование экосистемы Балтийского моря. Вып. 1. — Л., 1981. — С. 41—50.
15. Баранова Т. Д. Сравнительные результаты изучения структуры отолитов балтийской трески из разных районов Балтики//Fischerei—Forschung.—1984. — Jg. 22, H. 3.— S. 59—67.
16. Баранова Т. Д. Некоторые параметры восточно-балтийской популяции трески в подрайонах 26 и 28 в связи с динамикой ее численности//Fischerei—Forchung. — 1986. — Ig. 24, H. 2. — S. 55—59.
17. Батальянц К. Я. Историческое прошлое сезонных расс сельди *Clupea harengus L.* в свете современных представлений//Зоол. журн. — 1972. — Т. 51, вып. 2. — С. 237—241.
18. Бер К. Материалы для истории рыболовства в России и принадлежащих ей морях//Зап. АН по 1-му и 3-му отдниям. — СПб, 1854. — № 2. — С. 465—544.
19. Беренбейм Д. Я., Евтюхова Б. К. Сравнительная характеристика и прогноз сроков нереста весенне-нерестующей салаки в разных районах Балтийского моря// Рыбное хозяйство. — 1986. — № 1. — С. 43—45.
20. Бетешева Е. И., Куликова Е. В. Речная камбала *(Pleuronectes flesus trachurus Duncker)* средней части Балтийского моря//Труды ВНИРО. — 1954. — Т. 26. — С. 102—117.
21. Бирюков Н. П. Балтийская треска. — Калининград: АтлантНИРО, 1970. — 166 с.
22. Бирюков Н. П. Сельди Балтийского моря. — Калининград: АтлантНИРО, 1970. — 209 с.
23. Бирюков Н. П. Некоторые вопросы биологии промысловых рыб Балтийского моря в связи с их продуктивностью//Труды АтлантНИРО. — 1971. — Вып. 35. — С. 3—57.
24. Бирюков Н. П., Грауман Г. Б. Некоторые морфофизиологические адаптации трески к солоноватым водам Балтийского моря, обусловившие ее широкое распространение и высокую численность//Труды АтлантНИРО. — 1973. — Вып. 8. — С. 3—11.
25. Бирюков Н. П., Широкова М. Я. О росте трески Балтийского моря//Труды АтлантНИРО. — 1969. — Вып. 21. — С. 58—75.
26. Битюков Э. П. Питание салаки *(Clupea harengus membras L.)* в восточной части Финского залива//Вопр. ихтиологии. — 1961. — Т. 1, вып. 4 (21). — С. 725—736.
27. Битюков Э. П., Грезе В. Н., Петровская М. В. Зоопланктон Финского залива//Изв. ГосНИОРХ.— 1971.— Т. 76. — С. 46—64.
28. Боднек В. М. Зоопланктон средней и южной части Балтийского моря и Рижского залива//Труды ВНИРО. — 1954. — Т. 26. — С. 188—209.
29. Бокова Е. Н. Питание молоди промысловых рыб Балтийского моря//Труды ВНИРО. — 1954. — Т. 26. — С. 163—187.
30. Борисов П. Г. Научно-промысловые исследования на морских и пресных водоемах. — М., 1964. — 259 с.
31. Велдре Л. А., Велдре И. Р. О некоторых биохимических показателях крови балтийской кильки *(Sprattus sprattus)*//Биохимическая и популяционная генетика рыб. — Л., 1979. — С. 83—89.
32. Велдре И. Р., Поливайко А. Г. О запасах кильки и их использовании в Северной и Восточной Балтике// Fischerei—Forschung. — 1975. — Jg. 15, H. 1. — S. 21—29.
33. Винберг Г. Г. Современное состояние и задачи изучения первичной продукции водоемов//Первичная продукция морей и внутренних вод. — Минск, 1961. — С. 11—24.
34. Витиньш М. Я. Некоторые закономерности распределения и миграций речной камбалы *(Platichthys flesus L.)* в Восточной и Северо-Восточной Балтике//Fischerei— Forschung. — 1976. — Jg. 14, H. 1. — S. 39—48.
35. Витиньш М. Я. Экологическая характеристика восточно-готландской популяции речной камбалы *(Platichthys flesus L.)*//Экосистемы Балтики. Ч. 1. Сб. докл. Междунар. симпоз. стран-членов СЭВ, Гдыня, 20—26 янв. 1975. — Гдыня, 1980. — С. 213—236.
36. Витиньш М. Я. Динамика запасов речной камбалы в Восточной и Северо-Восточной Балтике за период 1970— 1982 гг. и влияние на нее естественных факторов и промысла//Fischerei—Forschung. — 1984. — Jg. 22, H. 3. — S. 88—94.
37. Витиньш М. Я. Мечение отолитов для исследования изменчивости роста восточно-балтийской речной камбалы//Fischerei—Forschung. — 1986. — Jg. 24, H. 2. — S. 69— 73.
38. Витиньш М. Я., Баранова Т. Д. Некоторые данные о лимфоцистозе балтийской речной камбалы *(Platichthys flesus L.)*//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1979. — Вып. 14. — С. 124—132.
39. Влияние деятельности человека на биологический режим Балтийского моря/А. Ярвекюльг, Т. Трей, В. Порогасаар, К. Пийрсоо//Проблемы современных экологических исследований природных экосистем Эстонии. Материалы респ. конф., Тарту, 1978. — Тарту, 1978. — С. 114—115.
40. Влияние загрязнения и опреснения вод Рижского залива на организмы зоопланктона/Р. Ю. Лагановская, И. Я. Берзиня, М. Р. Кице, Д. Э. Лазда//Материалы V Всесоюз. симпоз. «Вопросы очищения сточных вод и самоочищения водоемов». — М., 1975. — С. 78—81.
41. Грауман Г. Б. Характеристика нереста и условий размножения трески в южной части Балтийского моря// Вопр. ихтиологии. — 1966. — Т. 6, вып. 4. — С. 629—635.
42. Грауман Г. Б. Значение размера икры балтийской трески для выживания эмбрионов//Труды АтлантНИРО. — 1969. — Вып. 21. — С. 86—96.
43. Грауман Г. Б. О значении отдельных нерестилищ в воспроизводстве балтийской трески//Труды АтлантНИРО. — 1971. — Вып. 35. — С. 69—75.
44. Грауман Г. Б. Причины, обусловливающие колебания численности трески и шпрота в Балтийском море//Труды ВНИРО. — 1972. — Т. 23. — С. 249—268.
45. Грауман Г. Б. О распределении и дрейфе икры и личинок балтийского шпрота на Борнхольмско-Штольпенском нерестилище//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1979. — Вып. 14. — С. 71— 82.
46. Грауман Г. Б. Методика прогнозирования величины пополнения балтийской трески с трехлетней заблаговременностью//Оценка запасов промысловых рыб и прогнозирование уловов. — М., 1980. — С. 91—97.
47. Грауман Г. Б. Многолетнее изменение численности икры и личинок шпрота в Балтийском море//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1980. — Вып. 15. — С. 138—154.
48. Грауман Г. Б. Экологические особенности воспроизводства основных пелагофильных рыб в Балтийском море//Fischerei—Forschung. — 1980. — Jg. 18, H. 2. — S. 77— 81.
49. Грауман Г. Б. Пассивные миграции балтийского шпрота на ранних стадиях онтогенеза//Fischerei—Forschung.— 1981. — Jg. 19, H. 2. — S. 75—78.
50. Грауман Г. Б. Пространственное распределение икры и личинок речной камбалы в Балтийском море//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1981. — Вып. 16. — С. 28—38.
51. Грауман Г. Б. Закономерности формирования численности поколений балтийского шпрота на ранних стадиях онтогенеза//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1983. — Вып. 18. — С. 38—48.
52. Грауман Г. Б. Сезонные колебания численности икры и личинок балтийского шпрота//Fischerei—Forschung. — 1983. — Jg. 21, H. 3. — S. 50—54.
53. Гримм О. П. К познанию фауны Балтийского моря и история его возникновения//Труды Санкт-Петербургского об-ва испытателей природы. — 1877. — № 8. — С. 107— 138.
54. Дементьева Т. Ф. Изучение состояния запасов рыб Балтийского моря под влиянием океанологических условий//Океанология. — 1963. — Т. 3, вып. 5. — С. 876—886.
55. Дементьева Т. Ф. Биологическое обоснование промысловых прогнозов. — М.: Пищевая промышленность, 1976. — 236 с.
56. Дементьева Т. Ф. Изменение рыбопродуктивности водоемов в результате антропогенной эвтрофикации//Оценка запасов промысловых рыб и прогнозирования уловов. — М., 1980. — С. 97—103.
57. Дерюгин К. М. Гидрология и бентос восточной части Финского залива//Исследования р. Невы и ее бассейна.— 1925. — Т. 2, № 103. — С. 1—38
58. Дзюбан-Полякова И. Н. Бактериальное окисление нефтепродуктов в Невской губе как фактор самоочищения водоема. — Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Киев, 1963. — 24 с.
59. Евтюхова Б. К., Берзиньш В. Прогнозирование сроков и интенсивности нерестовой миграции весенне-нерестующей салаки Рижского залива по температурному фактору среды//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1983. — Вып. 18. — С. 62—69.

60. Желтенкова М. В. Речная камбала *(Pleuronectes flesus tranchurns Duncker)* как основной потребитель моллюсков Балтийского моря//Труды ВНИРО. — 1954. — Т. 26. — С. 137—162.
61. Жмудзиньский Л. Эволюция Балтики//Экосистемы Балтики. Ч. 1. Сб. докл. Междунар. симпоз. стран — членов СЭВ, Гдыня, 20—26 янв. 1975 г. — Гдыня, 1980. — С. 9—18.
62. Загрязнение и циркуляция токсических загрязняющих веществ в экосистеме Балтийского моря/А. В. Цыбань, Ю. Л. Володкович, М. В. Вентцель, М. Ю. Пфейфере//Исследование экосистемы Балтийского моря. Вып. 2. — Л., 1985. — С. 244—257.
63. Земская К. А. Краткая характеристика промыслового стада речной камбалы в средней части Балтики//Информ. сб. ВНИРО. — 1958. — № 2. — С. 53—58.
64. Земская К. А. Рост рыб в популяциях с незначительной амплитудой колебания численности//Вопр. ихтиологии. — 1961. — Т. 1, вып. 4 (21). — С. 690—694.
65. Зенгер М. Предварительный отчет об изучении фауны Балтийского моря//Вестн. МГУ. — 1870. — № 2. — С. 183—197.
66. Зенкевич Л. А. Фауна и биологическая продуктивность моря. Т. 2. — М.: Сов. наука, 1947. — 588 с.
67. Зенкевич Л. А. Биология морей СССР. — М.: Изд-во АН СССР, 1963. — 739 с.
68. Зуте С. О. Первичная продукция и микробиологическая характеристика прибрежной зоны Рижского залива. — Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Рига, 1974. — 18 с.
69. Изменчивость компонентов экосистемы и динамика вод. Международный проект «Балтика»: Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 2. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 207 с.
70. Изучение фиксации азота в Балтийском море/И. Рииие, Г. Мельвасало, Л. Ниеми, Л. Ниемисте//Труды XII конф. балтийских океанографов (Ленинград, 14—17 апр. 1980 г.) и XII совещания экспертов по водному балансу Балтийского моря (Ленинград, 17—19 апр. 1980 г.). — Л., 1981. — С. 389—396.
71. Ижевский К. Г. Системная основа прогнозирования океанологических условий и воспроизводства рыб. — М.: Изд. ВНИРО, 1964. — 165 с.
72. Ипатов В. В., Узарс Д. З. Значение обеспеченности пищей в формировании сезонных изменений метаболизма у балтийской трески//Fischerei—Forschung. — 1981. — Jg. 19, H. 2. — S. 65—68.
73. Казанова И. И. Биология и промысел кильки в северной части Балтийского моря//Труды ВНИРО. — 1960. — Т. 42. — С. 84—98.
74. Калвека Б. Я. Особенности развития фитопланктона в Рижском заливе в 1978—1980 гг.//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1983. — Вып. 18. — С. 3—9.
75. Келль Ф. Фитопланктон//Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 2. — М., 1984. — С. 5—54.
76. Киселев И. А. О фитопланктоне солоноватоводной области Финского залива//Сб. памяти С. А. Зернова. — М.; Л., 1948. — С. 192—204.
77. Кондратович Э. Я. Результаты мечения трески *(Gadus morhua callarias L.)* в Восточной и Центральной Балтике в 1972—1977 гг.//Fischerei—Forschung. — 1980. — Jg. 18, H. 2. — S. 59—66.
78. Кострячкина Е. М. Питание и пищевые отношения рыб Рижского залива//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1968. — Вып. 4. — С. 109—135.
79. Кострячкина Е. М. Питание и пищевые отношения бентогоядных рыб Рижского залива//Труды ВНИРО. — 1969. — Т. 15. — С. 326—336.
80. Кострячкина Е. М. Многолетняя динамика зоопланктона в Балтийском море в связи с изменением водного режима//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1977. — Вып. 13. — С. 70—77.
81. Кострячкина Е. М. К вопросу трофической структуры зоопланктона в Балтийском море//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1979. — Вып. 14. — С. 20—31.
82. Кострячкина Е. М. Многолетние изменения зоопланктона в Балтийском море и влияние эвтрофикации на его структуру, продуктивность, распределение//Fischerei—Forschung. — 1982. — Jg. 20, H. 1. — S. 59—64.
83. Кострячкина Е. М., Калея М. А. Распределение, сезонная и многолетняя динамика зообентоса в Балтийском море//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1980. — Вып. 15. — С. 118—129.
84. Кострячкина Е. М., Сидревич Л. Л. К вопросу о влиянии течений на распределение зоопланктона в Балтийском море//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1982. — Вып. 17. — С. 11—14.
85. Кострячкина Е. М., Стародуб М. Л. Питание и трофические связи сельди и шпрота в восточной Балтике//Экосистемы Балтики. Ч. 1. Сб. докл. Междунар. симпоз. стран — членов СЭВ, Гдыня, 20—26 янв. 1975 г. — Гдыня, 1980. — С. 332—349.
86. Кострячкина Е. М., Лиие Р. Я., Сидревич Л. Л. Экологические комплексы зоопланктона Балтийского моря//Экосистемы Балтики. Ч. 1. Сб. докл. Междунар. симпоз. стран-членов СЭВ, Гдыня, 20—26 янв. 1975 г. — Гдыня, 1980. — С. 157—177.
87. Кострячкина Е. М., Лиие Р. Я., Сидревич Л. Л. Многолетняя динамика зоопланктона//Основные тенденции эволюции экосистемы. Вып. 4. — Л., 1989. — С. 96—102.
88. Кострячкина Е. М., Сидревич Л. Л., Калея М. А. Многолетняя динамика фауны Балтийского моря//Fischerei—Forschung. — 1980. — Jg. 18. H. 2. — S. 85—88.
89. Кострячкина Е. М., Юрковский А. К., Калвека Б. Я. О связях сезонных циклов фито- и зоопланктона в Балтийском море//Fischerei—Forschung. — 1984. Jg. 22, H. 1. — S. 94—99.
90. Котта И. А. О размножении и динамике численности и биомассе *Neomysis Vulgaris Thompson* в Пярнусской бухте//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1976. — Вып. 12. — С. 44—50.
91. Котта И. А. Влияние температуры воды на распределение, размножение и сезонную динамику численности *Neomysis Vulgaris* и *Mysis mihba* в северо-восточной части Рижского залива//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1979. — Вып. 14. — С. 54—62.
92. Котта И. А. Количественное распределение и миграции мизид в Рижском заливе//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1980. — Вып. 15. — С. 98—107.
93. Котта И. А., Симм М. А. О сезонной динамике численности планктических и нектобентических ракообразных в северо-восточной части Рижского залива и в Пярнуской бухте//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1979. — Вып. 14. — С. 54—62.
94. Крабби А. И. Планктон Балтийского моря экспедиции 1908 г.//Труды Балтийской экспедиции. Вып. 2. — СПб, 1913. — С. 3—30.
95 Крылова О. И. Сезонная изменчивость фитоценоза Куршского залива//Исследования биологических ресурсов Атлантического океана. — Калининград, 1980. — С. 25—42.
96. Крюгер Г. О некоторых причинах колебания численности кильки в Балтийском море//Труды ВНИРО. — 1972. — Т. 90. — С. 131—140.
97. Лаблайка И. А., Узарс Д. В. Экология и учет численности трески в Восточной Балтике//Fischerei—Forschung. — 1983. — Jg. 21, H. 3. — S. 24—31.
98. Лагановская Р. Ю. Видовой состав зоопланктона Рижского залива//Биология Балтийского моря. Т. 1. — Рига, 1974. — С. 199—217.
99. Лассиг Ю., Леппенен Ю. М., Тамсландер Г. Первичная продукция фитопланктона и определяющие ее факторы в районе Твермине в 1972—1979 гг. в сравнении с другими районами Финского залива//Труды XII конф. балтийских океанографов (Ленинград, 14—17 апр. 1980 г.) и VII совещания экспертов по водному балансу Балтийского моря (Ленинград, 17—19 апр. 1980 г.). — Л., 1981. — С. 412—422.
100. Лиие Р. Я. Некоторые наблюдения по циклу развития *Temora longicornis* и *Centropages hamatus* в Балтийском море//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1980. — Вып. 15. — С. 71—75.
101. Лисивенко Л. Н. Характеристика нереста и условий размножения весенне-нерестующей салаки в Рижском заливе//Труды Латв. отд-ния ВНИРО. — 1957. — Т. 21. — С. 19—28.
102. Лисивенко Л. Н. Планктон и питание личинок салаки в Рижском заливе//Труды НИИРХ СНХ ЛатвССР. — 1961. — Т. 3. — С. 105—139.

103. Лишев М. Н. Состояние запасов салаки в Рижском заливе и перспективы их использования на 1965—1967 годов//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1968. — Вып. 3. — С. 14—48.
104. Лишев М. Н., Лаблайка И. А. Закономерности распределения запаса восточнобалтийской трески в ареале и формирование соответствующей промысловой обстановки//Основные тенденции эволюции экосистемы. Вып. 4. — Л., 1989. — С. 222—228.
105. Лишев М. Н., Узарс Д. В. О корреляциях численности трески, салаки и кильки в Восточной Балтике и их значение для прогноза уловов//Тез. докл. совещания по методике оценки сырьевой базы и прогнозирования уловов. — Керчь, 1967. — С. 35—37.
106. Лишев М. Н., Узарс Д. В. Методика определения суточного рациона Балтийской трески//Fischerei—Forschung. — 1981. — Jg. 19, H. 2. — S. 69—73.
107. Лишев М. Н., Кикуте С. Д., Фреймане С. О. Исследование темпа роста салаки//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1967. — Вып. 3. — С. 15—48.
108. Лишев М. Н., Лаблайка И. А., Хозиоский С. А. Закономерности распределения восточнобалтийской трески в зависимости от режима моря и уровня запаса//Тез. докл. Всесоюз. конф. по теории формирования численности и рационального использования стад промысловых рыб. — М., 1982. — С. 198—199.
109. Лукшенас Ю. К. Распределение зоогеографических комплексов донных беспозвоночных в южной части Балтийского моря//Океанология. — 1967. — Т. 7, вып. 4. — С. 665—671.
110. Лукшенас Ю. К. Биоценозы и трофические группировки донных беспозвоночных южной части Балтийского моря//Океанология. — 1969. — Т. 9, вып. 6. — С. 1078—1086.
111. Мартинсон М. А., Оявеер Э. А., Таннер Р. Х. О встречаемости мышечных эстераз у балтийской сельди *Clupea harengus membras L.*//Биохимия и популяции генетики рыб. — Л., 1979. — С. 70—73.
112. Мардинкевич С. Я., Апине С. О. Микробиологическое разложение нефтепродуктов в Рижском заливе// IV Всесоюз. симпоз. по современным проблемам самоочищения и регулирования качества воды. — Таллинн, 1979. — С. 89—93.
113. Матиевска К. Некоторые черты биологии основных видов макропланктона Южной Балтики. — Автореф. дис.... канд. биол. наук. — М., 1984. — 24 с.
114. Методы прогнозирования урожайности поколений балтийской сельди в Рижском заливе/Б. К. Евтюхова, Е. Ф. Трауберга, Р. Я. Лине, В. Берзиньш//Рыбное хозяйство. — 1985. № 8. — С. 25—27.
115. Микельсаар Н. Ф. О биологии размножения речной камбалы в восточной части Балтийского моря//Изв. АН ЭстССР. Сер. Биол. — 1957. — Т. 6, вып. 3. — С. 15—50.
116. Микельсаар Н. Ф. О применении метода уравнительных шкал при изучении внутривидовых группировок речной камбалы//Гидробиологические исследования. — 1958. — Вып. 1. — С. 20—31.
117. Мина М. В., Токарева Г. И. О структуре отолитов трески *(Gadus Morhua callarias L.)* юго-восточной части Балтийского моря//Вопр. ихтиологии. — 1965. — Т. 5, вып. 2(43). — С. 326—327.
118. Многолетняя динамика темпа роста сельди в Балтийском море в связи с изменением океанографических условий и обеспеченности пищей/Е. М. Костричкина, Э. А. Оявеер, Л. А. Раннак и др.//Fischerei—Forschung.— 1982. — Jg. 20, H. 1. — S. 37—42.
119. Назвич Л. Г. К вопросу о питании молоди балтийской трески//Труды ВНИРО. — 1954. — Т. 26. — С. 49—67.
120. Наумов В. М., Радаков Д. В. Распределение трески в Балтийском море//Труды ВНИРО.— 1954.— Т. 26.— С. 68—90.
121. Некоторые моменты энергетического обмена балтийской трески/Н. Я. Липская, Д. В. Узарс, В. И. Чекунова, М. И. Шатуновский//Труды ВНИРО. — 1972. — Т. 85. — С. 81—85.
122. Некоторые особенности динамики структуры и качества запасов сельди в Северной, Восточной Балтике и Финском заливе в связи с факторами среды/Б. К. Евтюхова, Э. А. Оявеер, А. К. Наглис и др.//Fischerei—Forschung. — 1986. — Jg. 24, H. 2. — S. 12—15.
123. Нечаева Н. Б. Микробиологические исследования Финского залива//Исследования морей СССР. — 1933. — Т. 18. — С. 145—163.
124. Ниеми А. Исследования количества зоопланктона у южных берегов Финляндии в 1966—1975 гг.//Труды XII конф. балтийских океанографов (Ленинград, 14—17 апр. 1980 г.) и XII совещания экспертов по водному балансу Балтийского моря (Ленинград, 17—19 апр. 1980 г.). — Л., 1981. — С. 423—427.
125. Николаев И. И. Основные экологогеографические комплексы фитопланктона Балтийского моря и их распределение//Ботанический журн. — 1950. — Т. 35, № 6. — С. 602—611.
126. Николаев И. И. Биопланктон Рижского залива//Труды Латв. отд-ния ВНИРО. — 1953. — Т. 1. — С. 115—172.
127. Николаев И. И. Условия питания и рост салаки// Труды БалтНИРО. — 1956. — Вып. 2. — С. 34—44.
128. Николаев И. И. Биологические сезоны Балтийского моря//Труды Латв. отд-ния ВНИРО. — 1957. — Т. 2 — С. 115—140.
129. Николаев И. И. О колебаниях биологической продуктивности Балтийского моря//Труды Латв. отд-ния ВНИРО. — 1957. — Т. 2. — С. 83—113.
130. Николаев И. И. Планктон и рыбная продуктивность Балтийского моря. — Автореф. дис.... д-ра биол. наук. — Рига, 1960. — 56 с.
131. Николаев И. И. Суточные вертикальные миграции некоторых ракообразных Балтийского моря//Труды ВНИРО. — 1960. — Т. 42. — С. 61—74.
132. Николаев И. И. Влияние планктона на распределение салаки и балтийской кильки//Труды НИИРХ СНХ ЛатвССР. — 1961. — Т. 3. — С. 201—223.
133. Николаев И. И. Планктон как фактор распределения и продуктивности планктоноядных рыб Балтийского моря//Труды совещания ихтиологической комиссии АН СССР. — 1961. — Вып. 13. — С. 364—375.
134. Николаев И. И. Вертикальные зоны планктона Балтийского моря//Рыбное хозяйство внутр. водоемов ЛатвССР. — 1963. — Т. 7. — С. 95—101.
135. Никитина С. М. Некоторые вопросы биологии балтийских мизид//Ученые зап. Калининградского ун-та. — 1971. — Вып. 6. — С. 3—23.
136. Никитина С. М., Спасский Н. И. Некоторые вопросы биологии морского таракана *(Mesidothea entonion)* и мизид *(Mysis mixta, M. oculata var relicta Neomysis Vulgaris)* в южной части Балтийского моря//Труды АтлантНИРО. — 1963. — Вып. 10. — С. 64—78.
137. Околотович Г. Макрозообентос Южной Балтики// Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 3. — М., 1984. — С. 91—130.
138. Олехнович А. И. Санитарное состояние прибрежной части Финского залива в курортном районе Ленинграда и мероприятия по его оздоровлению//Гигиена и санитария. — 1959. — Вып. 1. — С. 77—79.
139. Остов И. М. Значение гидрометеорологических факторов в распределении некоторых рыб Финского залива// Изв. НИОРХ. — 1969. — Т. 65. — С. 333—342.
140. Оттерлинд Г. Рыбные ресурсы и миграции рыб Балтийского моря//Тез. докл. 2-го советско-шведского симп. по загрязнению Балтийского моря. — Рига, 1973. — С. 79—102.
141. Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 2. — М.: Координационный центр стран-членов СЭВ, 1984. — 374 С.
142. Оявеер Э. А. О различении сезонных рас салаки северной части Балтийского моря по отолитам//Изв. АН ЭстССР. Сер. Биол. — 1962. — Т. 3, вып. 2. — С. 193—208.
143. Оявеер Э. А. Плодовитость популяций осенней салаки *Clupea harengus membras L.* северо-восточной части Балтийского моря//Вопр. ихтиологии. — 1974. — Т. 14, вып. 4 (27). — С. 645—654.
144. Оявеер Э. А. О росте популяции салаки восточного побережья Балтийского моря//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1976. — Вып. 12. — С. 89—113.
145. Оявеер Э. А. Об экологических основах дифференциации внутривидовых группировок пелагических рыб Балтийского моря//Проблемы современной экологии. — Тарту, 1978. — С. 104—105.
146. Оявеер Э. А. О морфометрических различиях весенней и осенней салаки *(Clupea harengus membras L.)* Рижского залива//Вопр. ихтиологии. — 1980. — Т. 20, вып. 3 (122). — С. 423—430.
147. Оявеер Э. А. Влияние температуры и солености на эмбриональное развитие салаки//Биология моря. — 1981. — № 5. — С. 10—24.

148. Оявеер Э. А. Плодовитость весенней салаки *(Clupea harengus membras L.)* Северо-Восточной и Северной Балтики//Вопр. ихтиологии. — 1983. — Т. 23, вып. 3 (170).— С. 439—448.
149. Оявеер Э. А., Велдре И. Р. Об изменениях рыбных запасов Финского залива в последние десятилетия//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1976. — Вып. 12. — С. 114—120.
150. Оявеер Э. А., Калейс М. В. О некоторых океанологических предпосылках, определяющих количество распределения пелагических рыб в Балтийском море//Океанология. — 1974. — Т. 14, вып. 3. — С. 544—554.
151. Оявеер Э. А., Евтюхова Б. К., Наглис А. К. Состояние запасов и степень эксплуатации сельди восточного побережья Балтийского моря//Fischerei—Forschung. — 1975. — Jg. 13, H. 1. — S. 11—19.
152. Оявеер Э. А., Калейс М. В., Велдре И. Р. Зависимость распределения кильки и салаки от условий зимовки в восточной и северной частях Балтийского моря//Fischerei—Forschung.— 1976.— Jg. 14, H. 1.— S. 23—25.
153. Павлов М. А. К вопросу о колебаниях уловов трески Балтийского моря//Труды БалтНИРО.— 1958.— Вып. 4.— С. 294—296.
154. Петрова Е. Г. О плодовитости и созревании балтийского шпрота//Труды ВНИРО. — 1960. — Т. 42. — С. 99—108.
155. Платпира В. П. Микрофлора и трансформация нефтяных углеводородов в морской среде//Сер. Биология Балтийского моря. — Рига, 1985. — 162 с.
156. Плудон Э. М. Об одном из методов оценки урожайности поколений промысловых рыб//Fischerei—Forschung. — 1981. — Jg. 19, H, 2. — S. 79—80.
157. Пожогина Т. М. Салака *Clupea harengus membras L.*//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1972. — Вып. 9. — С. 5—24.
158. Поливайко А. Г. О локальности стад Балтийского шпрота//Fischerei—Forschung. — 1976. — Jg. 14, H. 1. — S. 27—33.
159. Поливайко А. Г. Некоторые данные о созревании, икрометании и плодовитости шпрота//Fischerei—Forschung. — 1980. — Jg. 18, H. 2. — S. 69—72.
160. Поливайко А. Г. О созревании и нересте балтийского шпрота//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1982. — Вып. 17. — С. 29—45.
161. Разюлите Р. Общее количество бактерий в северной части залива Куршю Марес//Индикация природных процессов и среды. Материалы респ. конф. 7—8 окт. 1976 г. — Вильнюс, 1976. — С. 116—118.
162. Раннак Л. А. Размножение салаки в северной части Рижского залива//Юбил. сб. о-ва естествоиспытателей.— 1953. — С. 313—331.
163. Раннак Л. А. Нерестовые ареалы, нерест и оценка мощности поколений салаки в водах Эстонской ССР// Труды ВНИРО. — 1954. — Т. 26. — С. 24—178.
164. Раннак Л. А. Плодовитость салаки и определяющие ее факторы//Гидробиол. исслед. Ин-та зоол. и бот. АН ЭстССР. — 1958. — Т. 1. — С. 40—68.
165. Раннак Л. А. Соотношения роста и полового созревания весенне-нерестующей салаки//Труды совещания ихтиологической комиссии АН СССР. — 1961. — Вып. 13.
166. Раннак Л. А., Якобсон Т. Я. О питании молоди салаки в связи с ее развитием//Гидробиол. исслед. Ин-та зоол. и бот. АН ЭстССР. — 1962. — Т. 3. — С. 239—249.
167. Результаты изучения популяционного состава и отолитов весенне-нерестующей сельди Балтийского моря/ Э. А. Оявеер, Б. К. Евтюхова, О. Рехлин, К. Стрижевска//Fischerei—Forschung. — 1982. — Jg. 20, H. 1. — S. 27—36.
168. Рехлин О. Исследования по биологии шпрота *(Sprattus sprattus)* и по развитию промысла шпрота в Восточной и Северной Балтике//Fischerei—Forshung. — 1975.— Jg. 13, H. 1. — S. 67—77.
169. Рылов В. М. Зоопланктон Невской губы//Исследования р. Невы и ее бассейна. — 1923. — Т. 2, № 2. — С. 20—35.
170. Савчук О. П., Балодис М. Я. Фитопланктон//Экосистема и ее компоненты. Вып. 1. — Л., 1983. — С. 142—152.
171. Саннна Л. В. О биологии *Neomysis Vulgaris Thompson* в Рижском заливе//Труды Латв. отд-ния ВНИРО. — 1961. — Т. 3. — С. 293—306.
172. Световидов А. Н. Трескообразные. Фауна СССР. Т. 9, вып. 4. — М.; Л.: Изд. АН СССР, 1948. — 312 с.
173. Световидов А. Н. Рыбы. Фауна СССР. Т. 2, вып. 1.— М.; Л.: Изд. АН СССР, 1952.
174. Селецкая А. В. Нерестовые ареалы, нерест и оценка поколений весенней салаки в Южной Балтике//Труды БалтНИРО. — 1961. — Вып. 7. — С. 112—124.
175. Селецкая А. В. Морфологическая характеристика кильки Балтийского моря//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1970. — Вып. 5.— С. 76—92.
176 Селецкая А. В. Биологическая характеристика, распределение и промысел кильки района Готланда//Труды АтлантНИРО. — 1971. — Вып. 35. — С. 89—106.
177. Сидревиц Л. Л. Некоторые закономерности вертикального распределения зоопланктона в Центральной Балтике//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1979. — Вып. 14. — С. 11—19.
178. Сидревиц Л. Л. Исследование экологических характеристик основных видов зоопланктона в Центральной Балтике//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1980. — Вып. 15. — С. 65—70.
179. Симм М. А. Об экологии зоопланктона Пярнуской бухты//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1976. — Вып. 12. — С. 29—43.
180. Соколова М. Ф. Зоопланктон восточной части Финского залива//Исследование р. Невы и ее бассейна. — 1927. — Т. 5, № 2. — С. 30—46.
181. Состав, состояние и эксплуатация запаса балтийской трески и ее значение в пищевых целях/И. А. Лаблайка, М. Н. Лишев, Д. В. Узарс, С. А. Хозиоский/Fischerei— Forschung. — 1975. — Jg. 13, H. 1. — S. 31—37.
182. Состояние микробных процессов в открытой части Балтийского моря в зимний период года/А. Б. Цыбань, Г. В. Панов, Н. М. Мирошниченко, В. А. Юрковска//Исследование экосистемы Балтийского моря. Вып. 2. — Л., 1985 . —С. 20—37.
183. Спасский Н. Н., Мережинская С. М. Распределение и сезонные изменения кормовой базы и питания трески в Клайпедском районе Балтийского моря в 1956— 1957 гг.//Труды БалтНИРО. — 1958. — Вып. 4. — С. 301— 325.
184. Суворов Е. К. К ихтиофауне Балтийского моря// Труды Балтийской экспедиции. Вып. 2. — СПб, 1913. — С. 37—43.
185. Токарева Г. И. Рост и возрастной состав трески в юго-восточной части Балтийского моря//Труды ВНИРО. — 1954. — Т. 26. — С. 67—78.
186. Токарева Г. И. Методика определения возраста (по отолитам) и особенности роста трески Балтийского моря// Труды АтлантНИРО. — 1963. — Вып. 10. — С. 179—191.
187. Токарева Г. И. Динамика популяции балтийской трески в связи с особенностями ее биологии и промысла. — Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Калининград, 1967. — 23 с.
188. Тоом М. М. Опыты по инкубации икры балтийской салаки//Труды ВНИРО. — 1958. — Т. 34. — С. 19—27.
189. Трауберга Е. Ф. Характеристика питания молоди салаки в Рижском заливе в 1965—1967 гг.//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1970. — Вып. 3. — С. 52—65.
190. Узарс Д. В. Роль трески в экосистемах Восточной и Юго-Восточной Балтики//Экосистемы Балтики. Ч. 2. Сб. докл. Междунар. симпоз. стран—членов СЭВ, Гдыня, 20—26 янв. 1975 г. — Гдыня, 1980. — С. 316—331.
191. Узарс Д. В., Лишев М. Н. Характеристика питания трески в Восточной Балтике и влияние ее на запасы салаки и кильки//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1967. — Вып. 3. — С. 64—76.
192. Феттер М. Е. О связи некоторых гидрологических факторов с распределением нагульных скоплений сельди в Южной Балтике/Fischerei—Forschung. — 1976. — Jg. 14, H. 1. — S. 17—18.
193. Физиологические группы бактерий залива Куршю-Марес/К. К. Янкявичюс, А. Ю. Баранаускене, Д. А. Швейждайте, Р. И. Розюлите//Труды АН ЛитССР. Сер. В. — 1962. — Вып. 2 (28). — С. 15—34.
194. Халдинова Н. А. Некоторые особенности биологии балтийской трески//Труды ВНИРО. — 1960. — Т. 42. — С. 109—119.
195. Халдинова Н. А., Назвич Л. Г., Рейн М. В. О вертикальном распределении мизид в Балтийском море//Труды ВНИРО. — 1960. — Т. 42. — С. 75—83.
196. Цыбань А. В. Метод расчета микробной деструкции нефтяных углеводородов//Исследование экосистемы Балтийского моря. Вып. 1. — Л., 1981. — С. 61—68.

197. Чакур Г. К. Результаты лечения балтийской трески в 1957—1960 гг.//Труды конф. мол. специалистов НИИРХ СНХ ЛатвССР. — Рига, 1962. — С. 21—27.
198. Чехова В. А. Вертикальные миграции *Mysis mixtra* и *Mysis oculata var relicta* в Рижском заливе//Труды НИИРХ СНХ ЛатвССР. — 1961. — Т. 3. — С. 307—327.
199. Швецов Ф. Г., Калейс М. В. Особенности формирования зимних скоплений шпрота в восточной части Балтийского моря под влиянием океанологических факторов//Fischerei—Forschung. — 1982. — Jg. 20, H. 1. — S. 51—53.
200. Швецов Ф. Г., Стародуб М. Л., Сидревич Л. Л. Суточный ритм питания балтийского шпрота *Sprattus sprattus balticus (Schneider) (Clupeidae)*//Вопр. ихтиологии. — 1983. — Т. 23, вып. 2 (169). — С. 280—286.
201. Швецова Г. М. О размножении двух видов реликтовых арктических мизид Рижского залива//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1980. — Вып. 15. — С. 108—117.
202. Швецова Г. М. Сезонная изменчивость количества и распределения мизид в Восточной Балтике//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1983. — Вып. 18. — С. 18—25.
203. Шевцов С. Е. Селективные свойства кутков зонных тралов на промысле балтийской трески//Fischerei—Forschung. — 1976. — Jg. 14, H. 1. — S. 49—52.
204. Шевцов С. Е. Селективные свойства кутков тралов на промысле речной камбалы в Балтийском море// Fischerei—Forschung. — 1980. — Jg. 18, H. 2. — S. 97—102.
205. Широкова М. Я. Темп полового созревания поколений балтийской трески, отлавливаемой промыслом в 1961—1963 гг.//Труды АтлантНИРО. — 1969. — Вып. 21. — С. 37—44.
206. Широкова М. Я. Особенности раннего онтогенеза балтийской трески//Труды АтлантНИРО.— 1971.— Вып. 35.— С. 113—122.
207. Шкицкий В. А. Сезонные изменения вертикального распределения балтийского шпрота//Гидробиологические исследования. — 1967. — Вып. 6. — С. 74—77.
208. Шкицкий В. А. Особенности созревания отолитов в связи с порционностью икрометания у балтийского шпрота//Труды КТИРПиХ. — 1968. — Вып. 20. — С. 11—15.
209. Шкицкий В. А. К изучению возраста шпрота северных и центральных районов Балтийского моря//Труды КТИРПиХ. — 1969. — Вып. 24. — С. 17—19.
210. Шкицкий В. А., Ноздрин Я. П. К вопросу о суточных вертикальных миграциях балтийского шпрота *(Sprattus sprattus balticus)*//Труды АтлантНИРО. — 1969. — Вып. 21. — С. 133—139.
211. Шнейдер Г. Килька *(Clupea sprattus)*//Вестн. рыбопромышленности. — 1891. — № 12. — С. 505—515.
212. Шурин А. Т. Донная фауна Рижского залива//Труды Латв. отд-ния ВНИРО. — 1953. — Т. 1. — С. 77—113.
213. Шурин А. Т. Кормовые поля речной камбалы *Pleuronectes Flesus trachurus kunder* Рижского залива//Труды Латв. отд-ния ВНИРО. — 1957. — Т. 2. — С. 141—157.
214. Шурин А. Т. Донная фауна Рижского залива и условия ее распространения//Труды ВНИРО. — 1960. — Т. 42. — С. 37—60.
215. Шурин А. Т. Состояние донной фауны в период с 1900 по 1962 г. в меняющихся условиях Балтийского моря// Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1968. — Вып. 4. — С. 61—89.
216. Щукина И. Н. Питание и миграции речной камбалы *(Pleuronectes flesus trachurus Dunck.)* в районе острова Хийумаа//Труды БалтНИИРХ. — 1970. — С. 361—378.
217. Экологофизиологическая характеристика бактериального населения пелагиали Балтийского моря/ А. В. Цыбань, М. Ю. Пфейфере, Г. В. Панов, С. П. Баринова//Исследование экосистемы Балтийского моря. Вып. 2.— Л., 1985. — С. 129—143.
218. Экосистема и ее компоненты. Международный проект «Балтика»: Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 1. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — 225 с.
219. Юрковска В. А. Исследование индикаторных групп микроорганизмов и общей численности бактериопланктона для характеристики качества вод Балтийского моря// IV Всесоюз. симпоз. по современным проблемам самоочищения водоемов и регулирования качества воды. — Таллин, 1979. — С. 49—51.
220. Юрковска В. А. Микроорганизмы//Экосистема и ее компоненты. Вып. 1. — Л., 1983. — С. 157—160.
221. Юрковска В. А. Типы донных осадков Балтийского моря и их микробиологическая характеристика//Биоценозы различных трофических уровней. Сер. Биология Балтийского моря. — Рига, 1983. — С. 100—118.
222. Юрковска В. А., Модре В. А. О количестве бактериопланктона и фотосинтезирующих пигментов фитопланктона в Балтийском море//Биоценозы различных трофических уровней. Сер. Биология Балтийского моря.— Рига, 1983. — С. 8—20.
223. Ярвекюльг А. А. Некоторые закономерности распределения зообентоса в восточной части Балтийского моря//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1968. — Вып. 4. — С. 89—109.
224. Ярвекюльг А. А. Зообентос как индикатор загрязнения, эвтрофирования и самоочищения бентали Балтики//Ambio Special Rep. — 1976. — N 4. — P. 81—88.
225. Ярвекюльг А. А. Донная фауна восточной части Балтийского моря. — Таллин: Валгус, 1979. — 382 с.
226. Ярвекюльг А. А. Зообентос Центральной и Восточной Балтики//Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 3. — М., 1984. — С. 155—234.
227. Ackefors H. Ecological zooplankton investigations in the Baltic proper 1963—1965//Rep. Inst. Mar. Res., Lysekil. Ser. Biol. — 1969. — N 18. — P. 1—139.
228. Ackefors H. Seasonal and vertical distribution of the zooplankton in the Asko area (Northern Baltic proper) in relation to hydrographical conditions//Oikos. — 1969. — Suppl. 20. — P. 480—492.
229. Ackefors H. Production studies of zooplankton in relation to the total production in the Baltic proper//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1975. — N 181. — P. 1—31.
230. Ackefors H., Lindahl O. Investigations on primary phytoplankton production in the Baltic in 1973//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1975. — N 179. — P. 1—66.
231. Ackefors H., Hernroth L., Lindahl O. Stydies on the primary and secondary production of plankton in the Baltic//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1975. — N 186. — P. 1—5.
232. Ahrens R. Ökologische Untersuchungen an sternbildeten Agrobatterium—Arten aus der Ostsee//Kieler Meeresforsch.— 1969. — Bd. 25, H. 2. — S. 190—204.
233. A hydroacoustic and trawl survey of herring and sprat stocks of the Baltic proper in October 1978/N. Hakansson, S. Kollberg, U. Falk et al.//Fischerei—Forschung. — 1978. — Jg. 16, H. 2. — S. 7—23.
234. Akustiska undersokuingar av sill och skarpsill i Ostersjon 1975—1977/A. Liadguist, O. Hagstrom, J. Hultgren et al.//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1977. — N 222. — P. 25—70.
235. Alasaarela E. Ecology of phytoplankton in the north of the Bothnian Bay//Acta Bot. Fennica. — 1979. — N 110.— P. 63—70.
236. Alasaarela E Phytoplankton and environmental conditions in central and coastal areas of the Bothnian Bay//Ann. Bot. Fennica. — 1979. — Vol. 16, N 3. — P. 241—274.
237. Andersin A.—B., Lassig J., Sandler H. Community stryctures of soft bottom macrofauna in different parts of the Baltic//Biol. Benthic Org. 2nd Eur. Mar. Biol., Galway, 1976. — Oxford, 1977. — P. 7—20.
238. Ankar S., Elmgren R. The benthic macro- and meiofauna of the Asko-Landsort area (northern Baltic proper)//Contrib. Asko Lab. — 1976. — N 11. — S. 1—115.
239. Apstein C. Plankton in der Nord und Ostsee auf den deutschen Terminfanhrten. T. 2//Wissenschaft. Meeresunters. — 1906. — Bd. 9. — S. 1—26.
240. Apstein C. Die Verbreitung der pelagischen Fischeier und Larven in der Beltsee und den angrenzenden Meeresteilen 1908/09//Wissenschaft. Meeresunters. — 1911. — Bd. 13. — S. 25—40.
241. Arlt G. Vertical and horizontal microdistribution of the meiofauna in the Greifswalder Bodden//Oikos. — 1973. — Suppl. 15. — P. 105—111.
242. Arndt E. A. Die Tiere der Ostsee//Die neue Brehm-Bucherei. — 1964. — Bd. 328. — S. 1—199.
243. Arntz W. E. Biomasse und Production des Makrobenthos in den Tiefern der Kieler Bucht im Jahr 1968//Kieler Meeresforsch. — 1971. — Bd. 27, H. 1. — S. 36—72.
244. Arntz W. E. A contribution to the feeding ecology of juvenile cod (*Gadus morhua L.*) in the Western Baltic// Rapp. Proc.-verb. Réun Cons. Intern. Explor. Mer. — 1974. — Vol. 166. — P. 13—19.
245. Assessment of the effects of pollution on the natural resources of the Baltic Sea, 1980//Baltic Sea Environment Proceedings. Baltic marine environmental protection sommision, Helsinki commission. — 1981. — N 5B. — P. 1—426.

246. Bagge O. The Danish cod fishery in the Baltic 1957—1970//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern Explor. Mer. — 1974. — Vol. 166. — P. 103—105.
247. Bagge P., Voipio A. Distributed bottom and hydrographic ponditions in tome coastal areas of Finland. I Lovitsa//Merentutkimuslait. Julk. — N. 239. — P. 3—12.
248. Bansemir K., Rheinheimar G. Bakteriologische Untersuchungen uber die Bildung von Sthwefelwasserstoff in einer Vertiefung der inneren Kieler Forde//Kieler Meeresforsch. — 1974. — Bd. 30, N. 2. — S. 91—98.
249. Berner M. Untersuchungen uber den Dorsch—bestand (*Gadus morhua L.*) der Bornholm- und Arkonasee in den Jahren 1953—1955//Zeitsthrift fur Fischerei. — 1960. — Bd. 9, H. 7. — S. 481—602.
250. Berner M. Einige orientierende Untersuchungen an den otolithendes Dorsches (*Gadus morhua L.*) aus verschiedenen Regionen fer Ostsee//Fischerei—Forschung. — 1968. — Jg. 6, H. 1. — S. 77—86.
251. Berner M. Bestimmung und Auswertung der Wanderungs parameter des Ostseedorsches auf Grundlage der Markierungsexperimente der Jahre 1959—1975 in den Markierungsgebieten der Mecklenburger Bucht—Bornholmsee//Fischerei—Forschung. — 1980. — Jg 18 H. 2. — S. 31—50.
252. Berner M., Borrmann H. Die Entwicklung des Ostseedorschbestandes in der ICES-Untergebieten Sd 25—32 (ostlich Bornholm) in den Jahren 1965—1976//Fischerei—Forschung. — 1980. — Jg. 18, H. 2. — S. 11—25.
253. Berner M., Vaske B. Uber das Geschlechtsverhaltnis und die Geschlechtsreifung des Ostseedorsches (*Gadus morhua L.*) in den ICES-Gebieten 22, 24 und 25 (Mecklenburger Bucht bis Bornholmsee//Fischerei—Forschung. — 1981. — Jg. 19, H. 2. — S. 37—46.
254. Bestimmung der Sprotlbiomasse in der Ostsee im Mai/Juni 1979 mittels akustischer Methoden und einer Trawlaufnahme/U. Falk, E. Götze, W. D. Tesler, F. G. Shvetsov//Fischerei—Forschung. — 1981. — Jg. 19, H. 2. — S. 19—26.
255. Beverton R. J. H., Holt M. A. On the dynamics of exploited fish populations. — London, 1957. — 533 p.
256. Blaxer J. H. S. The racial problem in herring from the viewpoint of recent physiological, evolutionary and genetical theory//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1958. — Vol. 143. — P. 10—19.
257. Blegvald H. On the flounder (*Pleuronectes flesus L.*) and the Dannish flounder fisherv in the Baltic//Rapp. Prot.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1932. — Vol. 78. — P. 1—28.
258. Boje S. Aspects of benthic metabolisms in Kiel Bay// Abstracts, 4th Baltic Mar. Biol. Symp., Gdansk, 13—18 Oct. 1975. — P. 7—8.
259. Bölter M. Numerical taxonomy and character analysis of saprophytic bacteria isolated from the Kiel Fjord and Kiel Bight//Microbiol ecology of a brackish water environment. Ecosogical studaes. — 1977. — Vol. 25. — P. 148—178.
260. Borysiak M. Chanres in qualitative pompotition of the southern Baltic phytoplankton arainst the hydrological background for 1971—1974//ICES C. M. — 1975. — N L20. — P. 1—10.
261. Boysen H. O. Seasonal variations in abundance of hyperbenthic animals in the Kiel Bight//Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1975. — N 239. — P. 206—212.
262. Brandt K. Fauna der Ostsee, insbesonderte die Kieler Bucht//Verh. Deutsch. Zool. Ges. — 1897. — Bd. 7. — S. 10—34.
263. Cederwall H. Annual macrofauna production of a soft bottom in the northern Baltic proper//Biol. Benthic Org. 2nd Eur. Symp. Mar. Biol., Galway, 1976. — Oxford, 1977. — P. 155—164.
264. Cederwall H., Elmgren R. Increased macrobenthic biomass as andicator of eutrophication in the Baltac Sea// Ophelia. — 1980. — Suppl. 1. — P. 287—304.
265. Chazan F. Stan stada dorsza poludniowo—wschodniego Baltyka w latach 1952—1954//MIR. — 1957. — Vol. 9. — P. 37—52.
266. Chazan F. Zosos i troc w polskich piawach na Baltyku w latach 1945—1955//Prace MIR. — 1959. — Vol. 10, Ser. A. — P. 10—57.
267. Cieglewicz W. Wzrost storni (*Pleuronectes flesus*) polawianej w zatoce Gdanskiej i w zahodnim Baltiku// Archiw. Hydrobiol. Rybactwa. — 1935. — Vol. 9. — P. 1—10.
268. Cieglewicz W. Flounder investigations in Gdansk Bay in 1959//Ann. Biol. — 1961. — Vol. 16. — P. 100—112.
269. Cieglewicz W. Characterystica biologiczna polowow storni (*Pleuronectes flesus*) w zatoce Gdanskiej//Prace MIR. — 1962. — Vol. 11, Ser. A. — P. 201—223.
270. Cieglewicz W., Mulicki Z. Sklad polowow przemysłowichstorni (*Pleuronectes flesus*) w zatoce Gdanskiej i w okolycy Libawy//Bull. Mor. Lab. Rybackiego. Gdynia. — 1948. — N 4. — P. 35—47.
271. Ciszewski P. The vertical migration of the Baltic zooplankton in a 24-hour cucle in the various seasons of the year//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1962. — Vol. 153. — P. 1—10.
272. Citzewski P. Effect of climatic conditions on microzooplankton baomass in the Southern Baltic//Merentutkimyslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1975. — N 239. — P. 137—138.
273. Ciszewski P., Witek Z. Production of older stages copepods Acaria bifilosa Giesb. and Pseudocalanus olongatus Boek in Gdansk Bay//Pol. Archiw. Hydrobiol. — 1977. — Vol. 24, N 4. — P. 449—459.
274. Cleve-Euler A. Die Diatomeen von Schweden und Finnland//Kungl. Svenska Vet. Akad. Handl. — 1951. — Ser. 4, Vol. 1, Bd. 2(1). — S. 1—162.
275. Dannevig A. The number of vetbebrae and rays of the second dorsal fin of fishes from the Norwegian Skagerrak coast//Ann. Biol. — 1974. — Vol. 2. — P. 131—146.
276. Dawson R., Gocker K. Heterotrophic activity in comparison to the free amino acid concentrations in Baltic Sea water samples//Oceanologica Acta. — 1978. — Vol. 1. — P. 45—54.
277. Demel K. Studia nad fauna denna i jij rozsiedleniem w polskich wodach Baltyki//Archiw. Hydrobiol. Rybactwa. — 1935. — Vol. 9. — P. 239—312.
278. Demel K., Mankowski W. Jloscowe studia nad fauna denna poludniowego Baltyki//Prace MIR. — 1951. — Vol. 6, Ser. A. — P. 57—82.
279. Demel K., Mulicki Z. Studia ilosciowa nad wydaj noscia biologiczna dna poludniowego Baltyki//Prace MIR. — 1954. — Vol. 7, Ser. A. — P. 75—126.
280. Dixon B. The composition of the Polish sprat catches in the Bay of Danzig in the seasons 1934—35 und 1935—36//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1937. — Vol. 107. — P. 1—12.
281. Duncker G. Variation und Asymmetrie bei *Pleuronectes flesus L.*//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1900. — Bd. 3, H. 2. — S. 5—10.
282. Edler L. Qualitative analysis of phytoplankton//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1975. — N 179. — P. 67—110.
283. Edler L. Phytoplankton and primary production in the Sound//Dep. Mar. Bot. — Univ. Gothenburg, 1977. — P. 1—82.
284. Edler L. Phytoplankton syccession in the Baltic Sea// Acta Bot. Fenica. — 1979. — N 110. — P. 75—78.
285. Ehrenbaum E. Uben Eier und Jugendformen des Seezunge und anderer im Fruhjahr laichender Fische. Fkunder//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1908. — Bd. 8, H. 2. — S. 5—10.
286. Ehrenbaum E. Versuche mit gezeichneten Flunder oder Elbluti (Pleuronectes flesus)//Ber. Deutsth. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1908. — Bd. 8, H. 2. — S. 20—25.
287. Ehrenbaum E. Eier und Larven von Fischen//Nordasches Plankton. — 1909. — Bd. 9. — S. 30—40.
288. Ehrenbaum E., Flundern A. Naturgeschichte und wirtschftliche Bedeuntung der Seefische Nordeuropas// Handb. d. Seefischerei Nordeuropas. — 1936. — Bd. 2. — S. 50—70.
289. Ehrenbaum E., Mielk W. Laichverhaltnisse von Scholle und Flunder//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1910. — Bd. 9, H. 2. — S. 50—60.
290. Elmgren R. Ecological and trophic dynamics in the enclosed, brackish Baltic Sea//ICES Symp. on biol. production on continental shelves in the temperate of the North Atlantic, Kiel, March 1982. — 1982. — N 27. — P. 1—50.
291. Elwertowski J. Biologiczna cherakterystyka polskich polowow szprota w Baltyku poludniowym w latath 1950—1954//Prace MIR. — 1957. — Vol. 9, Ser. A. — P. 175—219.
292. Elwertowski J. Biologische grudlagen der Sprottenfischerei in der Ostlichen und mittleren Ostsee//Fischerei—Forschung. — 1960. — Jg. 3, H. 4. — S. 1—19.
293. Engvall A. G., Halberg R O. Notes on the distribution of sylfate-reducting bacteria in a modern Baltic sediment//Contrlb. Asko Lab. — 1973. — Vol. 2, N 1. — P. 17—24.
294. Enholm G. Studier over strommingen i Ostra Kvarken//

Havsforskning Inst. Skr. — 1951. — N 149. — P. 1—94.
295. Ergenisse der Dorschmarkierungen des Jahres 1975 in der Bornholmsee (Sd 25) einschließlich einiger Nortalitatsberechnungen und Eignuns vergleiche unterschiedlishen Marken und Schiffostypen/M. Berner, H. Borrmaan, C. C. Friess, E. Kondratovitsch//Fischerei—Forschung. — 1980. — Jg. 18. H. 2. — S. 51—58.
296. Fender K. Beitrage zum Rassenproblem des Ostseedorsches//Fischerei—Forschung. — 1961. — Jg. 4, H. 6/7. — S. 13—57.
297. Fischer E. Ist die Einfuhrung einer Schonzeit fur die Flunder der Ostsee erforderlich?//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern Explor. Mer. — 1932. — Vol. 78. — P. 1—12.
298. Fischer E. Der Einfuss der Fischerei auf den Schollen und Flunderbestland in der Ostsee//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1939. — Vol. 110. — P. 110—110.
299. Fluctuations and interactions of bacterial activity in sandy beach sediments and overlying waters/ L. A. Meyer-Reil, R. Dawson, G. Liebezeit, H. Tieger// Mar. Biol. — 1978. — Vol. 48. — P. 161—171.
300. Forsskahl M., Sundberg A. Abundance, biomass species composition of phyto- and zooplankton and their intercorrelations at the entrance to the Gulf of Finland in 1979//Meri. — 1981. — N 9. — P. 43—55.
301. Frequency of dividing cells, a new approach to the determination of bacterial growth rates in aquatic environments/R. Hagstrom, U. Larsson, P. Horstedt, S. Normak// Applied Environmental Microbiol. — 1979. — Vol. 37, N 5.— P. 805—812.
302. Gargas E., Nielsen G., Nortensen S. Phytoplankton production, chlorophyll-a and nutrients in the open Danish waters 1975—1977//The Belt Project, the National Agency of Enwironmental Protection. Horsholm—Charlottenlund. — Denmark, 1978. — P. 3—61.
303. German, swedish and danish cod tagging experiments in the Baltic in 1968—1969/O. Bagge, K. Tiews, F. Pamp, G. Otterlind//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1974. — Vol. 166. — P. 22—39.
304. Gessner E. Nitrat-Phosphat und Planktongehalt im Arkonabecken//Conseil Perman Intern. Explor. Mer. — 1933. — Vol. 8, N 2. — P. 181—194.
305. Gessner F. Meer und Strand. 2. Aufgabe//Deutsch. Verlag Wissenschafs. — Berlin, 1957. — S. 1—425.
306. Gocke K. Studies on short-term variations of heterotrophic activity in the Kiel Fjord//Mar. Biol. — 1975. — Vol. 33. — P. 49—55.
307. Gocke K. Untersuchungen über die heterotrophe Aktivitat in der Zentralen Ostsee//Mar. Biol. — 1977. — Vol. 40. — P. 87—94.
308. Gordon G. A. Bibliography of the order *Mysidacea*// Bull. Amer. Museum Natur. History. — 1957. — Vol. 112.— P. 3—12.
309. Hagmeier A. Die Bodenfauna der Ostsee im April 1929 nebst einigen Vergleichen mit April 1925 und Juli 1926//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1930. — Bd. 5. H. 1. — S. 156—176.
310. Hallberg R. The microbiological C—N—S cycle in sediment-water interface//Oikos. — 1973. — Suppl. 15. — P. 15—62.
311. Hallfors G. A., Niemi A. Biological oceanography// The Baltic Sea. — Amsterdam; Oxford; N. Y., 1981. — P. 219—238.
312. Heidrich H. Über die Fortpflanzung von *Clupea sprattus* in der Kieler Buecht//Wissenschaft. Meeresuntres. — 1925. — Bd. 1. — S. 1—48.
313. Heinen A. Die planktonischen Fischerei und Larven der Ostsee//Wissenschaft. Meeresuntres. — 1912. — Bd. 14. — S. 50—78.
314. Hellevaara E. Tutkimuhsia Lounais—Suomen Silakasta//Suomen Kalatalous. — 1912. — N 1. — S. 70—131.
315. Hernroth L., Ackefors H. The zooplankton of the Baltic proper//Rep. Inst. Mar. Res., Lysekil. — 1979. — N 2. — P. 15—34.
316. Hertlig H. Untersychungen uver die Ernahrung von Meeresfischen. 1. Quantative Nahrungsuntersuchungen an Pleuronectiden und einigen anderen Fischen der Ostsee// Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1928. — Bd 4, H. 2. — S. 90—165.
317. Hessle Ch. Bottenboniterigar i inre Ostersjon//Medd. Kungk. Lantbruksetyr. — 1924. — N 3 (250). — P. 1—82.
318. Hessle Ch. Sprat and sprat fishery on the Baltic coast of Sweden//Medd. Kungl. Lantbrukstyr.— 1927.— N 262.— P. 1—29.
319. Hessle Ch. The young bottom stages of the flounder *(Pleuronectes flesus L.)* at Faronand the northern part of Gotland//Svensk. Hydrograph. Biol. Komm. Skr. — 1930. — Bd. 1, N 4. — S. 1—50.
320 Hobro R. Stages of the annual zooplankton succession in the Asko area (northern Baltic Sea)//Acta Bot. Fennica. — 1979. — N 110. — P. 79—80.
321. Hoglund N. Über die Horizontale und vertikale Verteilung der Eier und Larven der Sprats *(Clupea sprattus L.)* im Skegerak-Katteratt-gebiet//Svesk. Hydrograph. Biol. Komm. Skr. — 1938. — Bd. 8, N 2. — S. 1—40.
322. Hoppe H. G. Untersychungen zur Okologie der Hefen in Bereich der westliches Ostsee//Kieler Meeresforsch. — 1972. — Bd. 28, H. 1. — S. 54—77.
323. Hoppe H. G. Determination and properties of actively metabolizing heterotrophic bacteria in the sea, investigated by means of micro-autoradiography//Mar. Biol. — 1976. — Vol. 36, N 1. — P. 291—302.
324. Hubel H., Hubel M. Nitrogen fixation blooms of Nodularia in coastal waters and backwaters of the Arkona Sea (Baltic Sea) in 1974//Intern. Rev. Gesamten Hydrobiol. — 1980. — Vol. 65, N 6. — P. 793—808.
325. Hurriaga R., Hoppe H. Observations of heterotrophic activity on photoassimilated organic matter//Mar. Viol. — 1977. — Vol. 40. — P. 101—108.
326. Ievtjukhova B. K., Lischev M. N. The relation of stock dynamics of Eastern Baltic herring with the system of surrounding factors//Proc. 2th Eur. Ichthyol. Congr. Paris, 1976.
327. Jamieson A., Otterlind G. The use of blood protein polymorphisms in the Belt Sea, the Sound and the Baltic Sea//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1971. — Vol. 161. — P. 27—35.
328. Jansson B.-O. Quantitative and experimental studies of the fauna in four Swedish sandy beaches//Ophelia. — 1968. — Suppl. 5. — P. 1—71.
329. Jansson B.-O. The Baltic — a systems analysis of a semi-enclosed sea//Adv. Oceanogr. — N. Y.; London, 1978. — P. 131—183.
330. Jarvi T. H. Die Flunderfischerei im Finland//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1932. — Vol. 78.— P. 1—5.
331. Jenkins J. T. Altersbestimmung durch Otolithen bei den Clupeiien//Uliss Meeressuntersuch. — 1902. — Bd 6. — S. 81—122.
332. Jensen A. J. C. Periodic fluctuations in the size of various stocks of fish and their causes//Medd. Komm. Havundersog., Fisk. — 1933.
333. Jensen A. J. C. Factors determining the apparent and the real growth//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1938. — Vol. 108. — P. 109—114.
334. Jensen A. J. C. Amount and growth of herring fry in the Danish waters//Rep. Danish Biol. Stat. — 1950. — N 55. — P. 19—48.
335. Jensen A. J. C. Danish investigations on the stock of cod, plaice flounder and dab in the Central Baltic and the fishery for these specu-ies in the Western Baltic//ICES C. M. — 1957. — N 74. — P. 1—13.
336. Jervegulg A. Easti ranniculvete mysididest//Eesti Loodus. — 1965. — Vol. 9, N 3. — P. 145—151.
337. Jurkovskis A., Modre B., Jurkovska V. Nutrients, chlorophyll-a and bacterioplankton in the Baltic proper in 1978 and 1979//Ann. Biol. — 1979 (1981). — Vol. 36. — P. 98—101.
338. Kaiser W., Renk H., Schulz G. Die Primarproduktion der Ostsee//Geol. Geophys. Veroff. — 1981. — R. 4, N 33. — S. 27—52.
339. Kandler R. Erneuerung und nutzung des Scholten und Flunderbestandes im Gebeit der Oderbank//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1931. — Bd. 6, H. 1. — S. 100—110.
340. Kandler R. Veranderungen im Flundernbestand der Ostsee durch die Ficherei//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1932. — Vol. 78. — P. 1—45.
341. Kandler R. Rassenkundliche Untersuchungen an Plattfischen//Ber. Deutsch. Wiss. . Komm. Meeresforsch. — 1935. — Bd. 7, H. 4. — S. 50—70.
342. Kandler R. Untersuchungen uber das Laichen des Ostseedorsches im Herbst//Kieler Meeresforsch. — 1938. — Bd. 2. H. 1. — S. 15—30.
343. Kandler R. Über die Einenerung der Heringsbestande und das Wachstum der Fruhjahs und Herbsteringe in der westlichen Ostsee//Monatshefle Filr Fischerei. — 1942. — Bd. 10. — P. 17—22.
344. Kandler R. Intersuchungenuber den Ostseedorsch wahrend der Forchungsfahrten mit R. F. D. «Posseidon» in

den Jahren 1925—1938//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1944. — Bd. 11, H. 1. — S. 14—121.
345. Kandler R., Dutt S. Fecundity of the Baltic herring// Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1958. — Vol. 143. — P. 99—108.
346. Kandler R., Pirnitz W. Uber die Fruchtbarkeit der Plattfische im Nordsee—Ostsee—Raum//Kieler Meeresforsch. — 1957. — Bd. 13, H. 1. — S. 11—34.
347. Kandler R., Thurow F. On the stock of the Flatfish and cod and the yields of the German fishery in the Baltic//ICES C M. — 1957. — N 152. — P. 1—25.
348. Kautsky N. Quantitative studies on gonad cycle, fecundity, reproduction output and recruitment in a Baltic Mytilus edulis population//Mar. Biol. — 1982. — Vol. 68, N 2. — P. 143—160.
349. Kell V. Phytoplanktonuntersuchungen in der Ostsee von der Lubecker Bucht bis zur Arkonasee. — Diss. Rostock, 1972.
350. Kell V. Das Phytoplankton der Salzwassereinbruchs in das Arkonabecken im Winter 1969//Wiss. Zeitschr. Univ. Rostock, Math. — 1973. — Jg. 22, H. 6/7. — S. 625—628.
351. Kell V. Das Phytoplankton der Ostsee//Geol. Geophys. Vëroff. — 1981. — R. 4, N 33. — S. 3—26.
352. Kell V., Riesenweber S. Das Phytoplankton der Darsser Boddengewasser (sudliche Ostsee) in den Jahren 1971 und 1972//Wiss. Zeitschr. Univ. Rostock, Math. — 1975. — Jg. 24, H. 6. — S. 719—724.
353. Khoziosky S. A., Shvetsov F. G., Uzars D. V. The dynamics of mortality components in Baltic sprat in Subdivisions 26 and 28//ICES C. M. — 1983. — N 57. — P. 1—15.
354. Kinne O. Neomysis vulgaris Thompson, eine autokologische biologische Studie//Zentralblatt. — 1955. — Bd. 74, H. 3—4. — S. 160—202.
355. Knudsen J. Contribution to the biology of the cod (Gadus callarias L.) in the Danish waters//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1954. — Vol. 136. — P. 37—48.
356. Kosior M. Zmiany stanu zasobow dorsza poludniowego Baltyku w latach 1954—1974//Studia i materialy. — 1977. — N 39, Ser. B. — P. 1—78.
357. Kraefft F. Uber das Plankton in Ost- und Nordsee und den Verbingungsgebieten mit besonderen Berucksichtigung der Copepoden//Wissenschaft. Meeresunters. — 1910. — Bd. 11. — S. 29—108.
358. Kupffer C. Die Entwicklung des Herings im Ei//Jahresber. Komm. Wissenschaft. Unters. Deutsch Meere in Kiel. — 1978. — IV—VI Jg. — Berlin. — S. 175—226.
359. Kupffer C. Uber Laichen und Entwicklung des Herings in der westlichen Ostsee//Jahresber. Komm. Wissenschaft. Unters. Deutsch Meere in Kiel. — 1978. — IV—VI Jg. — Berlin. — S. 25—35.
360. Laakso M. The bottom fauna in the surroundings of the Helsinki//Ann. Zool. Fenn. — 1965. — Vol. 2. — P. 19—37.
361. Lablaika I., Uzars D. Cod fry survey in the Eastern Baltic and its application in prognosis//ICES C. M. — 1978. — N J10. — P. 5.
362. Lamp F., Tiews K. Progress report on comparative tagging experimentson Baltic cod//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1974. — Vol. 166. — P. 47—50.
363. Larsson U., Hagstrom A. Phytoplankton exudate release as an energy source for the growth of pelagic bacteria//Mar. Biol. — 1979. — Vol. 52. — P. 199—206.
364. Larsson U., Hagstrom A. Fractionated phytoplankton primary production, exudate release and bacterial production in a Baltic eutrophication gradient//Mar. Biol. — 1982. — Vol. 67. — P. 57—70.
365. Levander K. M. Zur Kenntnis des Planktons und der Bodenfauna einiger seichten Brackwasserbuchten//Acta Soc. Fauna Flora Fennica. — 1901. — Bd. 20, N 5. — S. 1—34.
366. Lindahl G., Wallstrom K., Brattberg G. Short-term variations in nitrogen fixation in a coastal area of the Northern Baltic//Archiw. Hydrobiol. — 1980. — Vol. 89, N 1—2. — P. 88—100.
367. Lindahl O. Studies on the production of phytoplankton and zooplankton in the Baltic in 1976 and a summary of results from 1973—1976//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1977. — N 220. — P. 1—52.
368. Lindblom R. Fiskagg ach fiskyngel i Ostersjon//Fauna ach flora. — 1972. — Bd. 67, N 2. — S. 41—112.
369. Lindblom R. Effect av havrengoring po autalet agg och larver av skarpsill i ett prov//Zool. Revy. — 1974. — Bd. 36, N 1. — S. 19—23.
370. Lindguist A. Zur Fischereihydrographic der Sprotte (Clupea sprattus) an der schwedischen Westkuste//Rep. Inst. Mar. Res., Lysekil. Ser. Biol. — 1964. — N 15. — S. 1—87.
371. Lindguist A. Jahresklassen der Sprotte (Clupea sprattus) an der schwedischen Westkuste in den Fangen 1929—1965//Rep. Inst. Mar. Res., Lysekil. Ser. Biol. — 1966. — N 16. — S. 1—18.
372. Lindguist A. Meristic and morphometric characters. Yearclasses and «races» of the sprat (Sprattus sprattus)// Rep. Inst. Mar. Res., Lysekil. Ser. Biol. — 1968. — N 17. — S. 1—26.
373. Lindguist A. The sprat fluctuating stocks of limited distribution//O. E. C. D. Fisheries Division, Intern. Sympos. on Fisheries Economic Aspects of Fish Production, Paris, 29th Nov. — 3th Dec., 1971. — 1972. — P. 83—104.
374. Lindguist A., Hultgren J., Hagstrom O. Skarpsill och sill (Stromming i Ostersjon under april och maj 1976. Del. I: Ekolodningar och forsokstralmingar// Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1976. — N 208. — S. 37.
375. Lishev M. N., Lablaika I. A. Possibilities of forecasting the distribution of stock and efficiency of fishing for Baltic cod during prespawning and spawning periods//ICES C. M. — 1964. — N 90. — 12 p.
376. Lishev M. N., Uzars D. V. Some data on the relations between the stocks of cod, sprat and herring in the Eastern Baltic//ICES C. M. — 1967. — N H17. — 7 p.
377. Lishev M. N., Uzars D. V. Daily ration and food composition in cjd from Eastern Baltic//ICES C. M. — 1980. — N J5. — 9 p.
378. Loven S. Om nagra i Vettern och Venern fauna Crustaceer//Ofvers. Kongl. Vet.-Acad. Forhand. — 1862. — Bd. 18, N 6. — S. 285—314.
379. Loven S. Till fragan om Ishafsfaunans fronda utstracking en del af Hordens fastland//Ofvers. Kongl. Vet.-Akad. Forhandl. — 1863. — Bd. 19, N 8. — S. 463—468.
380. Maciejowska M. The effect of physical and chemical factors of the sea environment upon decomposition of cellulose in brackish water//Prace MIR. — 1969. — Vol. 15, Ser. A. — P. 33—54.
381. Maciejowska M., Rakowska E. Badania nad rozkladem paliw cieklich przez microorganizmy morskie// Prace MIR. — 1973. — Vol. 17, Ser. A. — P. 181—203.
382. Mankowski W. Oithona similis — scladnik planktonu Baltyku zachodniego w wodach Zatoki Gdanskiej//Bull. Stac. Mor. w Hel. — 1938. — N 3. — P. 1—20.
383. Mankowski W. Odzywianie sie i pokarm szprota (*Clupea sprattus L.*) Baltyku rodkowego//Archiw. Hydrobiol. Rybactwa. — 1947. — Vol. 13. — P. 37—90.
384. Mankowski W. Makroplankton Zatoki Gdanskiej w roku 1947//Prace MIR. — 1950. — Vol. 5, Ser. A. — P. 1—19.
385. Mankowski W. Zmiennosc productywnosci toni wodnej Baltyku//Prace MIR. — 1971. — Vol. 50. — P. 233—264.
386. Mankowski W. Zooplankton Baltyku i jego productywnosc//Productiwnosc ecosystemu morza Baltyckiego. Wiad. PAN, 1978. — P. 113—134.
387. Mansfeld W. Untersuchungen an Flundern der Lettlandischen Ostseekuste//Korr. Bull. Naturf. — 1934. — Bd. 61. — S. 1—20.
388. Melvasalo T., Viljamaa H. Planktonic blue-green algae in polluted coastal waters of Helsinki//Publ. Water Res. Inst., Nat. Board Waters, Finland. — 1977. — N 19. — P. 1—35.
389. Melvasalo T., Viljamaa H. Plankton composition in the Helsinki sea area//Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1975. — N 239. — P. 301—310.
390. Melvasalo T., Viljamaa H., Huttunen M. Planktonanalyysimenetelmat vuosina 1966—1972//Rep. Water Conservation Lab. — 1973. — N 5 (2). — P. 1—21.
391. Melvasalo T. et al. Assessment of the effects of pollution of the natural resources of the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1981. — N 5 B. — P. 1—426.
392. Meyer H. A. Beobachtungen uber das Wachstrum des Herings im Westlichen Teile der Ostsee//Jahresber. Komm. Wissenschaft. Unters. Deutsch. Meere in Kiel. — 1978. — IV—VI Jg. — Berlin. — S. 227—250.
393. Meyer P. F. Die wirtschftlichen und biologischen Grundlagen der Flunderfischerei in der Ostsee//Rap. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1939. — Vol. 109. — P. 106—113.
394. Meyer P. F. Die Zeesenfischerei auf Hering und Sprott, ihre Entwicklung und Bedentung fur die Ostseefischerei

und ihre Auswirkungen auf den Blankfischbestand der Ostsee//Hilfwirtsch. — 1942. — Bd. 40, A. 4/5. — S. 453—652.
395. Meyer P. F. Untersuchungen über die Marktlandungen an Plattfischen der Ostsee in den Jahren 1929 bis 1935 mit einem Nachtrag der Jahre 1936 und 1937//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1942. — Bd. 10, H. 2. — S. 100—110.
396. Meyer P. F. Die Dampferfischerei in der Ostsee wahrend der Kriegsjahre 1939/45 und ihre Bedeutung für die Fischwirtschaft und Fischereiwissenschaft. Wirtschaftlicher Teil.//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1950. — Bd. 12.
397. Meyer P. F. Die Dampferfischerei in der Ostsee während der Kriegsjahre 1939/45 und ihre Bedeutung für die Fischwirtschaft und Fischereiwissenschaft. Biologischer. T. I//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1951. — Bd. 12.
398. Meyer P. F. Die Dampferfischerei in der Ostsee wahrend der Kriegsjahre 1939/45 und ihre Bedeutung fur die Fischwirtschaft und Fischereiwissenschaft. Biologischer. T. II//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1952.— Bd. 12.
399. Meyer-Reil L. A. Autoradiography and Epifluorescence microscopy Combi and spectrum of activity metabolizing bacteria in natural water//Applied Environmental Microbiol. — 1978. — Vol. 9. — P. 506—512.
400. Meyer-Reil L. A. Uptake of glucose by bacteria in the sediment//Mar. Biol. — 1978. — Vol. 44. — P. 293—298.
401. Microbiologie/G. Rheinheimer, R. Ahrens, K. Bansemir, J. Schneider//Kieler Meeresforsch. — 1970. — Bd. 26, H. 2. — S. 150—216.
402. Miller A. Balti mere kilu oopaevalsest toitumisrutmist// ENSV TA Jaimetised — 1969. — Vol. 18, N 2. — P. 16—28.
403. Mobius K. Die wirbellosen Tiere der Ostsee//Jahrensber. Komm. Wissenschaft Unters. Deutsch. Meere in Kiel.— 1873. — Bd. 1. — S. 97—144.
404. Mobius K., Heinske F. Fische der Ostsee. — Berlin: Paul Parey, 1983. — 206 s.
405. Molander A. A research upon the sprat of the west coast of Sweden//Svensk. Hydrograph. Biol. Komm. Skr.— 1940. — Bd. 2, N 4. — S. 1—63.
406. Molander A. The sprat fishery and the sprat of the west coast of Sweden//Rep. Inst. Mar. Res., Lysekil, Ser. Biol. — N 2. — 1959. — P. 1—66.
407. Molander A. Swedish investigations on plaice and flounder in the Southern Baltic//J. Conseil. — 1955. — Vol. 21, N 1. — P. 23—43.
408. Mulicki Z. Szkic ilosciowego rozmieszenia fauny dennej u polskich wybrzeży Baltyku//Bull. Stac. Mor. w Helu. — 1938. — Vol. 2, N 11. — S. 75—102.
409. Mulicki Z. Changes in the composition of the flounder stock in the Gulf of Gdansk during the war//Rap. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1948. — Vol. 122. — P. 100—110.
410. Mulicki Z. The state of the South Baltic flatfish stock// ICES C. M. — 1957. — N 23. — P. 1—18.
411. Munch-Petersen S. An investigation of a pollution of the soft clam (Mva arenaria L.) in a Danish estuary// Medd. Danm. Fiak. Havundersg. — 1973. — Vol. 7, N 3. — P. 1—10.
412. Munthe A. On the development of the Baltic herring in the light of the Late Quarternary history of the Baltic//Ark. Zool. — 1956. — N 9 (10). — P. 333—341.
413. Nehring D., Schulz S., Kaiser W. LongOterm phosphate and nitrate trends in the Baltic proper and some biological consequences: A contribution to the discussion concerning the eutrophication of these waters//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1984. — Vol. 183. — P. 193—203.
414. Netzel J. Polish investigations on juvenile cod in Gdansk Bay and the southern part of Bornholm Basin// Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1974. — Vol. 166. — P. 62—65.
415. Netzel J. Wedrowki dorsza baltyckiego proba okreslenia dynamiki jego populacji na podstawie znakowan w latach 1954—1963//Prace MIR. — 1976.— Vol. 37, Ser. B.— 100 p.
416. Netzel J. Polish investigations on juvenile cod in the Gulf of Gdansk in 1962—1979//ICES C. M. — 1979. — N J16.
417. Niemi A. Ecology of phytoplankton in the Tvarminne area, SW coast of Finland//Acta Bot. Fennica. — 1975. — N 105. — P. 1—73.
418. Niemi A. Blue-green algae blooms and N:P ratio in the Baltic Sea//Acta Bot Fennica. — 1979. — N 110. — P. 57—61.
419. Niemi A., Hallfors G. Some phytoplankton species from Baltic waters//Mem. Soc. Fauna Flora Fennica. — 1974. — N 49. — S. 77—93.
420. Niemi A., Ray J. L. Phytoplankton production in Finnish coastal waters. Rep. 2: Phytoplankton biomass and composition in 1973//Meri. — 1977. — N 4. — P. 6—22.
421. Niemi A., Tulkki P. Views on changes in the Baltic Sea ecosystem during recent decades//Intern. workshop ecological investigations of the Baltic environment, March 15—20. Riga. — Riga, 1983. — P. 1—15.
422. Nitrogen fixation (acetylene reduction method) by blue-green algae in the Baltic Sea in 1975 and 1977/ J. Rinne, T. Melvasalo, A. Niemi, L. Niemisto//Publ. Water Res. Inst., National Board of Waters, Finland. — 1979. — N 34. — P. 88—107.
423. Nordqvist O. Bidrag till kannodmen om Bottniska viken och norra Ostersjons evertebratfauna//Medd. Soc. Fauna Flora Fennica. — 1890. — N 17. — S. 83—128.
424. Nutrient conditions and phyto- and bacterioplankton in the Baltic proper and the Gulf of Finland in 1981— 1982/A. Jurkovskis, B. Kalveka, B. Modre et al.//Ann. biol. — 1982 (1985). — Vol. 39. — P. 80—84.
425. Ojaveer E. On embryonal mortality of spring spawning herring on spawning grounds in the north-eastern Gulf of Riga//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1981. — Vol. 178. — P. 100—105.
426. Ojaveer E. Marine pelagic fishes//The Baltic Sea. — 1983. — P. 276—292.
427. Ojaveer E., Simm M. Effect of zooplankton abundance and temperature on time and place of reproduction of Baltic herring groups//Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1975. — N 239.
428. On the importance of the nitrogen fixation in the Baltic Sea ecosystem/T. Melvasalo, A. Niemi, L. Niemisto, J. Rinne//Workshop ecological investigations of the Baltic Sea environment, March 15—20, Riga. — Riga, 1983.— P. 1—15.
429. Ostrowski J. Biomassa i produkcia skorupiaka, Pontoporeia femorata (Kroyer), oras malza, Macoma baltica (L.), v Zatoce Gdanskiej//Prace MIR. — 1976. — Vol. 18, Ser. A. — P. 81—94.
430. Otterlind G. Swedish cod migrations in the Baltic// Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1959. — Vol. 147. — P. 97—102.
431. Otterlind G. Sillens strommingens vandrig svanor vid svenska Syd. och. ostkusten//Ostkusten. — 1962. — Bd. 34, N 1. — S. 15—21.
432. Otterlind G. Flundrans vandringsvanor i mellestar Ostersjon//Ostkusten. — 1962. — Bd. 38, N 34. — S. 19—26.
433. Otterlind G. Om rodsorattans och flundrans vandringsvanor i sodra Ostersjon//Ostkusten. — 1967. — Bd. 39, N 10. — S. 9—14.
434. Otterlind G. Swedish cod fishery in the Baltic//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1974. — Vol. 166. — P. 97—102.
435. Pankow H Algenflora der Ostsee. Plankton. — Jena: Gustav Fischer Verlag, 1976. — S. 1—493.
436. Parmanne R., Sjoblom V. Abundance of sprat eggs and larvae in the northern Baltic in 1979//ICES C. M. — 1980. — N J10
437. Parmanne R., Sjoblom V. Abundance of sprat eggs and larvae in the northern Baltic Sea in 1982 and 1983// ICES C. M. — 1984. — N J12.
438. Parsons L. S. Morphometric variation in Atlantic herring from Newfaundland and adjacent waters//Res. Bull. Intern. Comm. Northw. Atlantic Fish. — 1975. — N 11. — P. 73—92.
439. Petersen C. G. J. The biology of the cod in the Danish Sea//Rep. Dan. Biol. Stat. — 1901. — N 11.
440. Phosphorus and the seasonal dynamics of phyto-, bacterio- and zooplankton in the Baltic proper in 1978 and 1979//Ann Biol. — 1974 (1976). — Vol. 31. — P. 75—79.
441. Phytoplankton primary production in the Gulf of Bothnia in 1972—1975 as compared with other parts of the Baltic Sea/J. Lassig, J.-M. Leppanen, A. Niemi, G. Tamelander//Finnish. Mar. Res. — 1978. — N 244. — P. 101—115.
442. Popiel J. Pokarm i odzywianie sie sledzia (Clupea harengus L.) terenie zatoki Gdanskiej i wod przyleglych// Prace MIR. — 1951. — Vol. 6, Ser. A. — P. 29—56.

443. Popiel J., Strzyzewska K. Zmiany stanu zasobow sledzi poludniowego Baltyku w latach 1957—1967//Prace MIR. — 1971. — Vol. 16, Ser. A. — P. 85—108.
444. Poulsen E. M. Investigations of fluctuations in the cod stock in Danish waters//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1930. — Vol. 74. — P. 57—68.
445. Poulsen M. E. The sprat fishery and the sprat populations in the Danish waters//Rep. Dan. Biol. Stat. — 1950. — N 52. — P. 3—26.
446. Reibisch J. Die Ostsee Expedition 1901. 2. Hydrographische Beobachtungen 4//Wirbellose Bodentiere. — 1902. — S. 85—160.
447. Reiman L. Odzynianie sie i porkarne mlodocianege dorsza poludniewege Baltyku//Prace MIR. — 1955. — Vol. 8, Ser. A. — P. 172—186.
448. Reimann Z. Sklad polowow storni (Pleuronectes flesus L.) rajonu Gdanskiego w latach 1945—1952//Prace MIR. — 1957. — Vol. 9, Ser. A. — P. 103—150.
449. Remane A. Einfuhrung in die zoologische Okologie der Nord und Ostsee//Tierwelt Nord und Ostsee. — 1940. — Bd. 1a. — S. 1—238.
450. Remane A. Okologie des Brackwassers//Die Binengewasser. — 1958. — Bd. 12. — S. 1—216.
451. Rheinheimer G. Abwasserbelastung und Bakterienverteilung in der westlichen Ostsee//Acta Hydrochim. Hydrobiol. — 1975. — Bd. 5, H. 5. — S. 473—480.
452. Rheinheimer G. Relations between pollution and bacterial flora in the western Baltic Sea//Abstracts, 4th Baltic Mar. Biol. Symp., Gdansk, 13—18 Oct., 1975. — P. 3—4.
453. Rieper M. Investigations on the relationships between algae blooms and bacterial populations in the Schei Fjord (western Baltic Sea)//Wissenschaft. Meeressunters. — 1976. — Bd. 28. — S. 1—18.
454. Riikoja H. Tartu Ulikooli juurus oleva//Loodusurijata seltsi aruanded. — 1933. — N 40. — P. 1—10.
455. Ringer Z. Phytoplankton of the southern Baltic Sea// Pol. Archiw Hydrobiol. — 1973. — Vol. 20, N 3. — P. 371—378.
456. Rumek A. Odzywianie sie larve storni *P. Flesus L.*// Bull. Mor. Inst. Ryb. — 1950. — N 5.
457. Rutkowicz S. Wyniki badan nad stadem dorsza (*Gadus callarias L.*) poludniowego—wschodniego Baltyku w latach 1946—1960//Prace MIR. — 1963. — Vol. 12, Ser. A. — P. 165—194.
458. Samter M., Weltner W. Biologische Eigentumlichkeiten der Mysis relucta, Pallasiella quadrispinoza und Pontoporeia affinis, erklart aus ihrer eiszeitlichen Entstehung// Zool. Anz. — 1904. — Bd. 27. — S. 676—694.
459. Sandmann J. A. Kurzer Berlicht uber in Finland ausgefuhrte Untersuchungen uber den Flunder, den Steinbutt und den Kabeljau//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1906. — Vol. 5. — P. 50—60.
460. Sarvala J. Production of Harmothoe sarsi at a soft bottom locality near Tvarminne South Finland//Abstracts, 4th Baltic Mar. Biol. Symp., Gdansk, 13—18 Oct., 1975. — P. 10—11.
461. Schneider G. Uber den Killo und Seine Existenzbedingungen an der Estlandischen Kuste. Mit 1 Kaste. Revae, Typographic des «Revaler Beobachten», 1895. — S. 1—10.
462. Schneider G. Uber die Fortpflanzung von Clupea sprattus L. im Finnischen Meerbusen//Zool. Anz. — 1901.— Bd. 25. — S. 9—11.
463. Schneider G. Zur Fischkunde in den Ostsee provinzen//Korr. Bull. Naturf. — 1904. — Bd. 47. — S. 65—66.
464. Schneider G. Die Clupeiden der Ostsee//Rapp. Proc.-verb. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1908. — Vol. 9.— P. 66—120.
465. Schneider G. Pelagische Eier und Jugendformen von Ostsefischer//Svensk Hydrograph. Biol. Komm. Skr. — 1908. — Bd. 3.
466. Schneider G., Levander K. M. Ichtuologische Beitrage, 1 Notizen uber die an der Sudkuste Finlands in den Skaren des Kirchspieles Eslo vorkommen den Fische// Acta Soc. Fauna Flora Fennica. — 1900. — Bd. 20, N 1. — 67 S.
467. Schneider J. Fungi//Microbiol ecology of a brackish water environment. Ecological studies. — 1977.— Vol. 25.— P. 90—102.
468. Schmidt J. Racial investigations. X. The Atlantic cod (*Gadus callarias L.*) and local races of the same// C. R. Trav. Lab., Carlsberg. — 1930. — Vol. 18, N 6. — P. 13—40.
469. Schnese W. Estimation of plankton production in shallow inlets of the DDR Baltic coastline//Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1975. — N 239.— P. 131—136.
470. Schulz G., Kaiser W. Produktions-biologische Untersuhungen in der Ostsee 1972//Fischerei—Forschung. — 1974. — Jg. 12, H. 1. — S. 17—22.
471. Sclulz G., Breul G., Siegel H. Ergebnisse okologischer Experimente in der Arkonasee 1977 und 1978. I. Methoden, Phytoplanktondynamik. Beziehung Phytoplankton—Nahrstoffe—Licht//Unveroff. Wiss. Ber. Inst. Meereskunde. — Warnemunde, 1978.
472. Schwarz S. Produktionsbiologische Untersuchungen am Zooplankton der Rugenschen Hiddenseer und Darsser Boddengewasser (1953 bis 1955)//Ibid. — 1962. — N 10. — S. 401—428.
473. Segerstralle S. G. Studen über die Bodentierwelt in sudfinnischen Kustengewassern. II Übersicht über die Bodentier-Welt, mit besonderer Berucksichtigung der Produktionsverhaltnisse//Comm. Biol. Soc. Sci. Fennica. — 1933.— Bd. 4, N 9. — S. 1—79.
474. Segerstralle S. G. Über die Verbreitung der Mysiden in den Finland umgebend en Meerengewassern// Comm. Biol. Soc. Sci. Fennica. — 1945. — Bd. 6, N 9. — S. 1—15.
475. Segerstralle S. G. The brackish water fauna of Finland//Oikos. — 1949. — Suppl. 1. — P. 127—141.
476. Segerstralle S. G. On the immigration of the glacial relicts of Northern Europe with remarks in their prehistory//Comm. Biol. Soc. Sci. Fennica. — 1957. — Bd. 6, N 7. — S. 3—10.
477. Segerstralle S. G. Investigations on baltic populations of the Bivalve, *Macoma baltica*//Comm. Biol. Soc. Sci. Fennica. — 1960. — Bd. 23, N 2. — S. 1—72.
478. Seppanen H., Voipio A. Some bacteriological observations made in the Northern Baltic//Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1971. — N 233.
479. Shvelsov S., Vilinsh M., Lebedeva I. Flounders in the Eastern Baltic (Subdivision 28) and North-Eastern Baltic (Sd 29 & 32) fishery and catch structure//Ann. Biol. — 1983. — Vol. 38. — P. 183—184.
480. Short-term variations in microbiological and chemical parameters/L. A. Meyer-Reil, M. Bolter, G. Liebezeit, W. Schramm//Mar. Ecology—Progress Ser. — 1979. — Vol. 15. — P. 1—6.
481. Sick K. Haemoglobin polymorphism of cod in the Baltic and the Danish Belt-Sea//Hereditas. Lund. — 1965. — Vol. 54. — P. 19—48.
482. Simosen R. Untersuchungen zur Systematik und Okologie der Bodendiatomen der westlichen Ostsee//Berlin Intern. Rev. Ges. Hydrobiol. — Berlin, 1962. — S. 1—44.
483. Siudzinski K. Zooplankton zatoki Gdanskiej//Studia i Materialy. Ser. A. — 1977. — N 18. — P. 1—111.
484. Sjoblom V., Aro E. Flounder of the coast of Finland in 1977 and 1978//Ann. Biol. — 1980. — Vol. 35. — P. 232.
485. Sjoblom V., Parmanne R. Abundance of sprat larvae in the Northern Baltic in 1975//ICES C. M. — 1976.— N P13.
486. Sjoblom V., Parmanne R. Abundance od sprat eggs and larvae in the Northern Baltic in 1978//ICES C. M.— 1979. — N J20.
487. Solemdal P. The effect of salinity of buoyancy, size and development of flounders eggs//Sarsia. — 1967. — Vol. 29. — P. 431—442.
488. Stanek E. Charakterystyka biologiczna dorsza (Gadus morhua callarias L.) z Bseenu Bornholmskiego v latach 1957—1960//Prace MIR. — 1965. — Vol. 13, Ser. A.— P. 381—387.
489. Stordtmann S. Laichen und wandern der Ostseefische//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1906.— Bd. 7. — S. 133—216.
490. Strodtmann S. Weitere Untersuchungen uber Ostsee fische//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1918. — Bd. 14. — S. 33—95.
491. Strzyzewska K. Odzywenie sie i pokarm dorsza Baltyka poludniowego//Prace MIR. — 1962. — Vol. 11, Ser. A. — P. 387—421.
492. Szeniawska A. The composition and seasonal changes in the zooplankton in Puck Bay proper in 1973 and 1974//Zesz. Nauk. U. G. Oceanogr. — 1977. — N 5. — S. 79—101.
493. Taube F. Rotatorien aus Umgegend von Dorpat und Riga//Korr. Bull. Naturf. — 1924. — Bd. 48. — S. 1—10.
494. The plankton community and phytoplankton—zooplankton relationships in the Northern Bothnian Bay/I. Valto-

nen, E. Alasaarela, P. Kankaala, M.-L. Kaski//Finn. Mar. Res. — 1978. — N 244. — P. 127—136.
495. Thurow F. Über die Fortflanzung des Dorsches *Gadus morhua* (*L.*) in den Kieler Bucht//Ber. Deutsch. Wiss. Komm. Meeresforsch. — 1970. — Bd. 21, H. 1—4. — S. 170—192.
496. Uzars D. Feeding and relative liver weight of Baltic cod in winter-spring period of 1970//Ann. Biol. — 1971. — Vol. 27. — P. 92—93.
497. Vaatanen P., Scendquist J. Microbiol cellulolytic activity of the brackish water in the Tvarminne area, Northern Baltic Sea//Berlin Intern. Rev. Ges. Hydrobiol.— 1977. — Bd. 62, N 6. — S. 797—804.
498. Valikandas I. Planktonogische Untersuchungen im Hafengebiet von Helsingfors//Acta Zool. Fennica. — 1926. — N 1. — S. 1—298.
499. Veldre J., Hell A. Zaanemere kirdeose kilu morfologilistest tuunustert//Hydrobiologilised merimused. — Tartu, 1961. — P. 343—361.
500. Vitinsh M. Migration of flounder in the Eastern Baltic//ICES C. M. — 1972. — N F14. — P. 1—5.
501. Weber W. Die Laichplatze des Herings (Clupea harengus L.) der westlichen Ostsee//Kieler Meeresforsch. — 1971. — Bd. 27, H. 2. — S. 194—208.
502. Weise W., Rheinheimer G. Fluoreszenmikroskopische Untersuchungen uber die Bakterienbeziedlung mariner Sandsedimente//Bot. Mar. — 1979. — Bd. 22. — S. 99—106.
503. Viktor K., Plinski M. Changes in plankton resulting from the eutrophication of a Baltic firth//Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1975. — N 239. — P. 311—315.
504. Zalachowski W. Hasciowa i ecologizna analiza pokarmu uzytkowanego przez Baltyku w latach 1972—1974 Wydawnictwo Akad. Rolniczej. — Szzecin, 1977. — 109 s.
505. Zemskaja K. A. Short characteristic of the fishing stock of Pleuronectes flesus in the Middle Baltic//ICES C. M. — 1957. — N 16.
506. Zemskaja K. A. The stock of flounder in the Central Baltic//Ann. Biol. — 1962. — Vol. 17. — P. 117—118.
507. Ziezik M. The biometrical features of cod caught in the Polish and Danish waters of Baltic//Archiw Hydrobiol. Rybactwa. — 1938. — Vol. 11. — P. 15—22.
508. Zimmer C. Mysidacea//Tierwelt der Nord und Ostsee.— 1933. — Bd. 10, N 3. — S. 30—69.
509. Zimmermann R., Meyer-Reil L. A. Estimation of bacterial number and biomass by epifluorescence microscopy and scanning electron microscopy//Microbiol ecology of a brackish water environment. Ecological studies. — 1977. — Vol. 25. — P. 103—120.
510. Zmudsinski L. Zmianu w zasobach zoobentocu poludniewego Baltyku w okresie ostatnich 100 lat. — Mines, 1969. — P. 1—102.
511. Zmudsinski L. Swiat zwierzecy Baltyku//Wydawnictwa Szcolne i Pedagogiczne. — Warsawa, 1974. — P. 1—216.
512. Zmudsinski L. Zoobentos litoralu Baltyku//Zoobentos Baltyku lat szescdziesiatych. — Slupsk, 1982. — P. 5—38.
513. Zmudsinski L. Pollution problems of Baltic Sea// Pol. Ecol. Stud. (PRL). — 1983 (1984). — Vol. 9, N 3. — P. 397—415.

ЧАСТЬ II. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

Настоящее научно-справочное описание гидрохимического режима Балтийского моря основано на результатах статистического анализа временных рядов наблюдений в 5 характерных районах моря с 1958 по 1985 г. При анализе данных существенное значение имеет учет годовой ритмики гидрохимических элементов в верхнем слое моря и многолетней цикличности в глубинном слое, что позволяет не только выявить закономерности сезонной и межгодовой изменчивости гидрохимических показателей, но и объяснить их, исходя из режимообразующих факторов. Впервые описание гидрохимического режима дано в терминах квантильного анализа, позволяющих охарактеризовать центр и масштаб распределения и оценить размах изменчивости. Полнота описания достигается рассмотрением всех (наблюденных и рассчитанных) элементов в диапазоне внутри- и межгодовой изменчивости с учетом вертикальной и горизонтальной неоднородностей гидрохимических характеристик.

Отмеченные особенности анализа данных и интерпретации их обработки позволили существенно дополнить сведения о гидрохимическом режиме Балтийского моря, содержащиеся в ранее опубликованных работах, таких, как «Гидрохимический режим Балтийского моря» [19], «Балтийское море» [494], «Оценка влияния загрязнения на состояние природных ресурсов Балтийского моря» [129], «Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря» [57], а также сборники работ по межведомственному проекту «Балтика» [61].

8. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗУЧЕННОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Среди морей России Балтийское море считается одним из наиболее изученных в отношении гидрохимического режима. Это связано не только с многолетней историей гидрохимических исследований, но и со становлением и развитием морской гидрохимии Балтийского моря. В истории гидрохимических исследований Балтийского моря можно выделить несколько этапов, различающихся как по объему выполненных наблюдений, так и по их качественному составу, точности определений, методам наблюдений и анализа.

Первые гидрохимические определения хлорности морской воды в Балтийском море относятся к середине XIX в., а в конце века были получены сведения о содержании растворенного кислорода, углекислого газа и азота [225]. Однако в этот период исследования носили в основном случайный характер.

Начало систематических гидрохимических исследований Балтийского моря относится к первому десятилетию XX в. [103, 225]. Основа для них была заложена еще в 1892 г., когда при проведении экспедиционных исследований Балтийского моря была установлена сеть постоянных разрезов [13]. В дальнейшем, с созданием в 1902 г. Международного совета по исследованию морей (МСИМ) и на основе его решения, ответственность за изучение Балтийского моря была возложена на Финляндию, Германию и Швецию и исследования стали носить планомерный характер [13]. Кроме того, были установлены стандартные разрезы, по которым гидролого-гидрохимические съемки моря должны были выполняться в определенное время года (февраль, май, август и ноябрь). Россия также принимала в этих работах участие, хотя вклад ее был небольшим. Так, в 1905—1908 гг. в Финском заливе с гидробиологическими целями под руководством Н. М. Книповича работала экспедиция Зоологического института Академии наук, а в 1908 г. в центральной части Балтийского моря, Финском и Рижском заливах под руководством А. А. Лебединцева работала русская Балтийская экспедиция. В ходе экспедиции был получен довольно обширный материал по содержанию растворенного кислорода, который позволил впервые дать характеристику кислородных условий в этих районах моря [42].

Прерванные первой мировой войной экспедиционные исследования гидрохимического режима Балтийского моря были возобновлены Финляндией в 1919 г. и до 1939 г. проводились ежегодно на стандартных гидрологических разрезах. Германия и Швеция начали свои исследования в 1922 г., Эстония и Латвия — в 1923 г., Польша — в 1928 г. [13, 19]. Гидрохимические наблюдения сначала (с 1908 г.) включали только определения хлора и растворенного кислорода, в последующие годы этот комплекс постепенно расширялся: с 1922 г. начали определять активную реакцию, с 1929 г. — щелочность, содержание фосфатов, нитритов, нитратов и аммония, а в 30-е годы — содержание кремния, магния и кальция. Наиболее характерные черты этого этапа экспедиционных исследований гидрохимического режима Балтийского моря — неполный охват наблюдениями всех его районов, проведение наблюдений лишь в летний период и за редким исключением в другие сезоны, очень ограниченный комплекс регулярно наблюдаемых гидрохимических параметров. Достаточно полный перечень экспедиций с начала XX в. по 50-е годы с указанием комплекса гидрохимических наблюдений, районов Балтийского моря, где они выполнялись, а также литературных источников с данными наблюдений приведен в работе [19].

Хотя данные, полученные до второй мировой войны, были весьма малочисленны, они послужили основой для выявления характерной динамики гидрохимических процессов в Балтийском море, пред-

положений о причинах различий в их пространственном распределении и взаимосвязи с гидрологическими условиями. В наибольшей степени это относится к распределению кислорода, рассмотренному для всего моря в целом в трудах А. А. Лебединцева [42] и Шульца [449], а для отдельных районов моря — в работах К. М. Дерюгина (восточная часть Финского залива и Невская губа) [25, 26], Буха (прибрежные воды Финского залива и Шхерное море) [170] и в ряде других [171, 498 и др.].

Основы исследований режима элементов карбонатной системы и углекислотного равновесия в морских водах были заложены в трудах Буха [169, 222], основанных на материалах исследований в Балтийском море в 1927—1938 гг. Режим элементов карбонатной системы и специфика газового режима глубинного слоя моря (возникиовение дефицита кислорода и накопление углекислоты в периоды стагнации) рассматривались в работах Гриппенберг [265, 266], Шульца [447], Виттинга [502]. Результаты обобщения данных по режиму фосфатов содержатся в работах Банзе [143], Буха [167, 168], Калле [310, 311, 361], Ваттенберга и Мейера [498, 499], Гесснера [254, 255], Гловинской [257] (в некоторых из этих работ рассматривается также распределение силикатов и соединений азота).

Труды этого периода явились фундаментом для дальнейших исследований гидрохимического режима Балтийского моря, хотя из-за существенных различий в методиках определений данные большинства гидрохимических наблюдений в этот период оказались несопоставимыми с более поздними. Научные публикации этого периода имеют в основном описательный характер и лишь в немногих работах содержатся результаты обобщения данных и выявление наиболее общих закономерностей гидрохимического режима моря, что естественно для начального этапа исследований.

Второй этап гидрохимических исследований в Балтийском море, начавшийся после окончания второй мировой войны, характеризуется повышением общего уровня экспедиционных наблюдений и углублением познания гидролого-гидрохимического режима моря. В 1948 г. Данией и Швецией были возобновлены наблюдения за содержанием кислорода и фосфатов в Датских проливах, с 1950 г. к этим работам присоединилась Германия. В 1954 г Финляндией было возобновлено регулярное проведение широкого комплекса гидрохимических определений (кислород, pH, щелочность, силикаты, кальций, магний, а позднее и нитриты, нитраты, аммоний) в Финском и Ботническом заливах и Центральной Балтике. В начале 50-х годов начала проводить сезонные гидрохимические наблюдения (кислород, фосфаты) Польша, район исследований ограничивался южной частью Балтийского моря и Гданьским заливом.

С начала 50-х годов к странам, регулярно проводившим исследование гидрохимического режима Балтийского моря, присоединяется и СССР. В первые годы в программу гидрохимических наблюдений входит кислород, затем были включены определения pH и щелочности, а с 1957 г. и определения содержания биогенных элементов (фосфаты, силикаты, нитриты). Наблюдения проводились экспедициями ЛО ГОИНа на постоянной сети станций в Финском заливе, северной и центральной частях моря, а иногда в южной. В конце 50-х годов систематические экспедиционные исследования гидрохимического режима Балтийского моря начали осуществлять научно-исследовательские учреждения рыбопромыслового профиля — БалтНИРО (с 1963 г. АтлантНИРО) и БалтНИИРХ.

Особенно широкое развитие гидрохимические исследования в Балтийском море получили в связи с работами по программе Международного геофизического года (1957—1958 гг.) и Международным геофизическим сотрудничеством (1959 г.). В 1959 и 1960 гг. были впервые проведены зимние наблюдения за распределением гидрохимических элементов. Кроме того, с 1957 г. была принята единая схема стандартных разрезов и станций в Балтийском море с включением области западнее о. Готланд (ранее здесь проводились лишь эпизодические наблюдения), по которой должны проводиться регулярные (сезонные) гидролого-гидрохимические съемки в установленные синоптические сроки [13].

Наряду с исследованиями в открытой части моря Гидрометслужбой СССР в эти же годы были начаты регулярные сезонные (3 раза в год, за исключением зимы) наблюдения на постоянной сети станций в прибрежной зоне моря и заливах. В восточной части Финского залива и Невской губе экспедиционные исследования проводились силами Ленинградской ГМО, в западной части Финского залива — силами Таллиннской ГМО, в Рижском заливе — Рижской ГМО, а в Куршском и Вислинском заливах — Клайпедской ГМО. Комплекс гидрохимических наблюдений включал определения содержания кислорода, pH, щелочности, фосфатов, нитритов, силикатов, окисляемости, $БПК_5$, а иногда и содержания общего фосфора, аммония и нитратов.

Таким образом, в результате координации экспедиционных исследований всех прибалтийских государств в течение второго этапа гидрохимические исследования Балтийского моря были расширены и приобрели качественно новые черты. Основной недостаток исследований этого периода — ограниченный комплекс гидрохимических определений, выполняемый на научно-исследовательских судах, так как большинство трудоемких анализов осуществлялось в стационарных условиях на берегу, что приводило к значительным погрешностям в полученных результатах. Кроме того, ряд методик, в частности для определения содержания нитратов, аммония, органического фосфора, оказались недостаточно эффективными для анализа этих соединений в морской воде, а результаты этих определений — несопоставимыми с современными данными.

Исследования 1947—1960 гг. послужили основой для комплексных обобщений по гидрохимическому режиму Балтийского моря и его заливов, проведенных по Куршскому заливу Юревичусом [106], по Рижскому заливу — Ауниньшем [12], по Вислинскому заливу — Жмудзиньским и Шарейко [516], по Центральной Балтике — Калейсом [35]. Начатые в этот период регулярные сезонные гидрохимические наблюдения позволили получить характеристику сезонной изменчивости биогенных элементов. Так, в работах А. Е. Антонова и Н. Б. Власенко [9], О. Г. Рябикова [70], Е. Н. Черновской [98], Гловинской [20], Ауниньша [12] был рассмотрен режим фосфатов, а в работах М. В. Федосова и Г. Н. Зайцева [91, 92], кроме характе-

ристики режима, впервые был представлен баланс фосфора в Балтийском море.

Крупнейшей работой, посвященной обобщению гидрохимических наблюдений в Балтийском море, выполненных в период 1908—1956 гг., а также исследований ЛО ГОИНа в 1957—1962 гг., является монография «Гидрохимический режим Балтийского моря» [19]. В этой работе рассмотрены практически все вопросы, отражающие общие закономерности и особенности гидрохимического режима отдельных элементов: от общей гидрохимической характеристики и режимообразующих факторов до описания пространственной и временно́й (сезонной) изменчивости гидрохимических параметров в различных слоях моря. Монография [19] не утратила своего значения и в настоящее время не только как ценное научное пособие, но и как источник фактического материала по гидрохимическим условиям в Балтийском море в 50-х годах.

Третий этап в истории гидрохимических исследований начался в 60-е годы и наиболее характерной его чертой является расширение и укрепление международного сотрудничества на Балтийском море. Другой, не менее важной чертой этого этапа исследований является расширение комплекса наблюдаемых гидрохимических элементов, применение современных химико-аналитических методов наблюдений и анализа, проводимых на борту судна, и как следствие повышение достоверности натурных данных. Так, например, шведскими исследователями систематические наблюдения за фосфатами на борту судна проводились сначала на нескольких опорных станциях, к 1965 г. — на всей сети станций, а к 1969 г. программа наблюдений на борту судна расширилась и включала полный комплекс гидрохимических элементов: кислород, pH, щелочность, фосфаты, общий фосфор, аммоний, нитриты, нитраты, общий азот, кремний, сероводород [359]. По аналогичной программе с 1962 г. работают и финские исследователи [415]. На советских судах комплекс гидрохимических наблюдений был уже и большинство анализов выполнялось в стационарных условиях.

Наибольшим достижением этого периода в области международного сотрудничества следует считать осуществление в 1969—1970 гг. программы Международного года Балтики (МГБ). В отличие от всех предыдущих исследований, основной задачей этой программы было получение гидрохимических данных и, в особенности, данных, являющихся наиболее важными для понимания биологической продуктивности в Балтийском море. Программа наблюдений предусматривала проведение гидролого-гидрохимических съемок на 37 международных станциях дважды в месяц, а в Готландской впадине выполнение 5-суточных наблюдений за температурой, соленостью, содержанием кислорода и фосфатов.

Активизация экспедиционных исследований Балтийского моря в 60-е годы привела к большому числу публикаций, в которых наряду с описанием гидрохимических условий рассматриваются их взаимосвязи с гидрологическими процессами и факторами, определяющими их изменчивость. Так, в работах [10, 11, 55, 86] делается попытка установления связи режима биогенных элементов в верхнем слое моря с колебаниями температуры воды и речного стока. Двухлетнюю цикличность, обнаруженную в колебаниях содержания кислорода в глубинном слое Южной Балтики, В. И. Сухорук и Ю. Д. Ноздрик пытались связать с аналогичным циклом перемещения исландского минимума атмосферного давления [86].

В работах А. Е. Антонова [3—6] на основе анализа многолетнего ряда данных было показано наличие количественной взаимосвязи между гидрохимическими показателями режима (кислород, фосфаты) в глубоководных районах Балтийского моря и адвекцией каттегатских вод, оцениваемой глубиной залегания изогалины 10‰, и предложены прогностические соотношения для использования в рыбопромысловой деятельности. В дальнейшем А. Е. Антонов, включив гораздо большее количество факторов, значительно расширил набор эмпирических соотношений и улучшил их обеспеченность [8].

В работе [35] Калейс, исследуя многолетнюю динамику температуры, солености, содержания кислорода, показал, что глубинный слой моря разделяется на деятельный (активный) и придонный слои. Для каждого из этих слоев были предложены прогностические соотношения между динамикой рассматриваемых элементов и притоком вод через прол. Каттегат, а также выявлена характерная для активного глубинного слоя внутригодовая изменчивость элементов.

В эти же годы появились первые данные о мелкомасштабной временно́й изменчивости гидрохимических элементов, связанной с «пятнистой» структурой их распределения [256]. Исследования распределения концентраций растворенного органического вещества и взвешенных форм азота и фосфора в придонном слое моря подтвердили эти выводы [212].

Появление кондуктометрического метода определения солености морской воды стимулировало широкие и планомерные исследования макросостава вод Балтийского моря. В результате этих исследований, выполненных в 1966—1968 гг. Кремлингом [325—327], были получены хлорные коэффициенты для основных ионов и выявлены их отличия от океанических. В ряде работ [258, 333] исследовалось соотношение между хлорностью и электрической проводимостью для вод открытой части моря и прибрежной зоны. Было обнаружено, что ввиду специфического соотношения ионов в Балтийском море различия в значениях солености, рассчитанной по хлорности и измеренной кондуктометрически, достигают 0,1‰ [258, 333].

С самого начала гидрохимических исследований Балтийского моря объектом пристального внимания ученых являлись глубоководные впадины, режим которых наиболее полно и ярко отражает закономерности процессов, протекающих в глубинном слое моря. Среди работ этого направления следует выделить исследования Фонселиуса [221, 224—226], который дал объяснение сущности гидрохимических процессов, происходящих как в периоды стагнации глубинных вод, так и в периоды их обновления за счет мощных вторжений североморских вод через Датские проливы. Наиболее подробно в этих работах [221, 224—226] был рассмотрен режим кислорода, фосфора, pH и кремния, причем для содержания фосфора и органического вещества составлены предварительные балансы. Кроме того, впервые для Балтики было предложено объ-

яснение механизма физико-химических процессов, ответственных за резкое возрастание содержания фосфора в период существования анаэробных (сероводородных) условий в глубинных слоях моря.

Обобщив исторический массив гидрологических и гидрохимических данных, Фонселиус показал, что в Балтийском море происходит ухудшение кислородных условий в глубинном слое моря, возрастание содержания фосфатов в верхнем слое и общее повышение солености по сравнению с началом века. В своих работах Фонселиус вскрыл комплекс естественных факторов, определяющих, по его мнению, эти процессы, и поднял вопрос о существенном вкладе антропогенного воздействия в связи с возрастанием бытовых, промышленных и сельскохозяйственных сбросов в бассейн Балтийского моря [226, 243].

Постановка Фонселиусом вопроса о существе и причинах многолетней изменчивости гидрохимических условий в Балтийском море, тенденции их изменения и соотношения естественных и антропогенных факторов, определяющих эти изменения, можно считать одним из важнейших итогов этого этапа истории развития гидрохимических исследований. Проблема оценки антропогенного влияния на морскую среду стала главной для последующих десятилетий и актуальность ее особенно возросла в результате изучения загрязнения Балтийского моря [243].

Четвертый этап в истории гидрохимических исследований Балтийского моря начался в 70-е годы и его по праву можно назвать периодом становления комплексного изучения состояния морской среды Балтики в рамках международных проектов. В 1970 г. Рабочей группой МСИМ по изучению загрязнения Балтийского моря были сформулированы основные проблемы, связанные с отрицательным воздействием антропогенных факторов на состояние морской среды как источника природных ресурсов [201], а в 1973 г. была предложена программа исследований, в которой Балтика рассматривалась как единый экологический объект [148].

Характерной чертой этого этапа исследований Балтийского моря является осуществление работ по международным проектам [247] и регулярное проведение совместных симпозиумов по изучению загрязнения моря [473, 474 и др.].

Еще больший размах приняло сотрудничество стран Балтийского региона в осуществлении международных проектов после заключения Хельсинкской конвенции в 1974 г.

Наиболее крупный из этих проектов — BOSEX-77 (Baltic Open Sea Experiment) был осуществлен в сентябре 1977 г. Результаты, полученные в ходе этого эксперимента, существенно расширили представление о мелкомасштабной изменчивости комплекса физических, химических и биологических процессов, их динамике и кинетике в открытой Балтике [409].

С активизацией экспедиционных исследований в 70-е годы связан и информационный «взрыв» в области гидрохимии и загрязнения вод Балтийского моря [57, 129, 247, 473, 474 и др.]. Центральной проблемой во всех этих работах наряду с систематизацией представлений о гидрохимическом режиме Балтийского моря является изучение факторов, ответственных за изменение гидрохимических условий моря по сравнению с их состоянием в начале века. Конкретно она заключается в решении вопроса, является ли активизация человеческой деятельности, вызванная научно-технической революцией, определяющей причиной ухудшения кислородного режима или это связано с фазой естественного состояния, переживаемого Балтикой в настоящее время. Впервые данная постановка проблемы была сформулирована Фонселиусом [222] и развита в последующих его работах [227, 228, 230, 243], в которых приоритет отдавался естественным факторам. В ходе последующей дискуссии (продолжающейся до сих пор) мнения балтийских океанографов по этому вопросу разделились. Так, точку зрения Фонселиуса разделяли Калейс [309], Л. Е. Антонов [7], Грассхофф [258] и др. Исследования окислительно-восстановительных условий Балтийского моря в прошлом с помощью анализа колонок грунта [272, 395] показали, что в истории развития Балтики существовали периоды ухудшения кислородных условий, аналогичные современным.

К выводу об определяющей роли антропогенного влияния приходит другая группа авторов: Маттеус [344], Кулленберг [331, 332], Шаффер [467, 468] и др. [248].

В непосредственной связи с проблемой изучения кислородных условий находятся исследования режима биогенных элементов [236—241] и в первую очередь фосфатов. Установленное Фонселиусом еще к началу 70-х годов возрастание содержания фосфатов [222, 230—233] подтвердилось и данными других исследователей, например Перттила [415], Неринга [375] и Юрковского [117], и рассматривалось как главная причина ухудшения кислородных условий в связи с эвтрофикацией моря.

Проблемы эвтрофикации Балтики и ее причины (естественные или антропогенные) занимают важное место в исследованиях четвертого этапа и центральное — на современном этапе. Работы Королеффа [318], Фонселиуса [222], Грассхоффа [258], Юрковского [107—110], лабораторные эксперименты и наблюдения *in situ* [362, 396, 475] позволили установить механизм аккумуляции фосфатов в донных отложениях и выделения их в водную среду при анаэробных условиях и сделали его общепринятым. А предположение об определяющем влиянии переносов фосфатов в верхний слой из глубинного, где происходит их аккумуляция [222], было подтверждено оценками «удобряющего» эффекта выноса фосфора при вторжении североморских вод [453], результатами математического моделирования [299, 471] и связью между наблюдаемыми тенденциями роста содержания фосфатов и повышения солености в поверхностном слое [10, 415].

В связи с вопросом о причинах увеличения содержания фосфора в верхнем слое моря и необходимости определения величины антропогенного вклада возрос интерес к оценке его поступления из различных источников и общего баланса. В первых работах, посвященных этому вопросу, баланс фосфора составлялся по ориентировочным данным и с неполным учетом приходных и расходных статей [91, 222, 493]. В дальнейшем, благодаря наблюдениям за общим фосфором и с более полным охватом всех составляющих [44, 45, 115, 283, 464, 482, 493], эти оценки были существенно уточнены. В работах Максимовой [44, 45] были впервые

опубликованы данные по биогенному стоку советских рек, а выполненная оценка ежегодного поступления фосфора из различных источников дала основание считать вклад данного фактора не меньшим, чем вынос из донных отложений [45].

В конце 60-х—начале 70-х годов начались регулярные наблюдения в Балтийском море над режимом соединений азотного цикла. Один из первых исследователей динамики азотных форм в Балтийском море и процессов, происходящих в анаэробных условиях, Сен-Гупта [459—461, 463, 465] придавал азоту большее значение, считая его, а не фосфор (в отличие от взглядов Фонселиуса [222, 227]) основным фактором, лимитирующим первичную продукцию [465]. Основные процессы, регулирующие азотный цикл в глубинных водах Балтийского моря, были известны и описаны к началу 70-х годов в работах [222, 450, 463]. Более детально соотношение азотных соединений в окислительных и восстановительных условиях [248, 370, 371, 388], а также пространственное распределение аммонийного азота в качестве показателя загрязнения вод моря [388] было исследовано Нерингом, Гундерсеном и Реннером, которые существенно уточнили механизм денитрификации в анаэробных условиях [61, 158]. Сезонная динамика азотных соединений была достаточно хорошо описана в работах Грассхоффа [260] и Гундерсена [61, 198]. Большое значение для изучения азотного цикла в Балтийском море имеют работы финских ученых, которые определили роль азотных соединений в продуцировании фитопланктона [391, 483] и азотфиксации сине-зелеными водорослями [397].

Начатые в этот период определения общего азота дали возможность получить оценки содержания и динамики органического азота в море [27, 343, 463, 464], его вертикального и пространственного распределений [61, 385]. А достижения аналитической химии позволили получить сведения по содержанию и динамике отдельных экологически важных органических соединений азота — гидроксиламина [463] и мочевины [322, 324].

В конце 70-х годов Нерингом [61, 373] и Перттилой [415] была выявлена тенденция возрастания содержания нитратов в верхнем слое моря за период 1968—1978 гг., которую связывают с адвекцией североморских вод, богатых нитратами.

Режим кремния как элемента, не связанного с антропогенными источниками поступления в море, менее изучен. Динамика силикатов в глубинном слое рассматривалась Фонселиусом [222] еще в конце 60-х годов. Сезонной динамике и пространственному распределению силикатов посвящены обзорные издания [61, 129, 494].

Пятый (современный) этап гидрохимических исследований Балтийского моря начался в 80-е годы. Это этап международного мониторинга Балтийского моря. В одной из статей Хельсинкской Конвенции по защите морской среды района Балтийского моря (1974 г.) констатировались намерения всех стран — ее участников объединить деятельность в области научных исследований, обмена информацией, направленной на достижение целей Конвенции, поддерживать или разрабатывать программы, целью которых являются пути и средства оценки причин и степени загрязнения; объединять усилия в разработке сравнимых методов наблюдений и дополнительных или совместных программ мониторинга. К этому времени на Балтике всеми прибалтийскими странами в рамках национальных программ проводились систематические (главным образом ежесезонно) гидрохимические наблюдения на большой сети станций и международных разрезов.

Однако не все материалы наблюдений передавались в МСИМ, а обмен многими из них, особенно гидрохимическими данными по загрязнению, был ограничен. Кроме того, использование различных методик и техники химического анализа проб воды создавало значительные трудности при сравнении результатов гидрохимических наблюдений, нередко вполне обоснованные, и научные обобщения осуществлялись преимущественно на базе собственных ограниченных массивов данных. Следует отметить также, что координация научных исследований в рамках двух- и трехсторонних международных проектов и соглашений была недостаточной как для исследования возникших проблем состояния моря, так и для более эффективного использования базы экспедиционного флота на Балтийском море и получаемой информации.

Накопленный исторический опыт океанографических исследований Балтийского моря, а также положительные результаты работ по программе МГБ (1969—1970 гг.), заложивших основу всех последующих национальных и международных программ [246], послужили основой для разработки Программы международного мониторинга Балтийского моря (ВМР).

Цель данной программы — изучение многолетних тенденций изменения состояния морской среды (воды, грунтов, биоты) под воздействием антропогенных факторов посредством планомерных, систематических и учащенных наблюдений, осуществляемых по унифицированным методикам в определенных участках открытой части моря и заливов [268]. Многолетняя Программа международного мониторинга Балтийского моря осуществлялась поэтапно: первый этап — в 1979—1983 гг., второй этап — в 1984—1988 гг., третий этап — в 1989—1993 гг. По программе мониторинга была определена постоянная сеть станций наблюдений; при этом были выделены станции гидрологических и базовых гидрохимических наблюдений, станции для отбора проб биоты (для отдельных ее видов), участки сбора образцов биоты для анализа содержания в них вредных веществ. Кроме того, из числа станций в открытой части моря и в заливах были выбраны репрезентативные станции для исследования многолетних тенденций изменения гидрохимических условий: на первом и втором этапах мониторинга — 6 станций, а на третьем — 10 станций [138]. Для каждого вида наблюдений была установлена необходимая минимальная частота и рекомендуемые сроки наблюдений, обязательный и желательный перечень показателей и прошедшие международную калибрацию методы их определения. Предварительно перед началом осуществления программы мониторинга была проведена аттестация гидрохимических определений: в 1977 г. в Киле [133], в 1986 г. при проведении эксперимента PEX (Pathiness Experiment), а в 1990 г. интеркалибрация для биогенных элементов организована МСИМ. Программой международного мониторинга Балтийского моря были установлены и страны, ответственные за ее выполнение: в открытой части моря —

Финляндия, Германия, Польша, Швеция и СССР, в Финском заливе — Финляндия и СССР.

Состояние Балтийского моря по данным с начала века до 1980 г., который был выбран базовой точкой отсчета, было всесторонне проанализировано группой экспертов и представлено в виде «Оценки влияния загрязнения на состояние природных ресурсов Балтийского моря» [129]. Главными изменениями в состоянии моря были признаны ухудшение кислородных условий в глубинных водах и влияние загрязнения хлорированными углеводородами на биоту. При этом отмечено, что причиной ухудшения кислородных условий могут быть как естественные, так и антропогенные факторы, либо их влияние совместно, но соотношение пока не установлено. Кроме того, в прибрежной зоне Балтийского моря констатируются изменения, вызванные антропогенным поступлением азота и фосфора, а в открытой части моря отмечено увеличение содержания фосфора.

По результатам исследований первого этапа мониторинга группой экспертов из всех прибалтийских стран была подготовлена «Первая периодическая оценка состояния морской среды Балтийского моря» [135, 136], в которую входили общие заключения [135] и авторские научные материалы, на основе которых они были подготовлены [136]. Следует отметить, что в своих научных материалах [136] эксперты, будучи свободными в анализе и выводах от необходимости следовать какой-либо концепции, несут личную ответственность за них, в то время как принятые Хельсинкской комиссией общие заключения [135] приобретают статус официального мнения.

Научные материалы [136] содержат обобщения по состоянию гидрологических условий Балтийского моря, в которые были включены и оценки кислородных условий в многолетнем плане. Раздел по биогенным элементам включал краткий обзор результатов новых исследований, касающихся азотного цикла и балансов азота и фосфора, и данные по многолетним трендам содержания фосфатов и нитратов практически во всех районах Балтийского моря.

В общих заключениях по первому этапу мониторинга [135] в качестве главного негативного изменения состояния морской среды Балтийского моря названо увеличение концентраций биогенных элементов, ускоряющее истощение запасов кислорода и распространение сероводорода в глубоководных районах моря. Кроме этого, отмечается исключительно обильное цветение сине-зеленых водорослей в проливах Каттегат, Большой и Малый Бельт, приводящее к исчерпыванию запасов кислорода у дна, и гибель донной фауны на больших участках.

Статистически значимое возрастание содержания азота и фосфора установлено для всех районов Балтийского моря. При этом, если в верхнем слое открытой части моря корреляция этих эффектов с повышением солености свидетельствует о частичном влиянии переноса биогенов из глубинных вод к поверхности, то в Финском и Ботническом заливах, проливах Каттегат, Большой и Малый Бельт такой взаимосвязи не наблюдается и повышение содержания биогенов вызвано исключительно антропогенным влиянием. Однако существенных изменений в пелагических сообществах открытой Балтики (северная и центральная части моря), а также в Финском и Ботническом заливах не было обнаружено.

В соответствии с данными заключениями было рекомендовано в дальнейшем продолжать принимать все неотложные меры по уменьшению биогенной нагрузки и эвтрофикации моря и считать исследования, связанные с этой проблемой, приоритетными. В их перечне — многолетние тенденции и балансы биогенов, обмен биогенами в различных пограничных системах (поверхность моря—атмосфера, грунты—организмы, перенос через галоклин, приток с реками и сток с суши), передача биогенов по различным звеньям пищевой цепи, мелко- и мезомасштабная неоднородность в распределении биогенов по пространству и во времени («пятнистость»).

Состав гидрохимических элементов, рассматриваемых во «Второй периодической оценке состояния морской среды Балтийского моря» [141, 142] существенно расширен: кроме кислорода, азота и фосфора, рассмотрены pH, щелочность, кремний. Для кислородных условий, pH и щелочности в различных районах Балтийского моря по данным наблюдений за 1965—1988 гг. приведены линейные тренды и дано обобщение по их изменчивости. Раздел по биогенным элементам также расширен за счет включения в него суммарного содержания минеральных соединений азота, общего фосфора, силикатов [142].

Согласно общим заключениям Хельсинкской комиссии [141], второй этап мониторинга (1984—1988 гг.) характеризуется менее заметными изменениями состояния экосистемы Балтийского моря по сравнению с первым этапом: за исключением снизившейся солености особых изменений не отмечено. Концентрации биогенных элементов сохранились высокими, но не возросли (за исключением прол. Каттегат и Рижского залива), что однако не означает прекращения их поступления за счет антропогенных факторов, а указывает на важную роль гидрологических условий. Установившийся уровень концентраций фосфатов и нитратов был достаточно высоким для увеличения биологической продукции и влияния этого фактора на ухудшение кислородных условий в глубинных водах, которое продолжалось в течение 13 лет из-за отсутствия мощных вторжений североморских вод. Кроме того, была отмечена тенденция снижения содержания силикатов в верхнем слое Балтики.

Все оценки состояния морской среды, подготовленные по Программе международного мониторинга Балтийского моря [135, 136, 141, 142], касались открытой части моря, хотя совершенно очевидно, что отмечаемые эффекты тесно связаны с состоянием прибрежной зоны, являющейся приемником сточных вод, поступающих с материковым стоком. В связи с этим в 1989 г. Хельсинкская комиссия приняла решение о подготовке «Оценки состояния загрязнения прибрежных зон Балтийского моря» [139], которая должна содержать описание национальных программ мониторинга в прибрежных водах и результаты исследований состояния гидрологических и гидрохимических условий загрязнения вредными веществами и гидробиологические показатели. В рекомендациях Хельсинкской комиссии по проведению мониторинга прибрежных рек Балтики указано, что в качестве методической

основы следует использовать «Руководство для третьей стадии» [138].

Следует отметить, что решения комиссии, принятые в 1989—1990 гг., направлены также и на расширение сферы действия международного мониторинга Балтийского моря: проведение мониторинга атмосферного переноса загрязняющих веществ как источника их поступления в среду Балтийского моря [142] и мониторинга радиоактивных веществ [139].

К началу 80-х годов в исследовании Балтийского моря было задействовано большое число научных учреждений СССР. Для координации этих работ на основе предложений всех участников в ЛО ГОИНе была разработана национальная «Программа межведомственных комплексных исследований Балтийского моря как единого географического объекта на 1981—1999 гг.» (проект «Балтика»). Основными задачами этого проекта являются составление комплексной характеристики экосистемы Балтийского моря, разработка математических моделей как для отдельных районов моря, так и для экосистемы в целом и выработка рекомендаций по охране среды Балтийского моря. Конечная цель проекта сформулирована как разработка математической модели для управления антропогенным воздействием на состояние экосистем моря.

В рамках проекта «Балтика» с 1983 г. проводятся комплексные межведомственные экспедиции, в программу которых входят квазисинхронные гидролого-гидрохимические съемки Балтийского моря, работа на океанологических полигонах по специальным разделам исследований, длительные многосуточные станции с большим комплексом гидрологических, гидрохимических и гидробиологических наблюдений. Результаты исследований, выполненных в рамках проекта «Балтика», опубликованы в четырех выпусках монографии «Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря» [61].

Рассматривая круг проблем, связанных с исследованием гидрохимического режима Балтийского моря, нельзя не отметить успехи в математическом моделировании, используемом для исследования причин многолетних изменений гидрохимических условий: модели Стигебрандта и Вульфа [479], О. П. Савчука [78, 443], которые наиболее полно учитывают специфические для Балтийского моря процессы и факторы. Более подробно этот вопрос изложен в гл. 15.

В последние годы большой интерес исследователей вызывает изучение тонкой структуры вертикального распределения содержания гидрохимических элементов в пограничной зоне перехода от кислородных к сероводородным условиям в глубинном слое моря. Этим вопросам посвящены работы Ханзена [275], А. В. Николаева и О. П. Савчука [399], В. В. Сапожникова [80], в которых даны новые представления о возможных механизмах протекающих процессов, важных для циклов азота и фосфора.

Особую важность для изучения биогеохимических циклов биогенных элементов представляют начатые в конце 80-х годов исследования процессов на границе раздела вода—грунт. Новый взгляд на накопление фосфора в грунтах глубоководных районов моря дают работы Кармана, Джонсона и Вульфа [176, 305]. Количественные оценки обмена между грунтами и придонными водами при кислородных и сероводородных условиях приведены в работе [457]. Большой интерес вызывает также работа [210], в которой рассматривается обмен азотных форм на границе вода—грунт в прол. Каттегат.

Специфику современного этапа исследований отражают проблемы мониторинга как такового: влияние короткопериодной пространственной и временной изменчивости гидрологических и гидрохимических показателей на результаты анализа межгодовых колебаний [93, 274]. Природа процессов, создающих «шум» по отношению к трендам, и способы его устранения составили содержание ряда докладов на симпозиумах по мониторингу Балтийского моря [130, 150, 207, 260, 412]. Диапазон рекомендаций для проведения мониторинга оказался весьма широк и включает: выбор станций и времени наблюдений с учетом наименьших флюктуаций физических и химических показателей [130], уменьшение частоты наблюдений до сезонных по мнению одних [130] и увеличение по рекомендациям других [150, 246], осреднение проб воды [150, 260], учет дисперсии на основе корреляционных связей с температурой, колебания которой измеряются с помощью профилометра [274], учет дисперсии при статистическом анализе данных [149, 258, 412].

Заканчивая обзор исследований по гидрохимическому режиму, необходимо отметить, что отсутствие справочных статистических характеристик динамики гидрохимических показателей, рассчитанных по многолетним массивам данных для различных временных диапазонов и набору станций, достаточному для получения представления о пространственном распределении, весьма затрудняет разработку математических моделей. Достаточно важная работа в этом направлении была проделана Вульфом, Рамом и Стигебрандтом [508], которые рассчитали ежемесячные характеристики содержания кислорода и биогенных элементов для одноградусных квадратов по двум пятилетним периодам: 1972—1976 и 1977—1981 гг. На основе полученных результатов авторы провели анализ сезонной многолетней и пространственной изменчивости биогенных элементов и рассчитали их общее содержание в различных районах моря с учетом объемов [505]. Однако целевой характер расчетов предопределил ограниченность использования результатов в качестве универсальных справочных данных.

Малое количество данных, неоднородность их распределения во времени (месяцы, годы) и пространстве (одноградусные квадраты), недостатки используемых статистических оценок и др. не позволяют выявить определенные пространственные и временные различия показателей, проявляющиеся в их распределении при съемках. В некоторой степени определенные выводы о характере и значимости различий показателей гидрохимического режима в отдельных районах Балтийского моря можно сделать на основании результатов исследований, приведенных в данной монографии.

9. ИНФОРМАЦИОННАЯ БАЗА ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ И МЕТОДЫ ЕЕ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В настоящее время наиболее полная информационная база гидрологических и гидрохимических данных по Балтийскому морю сформирована во ВНИИГМИ—МЦД [13, 94]. В ее состав входят массивы судовых наблюдений, полученные в экспедициях на научно-исследовательских судах прибалтийских стран (СССР, Швеции, Финляндии, Германии, Польши) за период с 1902 по 1988 г. Сеть станций в открытой части Балтийского моря, на которых в обязательном порядке проводились регулярные наблюдения этими странами, была определена МСИМ еще в начале века и в целом имела общую основу: в северной и центральной частях моря — финские станции (индекс F), в южной — шведские и немецкие станции (индексы S и D соответственно) (рис. 9.1). Хотя в последующие годы эта сеть станций развивалась, неоднократно видоизменялась, основа ее всегда оставалась постоянной, что обеспечило возможность получения наиболее длительных рядов гидрохимических наблюдений на отдельных станциях.

Следует отметить, что, в отличие от гидрологических, сопоставимость гидрохимических данных находится в тесной зависимости от химико-аналитических методов и техники их получения [84]. Так, например, по кислороду, имеющему наиболее длительный ряд наблюдений (с начала века), данные практически не утратили своей ценности и в настоящее время, в то время как данные по биогенным элементам, полученные в 30-х годах, несопоставимы с современными и утратили свое значение. Проблема сопоставимости гидрохимических данных в информационной базе ВНИИГМИ—МЦД является одной из центральных и в настоящей работе рассматривается не только исходя из выводов методических интеркалибраций, но и по результатам статистической обработки массивов данных, полученных различными методами [84].

9.1. Общая характеристика национальных систем гидрохимических наблюдений, входящих в информационную базу

Регулярные гидрохимические наблюдения, проводимые на научно-исследовательских судах СССР, Швеции, Германии, Финляндии и Польши, различаются не только количеством станций, но и объемом и составом элементов. Поэтому представляется весьма важным в настоящей монографии, исходя из опубликованных данных [172, 285, 286, 290, 291, 292, 359 и др.], дать краткую характеристику национальных систем наблюдений за состоянием морской среды Балтийского моря и получаемой гидрохимической информации.

Швеция. Систематические гидрохимические наблюдения осуществляются с 1959 г. и проводятся на 41 станции (рис. 9.2). Однако съемки на полной сети станций ведутся весьма редко, регулярные данные, опубликованные в работах [285, 359], имеются только для 23 станций. Частота наблюдений, как правило, составляет один раз в сезон. Начиная с 1964 г. комплекс гидрохимических наблюдений постоянно расширялся и в 1969 г. в него

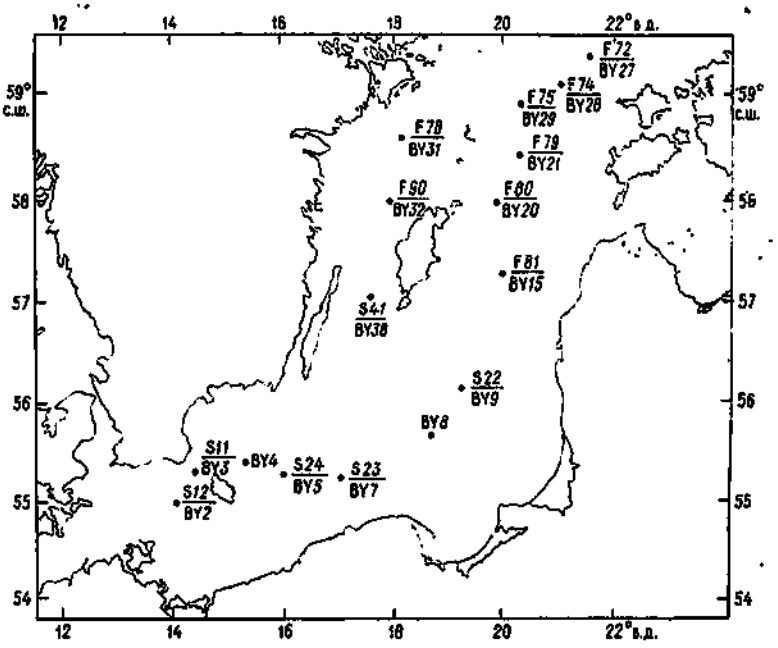


Рис. 9.1. Довоенная сеть станций наблюдений Финляндии (*F*) и Швеции (*S*) открытой части Балтийского моря.

входило 10 элементов (табл. 9.1). Однако наблюдения по полному комплексу элементов проводились всего на 16 станциях (см. рис. 9.2), в то время как на остальных станциях, наряду с температурой и соленостью, определялся только кислород и фосфаты. С 1978 г. азотный комплекс наблюдений содержит определения мочевины. Кроме того, в программу сезонных съемок были включены наблюдения за содержанием нефтепродуктов, содержание тяжелых металлов определяется эпизодически.

Финляндия. Регулярные гидрохимические наблюдения в Северной и Центральной Балтике осуществляются с 1954 г. До 1978 г. они проводились преимущественно в безледный период, но с 1978 г. выполняются и зимой. Сеть станций включает основные международные (см. рис. 9.1 и 9.2) и дополнительные станции национальной программы исследований. Программа наблюдений, за исключением щелочности, включает полный комплекс элементов (см. табл. 9.1). Из загрязняющих веществ в программу входят определения содержания нефтепродуктов и тяжелых металлов.

Германия (ГДР). Экспедиционные исследования в основном проводятся в Южной и Центральной Балтике, количество экспедиций достигает 10—12 в год. Сезонные съемки проводятся на сети международных станций (см. рис. 9.2), дополненной станциями национальной программы. Комплекс наблюдаемых гидрохимических элементов полный, за исключением кремния (см. табл. 9.1), а вместо щелочности проводятся определения растворенной углекислоты. Из загрязняющих веществ определялось содержание тяжелых металлов и нефтяных углеводородов.

Германия (ФРГ). Экспедиционные исследования ведутся главным образом в районе Датских

Таблица 9.1

Годы систематических наблюдений по гидрохимическим элементам, осуществляемых различными учреждениями или судами в открытой части Балтийского моря

Элемент	Госкомгидромет (СССР)	БалтНИИРХ, АтлантНИРО (СССР)	«Скагеррак», «Аргос» (Швеция)	«Аранда» (Финляндия)	«Профессор Альбрехт Пенк» (ГДР)
Кислород	1957 *	1958*	1957*	1954 *	1969 *
pH	1957 *	1960*	1965*	1954 *	1969
Щелочность	1958—1965, 1972	—	1965*	1954—1958	—
Фосфаты	1957—1959, 1962—1964, 1972 *	1958*	1964*	1967 *	1969
Общий фосфор	1976 *	1972*	1968*	1967 *	—
Нитраты	1976 *	—	1968*	1962 *	1969 *
Аммоний	1976 *	—	1966*	—	1969 *
Нитриты	1958—1959, 1962—1964, 1972 *		1969*	—	1969 *
Общий азот	1980 *		1969*	—	1969 *
Кремний	1958—1959, 1962—1964	1960*	1968*	1962 *	1969

* Продолжение наблюдений по настоящее время.

проливов, в южной и центральной частях Балтийского моря и основной их особенностью является работа по специальным программам. Характерная черта этих программ — направленность на исследование связи биологических параметров с распределением загрязняющих веществ (нефтяные углеводороды, радиоактивность, хлорорганические соединения, тяжелые металлы).

Польша. Регулярные гидрохимические наблюдения в основном проводятся в Южной Балтике на сети стандартных станций, в состав которых входят

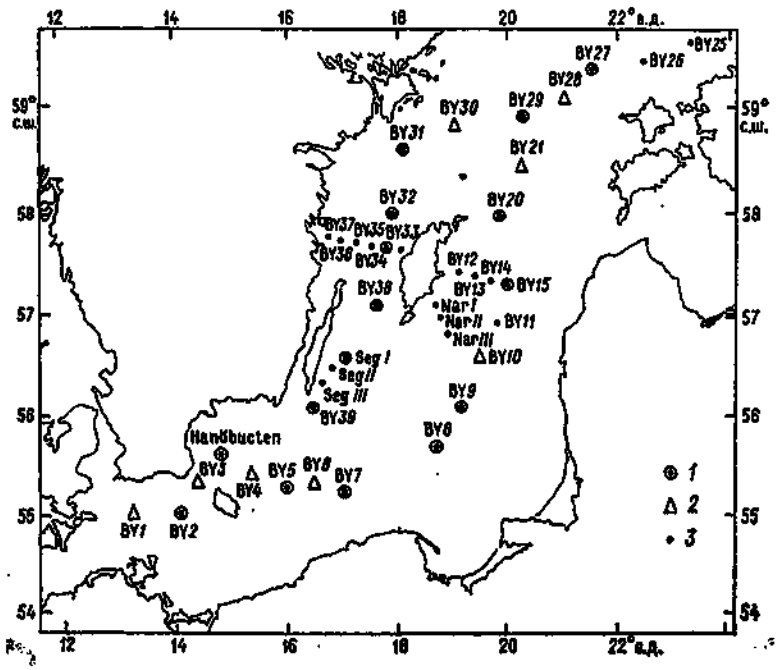


Рис. 9.2. Сеть станций наблюдений Швеции по полной (*1*) и сокращенной (*2*) гидрохимической программе и станции нерегулярных наблюдений (*3*).

международные станции BY2, BY3, BY5, BY7, BY8 (см. рис. 9.2). Количество сезонных съемок в году существенно изменялось от года к году: от 3 до 11 в 1979 и 1982 гг. соответственно. Комплекс наблюдений не полный — не проводятся определения аммонийного и общего азота и только с 1980 г. начаты наблюдения за щелочностью. Из загрязняющих веществ ведутся определения содержания нефтяных углеводородов, хлорорганических пестицидов и тяжелых металлов.

СССР. Систематические экспедиционные исследования в открытой части Балтийского моря велись несколькими ведомствами (Госкомгидрометом, Минрыбхозом, Академией наук и Министерством обороны). В зависимости от ведомственной принадлежности программы исследований сеть станций и состав гидрохимических наблюдений количественно и качественно существенно различаются. Так, по программе Госкомгидромета сеть станций неоднократно изменялась и к началу 70-х годов включала около 100 пунктов наблюдений. В последующие годы, с расширением комплекса гидрохимических определений, сеть станций стала сокращаться, а в 1977 г. в связи с введением программы «Общегосударственная сеть наблюдений и контроля» (ОГСНК) большая часть станций вошла в состав этой сети (рис. 9.3), основу которой также составила стандартная международная сеть станций. С 1978 г. в системе станций ОГСНК были выделены вековые станции и разрезы (продольный разрез по оси Балтийского моря и поперечный разрез о. Готланд—Вентспилс) с целью формирования длительных непрерывных рядов гидрологических и гидрохимических наблюдений, однако с 1986 г. гидрохимическая программа на вековых станциях была отменена. Согласно «Положению о вековых разрезах», помимо сезонных съемок, на них проводятся дополнительные наблюдения (июнь, сентябрь и октябрь) и общее их количество составляет не менее 6—7 съемок в год.

Программа полного комплекса гидрохимических наблюдений сформировалась только к 1976 г., определения общего азота начались с 1980 г., а определения щелочности в 1973 г. были исключены из состава наблюдений. С 1977 г. на сети станций ОГСНК были развернуты наблюдения за загрязняющими веществами — нефтяными углеводородами, тяжелыми металлами, фенолами, детергентами, а с 1987 г. эта программа была оптимизирована до сети станций ВМР, по горизонтам и составу наблюдений (рис. 9.4).

Следует отметить, что программа работ Госкомгидромета на Балтийском море имеет большой недостаток — в ней не учтена специфика режима моря и распространен стандартный для всех морей набор горизонтов наблюдений, что не позволяет получать данные о динамике гидролого-гидрохимических условий в глубинном слое Балтики с необходимой детализацией.

Наряду с учреждениями Госкомгидромета, длительные и систематические наблюдения в открытой части моря осуществляли АтлантНИРО и БалтНИИРХ. Работы велись ежесезонно на сети станций в сроки, принятые в системе Госкомгидромета. На некоторых станциях, например в Готландской впадине (BY15), наблюдения осуществлялись более часто — до 8—11 раз в год, однако в информационную базу ВНИИГМИ—МЦД передавались

данные только сезонных съемок. Достаточно широкий комплекс гидрохимических элементов определялся лишь на 6—9 станциях, расположенных в глубоководных впадинах Балтийского моря.

В 80-е—90-е годы гидрохимические исследования (главным образом комплекса биогенных элементов) в открытой части Балтийского моря проводит Институт океанологии им. П. П. Ширшова Академии наук СССР (ИО АН).

Таким образом, массив данных по открытой части Балтийского моря, сформированный во ВНИИГМИ—МЦД, включает советские и зарубежные данные, полученные по международному обмену и дополненные массивом МСИМ за 1973—1984 гг. Поскольку объединенный массив данных включает достаточно широкую сеть станций с разнородной обеспеченностью наблюдениями во времени и пространстве, в информационной базе ВНИИГМИ—МЦД выделяется специальный уровень инвертированных массивов («Рейс», «Квадрат», «Временные ряды»), которые в дальнейшем используются для исследования закономерностей формирования гидрохимического режима Балтийского моря в различных диапазонах изменчивости. Технология создания инвертированных массивов достаточно подробно описана в работах [13, 94].

Информационная база гидролого-гидрохимических данных по открытой части моря (по состоянию на 1988 г.) была представлена в виде 111 временных рядов, различающихся по длительности, объему данных, распределению по годам и месяцам, по составу элементов и горизонтам наблюдений. В массиве «Временные ряды» данные гидрохимических наблюдений сгруппированы по фиксированным станциям, что позволяет произвести отбор данных по принципу наибольшей однородности и сопоставимости материалов наблюдений (примеры такого отбора рассмотрены, в частности, в [105]).

Анализ содержательной структуры массива «Временные ряды» гидрохимических данных позволил выделить около 60 станций, имеющих многолетние ряды наблюдений (рис. 9.5). Из этого числа станций по принципу одинаковой или близкой к ней обеспеченности данными и их структуре в период 1960—1985 гг. были выделены несколько групп станций.

Первая группа станций характеризуется наибольшим объемом данных и наиболее обеспеченным распределением их внутри года:

— BY 2 (80), BY 5 (62), BY 7 (58a), BY 9 (46), BY 15 (37), BY 20 (31), BY 31 (71a), BY 32 (71), BY 38 (69) — международные станции, являющиеся основой национальной сети прибалтийских стран (в скобках указаны номера советской сети станций);

— BY 3 (79), BY 21 (30), BY 28 (27) — международные станции, для которых объем и распределение данных внутри года по температуре, солености, кислороду, фосфатам достаточно близки к характерным для вышеуказанных станций, но по остальным гидрохимическим элементам массивы менее представительны.

Вторая группа — станции, имеющие несколько меньший объем данных и неоднородное распределение в течение года, поскольку они являются либо международными, либо советскими:

— BY 8, BY 29, BY 27, BY 34, BY 39, Seg I, Hanöbuchten — международные станции, входящие в национальную сеть Швеции в качестве опорных (с полным комплексом гидрохимических элементов), для которых число наблюдений за темпера-

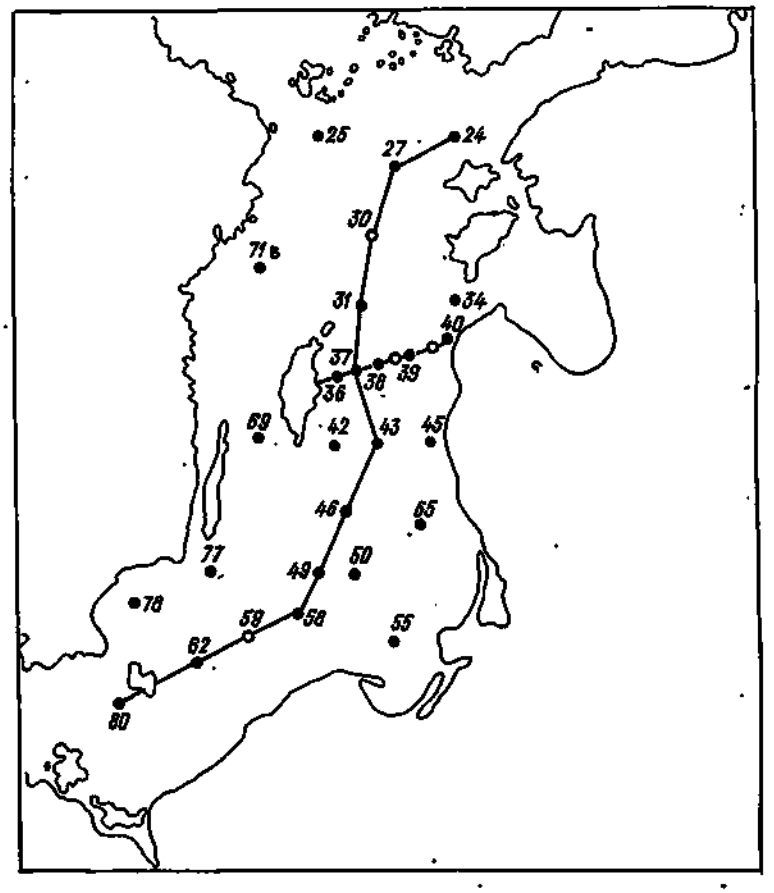


Рис. 9.3. Схема расположения станций ОГСНК и вековых разрезов.

Незачерненные кружки означают станции, на которых наблюдения в настоящее время прекращены.

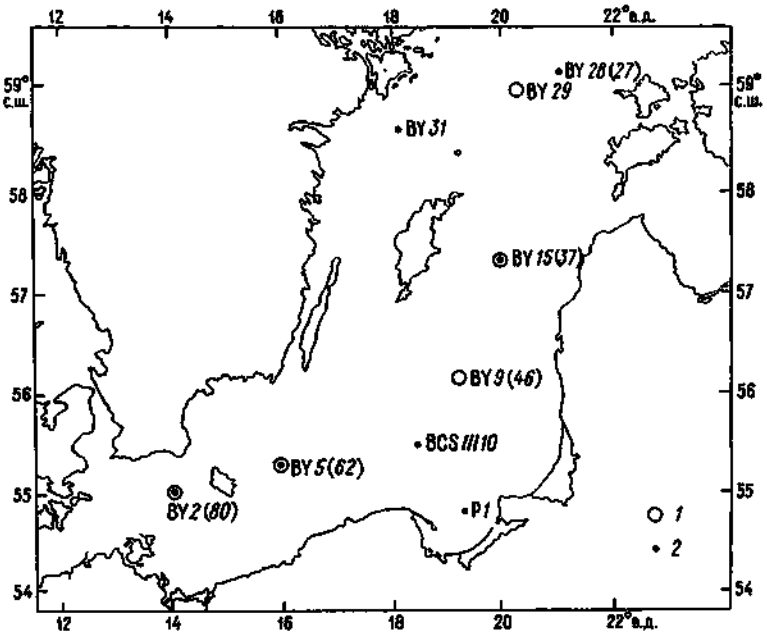


Рис. 9.4. Базовые станции справочного массива характеристик (*1*) и репрезентативные станции международного мониторинга (*2*).

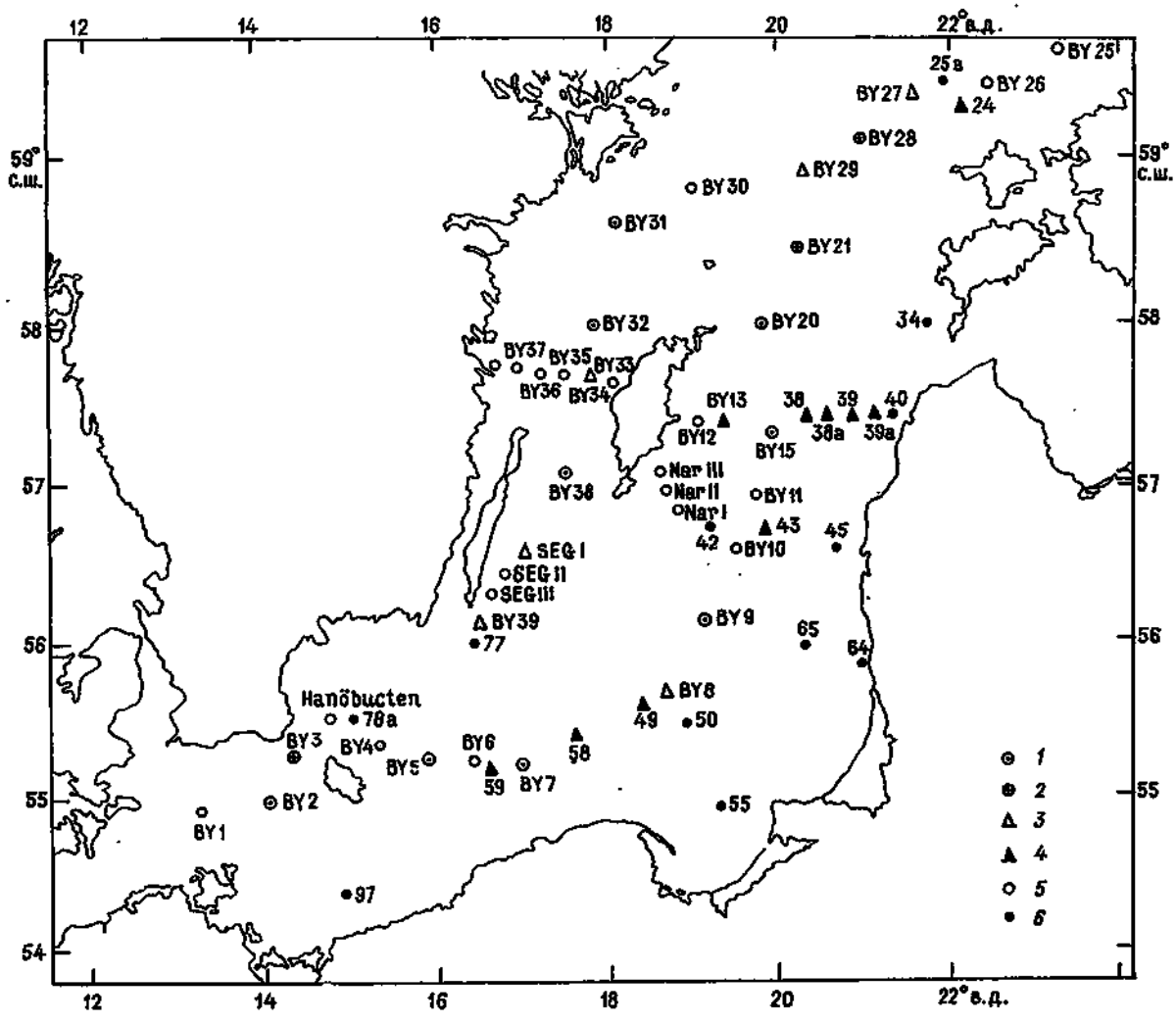


Рис. 9.5. Совмещенная сеть международных, шведских и советских станций.

Первая группа станций: *1* — международные станции, совпадающие с советскими, с полным комплексом наблюденных элементов в программе шведских наблюдений; *2* — с сокращенным комплексом; вторая группа станций: *3* — международные станции с полным комплексом гидрохимических наблюдений в шведской программе; *4* — советские станции учащенных наблюдений; третья группа станций: *5* — шведские станции с сокращенным комплексом гидрохимических наблюдений; *6* — советские станции ежесезонных наблюдений.

турой, соленостью и кислородом составляет 4—7 раз в год, по гидрохимическим элементам — не более 4;

— 58, 59, 49, 43, 24, 38, 38а, 39, 39а — советские станции вековых разрезов, на которых наблюдения проводились 4—7 раз в год и, в отличие от перечисленных выше станций, имеются более короткие ряды наблюдений по гидрохимическим элементам.

Третья группа — отечественные и зарубежные станции, наблюдения на которых проводятся не более 3—4 раз в год:

— BY 1, BY 4, BY 6, BY 10, BY 30 — шведские станции с сокращенным составом гидрохимических наблюдений;

— 25в, 34, 42, 45, 64, 65, 50, 55, 97, 1, 78а, 77 — отечественные станции сети ОГСНК с сезонным характером наблюдений.

9.2. Информационная база справочного массива

9.2.1. Характеристика базовых станций и критический анализ данных

Для характеристики гидрохимического режима Балтийского моря и расчета статистических параметров гидрохимических элементов из массива «Временные ряды» были выбраны 5 международных станций, наиболее обеспеченных данными и расположенных в южной, центральной, восточной и северной частях моря (табл. 9.2):

— BY 2 (80) (Арконская впадина) — наиболее глубокая станция в районе, прилегающем к Датским проливам, репрезентативная для входной зоны моря;

— BY 5 (62) (Борнхольмская впадина) — характеризует глубоководную зону южной части моря (Борнхольмская котловина);

— BY 9 (46) — расположена на южном склоне Готландской котловины и характеризует состояние вод в районах, как правило, не подвергающихся стагнации;

— BY 15 (37) (Готландская впадина) — характеризует самую глубокую восточную часть Готландской котловины, наиболее репрезентативная станция для оценки крупномасштабных многолетних изменений гидролого-гидрохимических условий Балтийского моря [508];

— BY 29 — расположена в северной глубоководной области моря и в зоне смешения вод, поступающих из Финского и Ботнического заливов.

Таблица 9.2

Координаты и глубина станций, составляющих информационную базу справочного массива

Название ряда	Зарубежные станции	Северная широта	Восточная долгота	Советские станции			Глубина станции, м
				номер	северная широта	восточная долгота	
BY 2(80)	BY 2(S12, W19a)	55° 00′	14° 00′	80	55° 00′	14° 05′	48
BY 5(62)	BY 5(S24)	55 15	15 59	62	55 10	15 57	91
BY 9(46)	BY 9 *	56 05	19 10	46	56 05	19 10	127
	9A(S22)	56 07	19 19	—	—	—	115
BY 15(37)	BY 15(F81)	57 20	20 03	37	57 22	19 57	249
BY 29	BY 29(F75, L19)	58 53	20 19	—	—	—	170

* В данных координатах станция выполнялась с 1969 г., до этого года наблюдения производились на ст. 9А.

Важнейшими условиями для корректного сравнения гидрохимических характеристик, полученных для различных районов, являются сопоставимость общего объема данных, периода наблюдений и характера их распределения во временны́х рядах. Эти условия в полной мере были обеспечены для 5 перечисленных станций.

Проверка полноты данных для выбранных базовых станций в информационной базе показала отсутствие наблюдений по некоторым гидрохимическим элементам — отсутствуют данные по кислороду в наблюдениях ГДР начиная с 1971 г. и данные шведских наблюдений за период 1960—1972 гг. Кроме этих данных, во временны́е ряды были включены материалы определений содержания фосфора на ст. BY 15 (37) (предоставлены А. К. Юрковским, БалтНИИРХ) и данные по гидрологическим элементам и кислороду на ст. BY 9 (46) (предоставлены М. В. Калейсом, БалтНИИРХ).

Анализ качества гидрохимических данных во временны́х рядах проводился методом экспертной оценки и заключался в рассмотрении соотношений между концентрациями (показателями) взаимосвязанных элементов, их соответствия закономерностям вертикального распределения, сезонным изменениям и характеру условий в глубинном слое. При этом принимались во внимание соответствующие данные по солености, температуре и всему комплексу гидрохимических элементов, а также данные «соседних» по времени наблюдений в рядах. Особое внимание было уделено соотношениям концентраций фосфатов и общего фосфора и в случаях значительных аномалий (превышение содержания минеральной формы фосфора по сравнению с общим) сомнительные данные исключались. При небольших аномалиях для сохранения данных в рядах общего фосфора последние заменялись на соответствующие значения для фосфатов. Данные по нитратам и аммонию анализировались и критически оценивались с точки зрения характерных соотношений между их концентрациями в аэробных и анаэробных условиях.

Следует отметить, что в информационную базу данных ВНИИГМИ—МЦД в массив «Временные ряды» вошли и многосуточные серии наблюдений, которые вследствие синоптической изменчивости показателей искажают статистические параметры климатических характеристик гидрохимических элементов. Для исключения этих искажений, исходя из длительности и дискретности наблюдений на многосуточных станциях, было признано целесообразным в случае 5-суточных и более коротких серий оставлять в массиве данных первое наблюдение с наиболее полным комплексом элементов. При длительности серии 5—10 сут в массиве данных оставляли два наблюдения — первое и последнее, а при 10—15-суточных сериях — первое, последнее и в середине серии. Такой способ замены многосерийных наблюдений для сохранения случайного характера данных был признан более корректным, чем замена каким-то наблюдением, наиболее представительным для многосуточной станции [59].

9.2.2. Характеристика временных рядов гидрохимических данных

Кислород. Объем данных по кислороду достаточно велик — на каждом горизонте имеется более 500 значений, что намного превышает количество данных по всем другим элементам (табл. 9.3). О распределении данных по кислороду во временны́х рядах, кроме ст. BY 29, можно получить представление из табл. 9.4. Для всех станций (за исключением ст. BY 29) регулярные сезонные наблюдения начаты в 1958—1959 гг. и первое десятилетие (1958—1967 гг.) отличается от последующего количеством данных и характером их внутригодового распределения. С 1968—1969 гг. возрастает общее количество данных (до 20—30 измерений в год) и наблюдениями охвачены практически все месяцы, причем преобладают случаи с 2—3 измерениями в

Таблица 9.3

Количество наблюдений во временны́х рядах для исследуемых станций

Элемент	BY 2	BY 5	BY 9	BY 15	BY 29
Кислород	584	627	532	589	143
pH	231	262	197	252	91
Щелочность	91	88	73	117	57
Фосфаты	272	308	246	396	83
Общий фосфор	154	174	95	299	64
Кремний	188	182	164	187	72
Нитриты	214	241	176	234	64
Нитраты	220	212	165	236	68
Аммоний *	93	86	82	115	57
Общий азот *	74	61	45	106	37

* Данные приведены по зарубежным наблюдениям.

Таблица 9.4

Распределение данных наблюдений за содержанием кислорода в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1947																										*											1
1952						+																															1
1953															*		*				***	**	*	*													9
1954																												*	*								2
1957														*			*																				2
1958																*	*	*			*	*	F							*	A						8
1959								*			A			*			*				AF		AF							A	*						10
1960				°				°											FF																		4
1961		A				°					A			°					F	F	A		°							°	A						10
1962		A				°				A					*°						F	°					F			A*°							11
1963	A					°								°						F		*	A°			K				A°							10
1964	A					°					A			°					F			AA	°							*	A	°					11
1965		A			°					A				+	F		A						°	A								°		A			10
1966														A°				F				°		A			F			°			A				8
1967				A	°	°							°		°	A			F					°							°				A		10
1968			°	A°		°	°				°		K	°K		AF	F		F					°	A		°	°		°	°	A		A°			22
1969	°	°	AA		°°	°	DD		P	P	A	A			°°	F	FFF		FF	P	P		I	°	°°	PP		K	KK	°	°°	A	A	D°	D°		41
1970	°	A°	AA	°	D	°		°	D	DD	K	K		D	°	AA	°F			F	D°	P°		°	AK	K	°		A		D°	°	P		°	°	38
1971		A	°	°	°	°			S	°°		A°	°		D°	°	F					D	AF°		°	I	°	DS		°		°	*°	A	°		30
1972	°		S		S	°	A			°D	I	°		D°*	A°	FF	AS	F	AFF			D	A	°	S					AS°		*	A	°	S		33
1973	°	A			°S	°			D°		°S		°		AD*	°		FAS			°		D	°S	A	A	°		°I		°*	D		°			30
1974			°	°	D	A°			D°		S			°	FF°		S				°		°	S		A	S		°		A°		S				22
1975		°	°	S		D*	S	A	°		°	S		*	FD°	A		A				FS	D	°	A	S	°			°			A			°	26
1976				*			A			D			AS	D	I		I						D	A*		S				D	D	*	A				16
1977				A	*			A		D				D		A*			A	I			DS	F	F°*					*	D		A	S			19
1978			A		D		°*		D*I	D	×	FF	S*	A		AF	A×				×		S	A				*×	S°	××	×××		A*				32
1979		A				*			*			S	*			A						D	F*	A	*				A*		A×						15
1980	S	AA	×						D*	S	×			DS*	A		P			×	F	DS*	F				*		*	AA	D×			×		S	27
1981		×			°	S	×	A		S	*		°	A*	F		°	S	°	F		**		F°	S×	I	°	I	S°	D° I	SI	A*		°			34
1982				D°	×*S	°	AS	*	D×			°×	*	ADS°			°	*		S	F°	S*I	**	°I		°	S	*	D	°	×	A	°				38
1983		S	AA	S	*		S			D	I		*I		×		A	*		S	*	×	*×	S	*		AF		S	*×	×	A					27
1984			A	S*			S		*	S		×	*×S	A	×			*	*			*	S			*	A				A*			S			21
1985				*									*			*				×		**			*×					×*							10
1986	*																																				1
Сумма за месяц	36			52			37			43			72			51			42			78			45			57			55			21			589

Примечание. Данные наблюдений получены судами СССР (* — «Океанограф», «Лев Титов»; × — «Рудольф Самойлович»; ° — «Мазирбе», «Звезда Балтики»; + — суда АтлантНИРО), Швеции (A — «Скагеррак», «Аргос», «Тетис»; S — суда береговой охраны), Финляндии (F — «Аранда»), ГДР (D — «Профессор Альбрехт Пенк», «Александр фон Гумбольдт»), ФРГ (K — «Алкор», «Антон Дорн»), Польши (P — «Биркут», «Гидромет» и др.) и судами, не работающими систематически на Балтике (I).

декаду. Для основных сезонных сроков многолетние ряды непрерывны и общее количество данных в сезонной выборке составляет 50—80 случаев. Для межсезонных интервалов временные ряды менее представительны по числу лет и содержат значительно меньше наблюдений (15—55). Наименее обеспечены данными январь и декабрь.

В целом количество и распределение во времени данных по кислороду позволяет получить не только набор сопоставимых сезонных характеристик, но и обеспечивает детальное исследование внутригодовой изменчивости благодаря наличию данных для переходных фаз годового цикла, сравнимых с сезонными выборками.

Для исследования межгодовой изменчивости содержания кислорода в глубинных водах существенное значение имеет обеспеченность данными каждого года. В этом отношении для всех станций начальный период наблюдений наименее представителен: количество наблюдений для объединенных рядов составляет от 10 до 20 в год, а с 1968 г. оно возрастает до 30 и более. Для ст. BY 29 количество наблюдений значительно меньше и лишь в период выполнения программы МГБ (1969—1970 гг.) достигало 15 измерений в год. В последующие годы (1971—1978) их частота составляла 7—8 измерений в год, в остальные — от 4 до 6. Таким образом, непрерывность временных рядов сезонных значений содержания кислорода позволяет провести достаточно надежное статистическое исследование межгодовой изменчивости кислородных условий в открытой части Балтийского моря.

Водородный показатель (pH). Количество данных по pH на каждом горизонте временно́го ряда базовых станций хотя и достаточно велико, но в 2 раза меньше, чем для кислорода, что обусловлено более поздним началом регулярных наблюдений. Распределение данных в рядах по pH представлено на примере ст. BY 15 в табл. 9.5.

Для всех временны́х рядов базовых станций до 1962—1963 гг. количество наблюдений не превышает 1—2 измерений в год. В этом отношении выделяется ст. BY 15, на которой преимущественно в весенне-летний период проводилось до 7 наблюдений в год. В последующие годы (1962—1977) данные по pH имеются для всех основных сезонных сроков, хотя общее их количество составляет 5—10 определений в год. Лишь с 1978 г., когда резко возросло общее количество наблюдений вследствие увеличения экспедиционного флота на Балтике, данные по pH имеются практически для всех месяцев, причем их количество на одном горизонте составляет 3—4 измерения в месяц, а в год достигает 20 и более.

Анализ многолетних рядов данных по отдельным месяцам показал, что для основных сезонных сроков временны́е ряды по pH практически непрерывны и общее их количество в сезонных выборках составляет около 40. Для остальных месяцев ряды данных не столь представительны в отношении продолжительности, однако общее количество данных достаточно велико и составляет 10—25 случаев в месяц (кроме декабря, когда оно менее 10).

Для ст. BY 29 общее количество данных существенно меньше и наблюдения приурочены преимущественно к сезонным срокам. Тем не менее многолетний ряд данных (1968—1984 гг.) позволяет получить сезонные характеристики pH для этой станции. Среди межсезонных месяцев в большей степени обеспечены данными летние (июнь, июль), но они относятся к периоду 1959—1967 гг. и могут быть использованы лишь для ориентировочных оценок сезонных изменений в этот период.

Таким образом, для всех базовых станций объем и распределение данных по pH в течение года обеспечивают получение сопоставимых характеристик для основных сезонных сроков и позволяют достаточно подробно исследовать годовой ход pH. Распределение наблюдений по годам позволяет оценить межгодовые изменения pH начиная с 1962—1963 гг., а для ст. BY 29 — с 1968 г.

Щелочность. Временны́е ряды по щелочности в информационном массиве практически полностью представлены шведскими наблюдениями, поэтому общее их количество — наименьшее по сравнению с остальными элементами и составляет около 60 измерений для ст. BY 29 и 70—115 измерений для остальных базовых станций (табл. 9.6). Эти данные распределены исключительно по сезонам и наиболее регулярны в 1965—1984 гг. Многолетние ряды данных по щелочности для основных сезонных сроков включают 10—15 значений за этот период. В отличие от других элементов, база данных по щелочности сопоставима и для объединенных рядов ст. BY 29.

Таким образом, временны́е ряды данных по щелочности позволяют получить сопоставимые (в том числе и пространственные) сезонные характеристики и оценки межгодовых изменений в период 1965—1984 гг.

Фосфаты. Количество данных по фосфатам значительно меньше, чем по кислороду, однако превышает характерное значение для остальных элементов и составляет 200—300 наблюдений. Это связано как с ранним началом наблюдений — с 1957 г. (на ст. BY 29 с 1965 г.), так и с регулярностью их проведения (исключение составляют 1957—1962 гг., когда регулярность наблюдений была недостаточной — наблюдения проводились преимущественно в весенне-летний период и количество измерений не превышало 5 в год).

Данные сезонных наблюдений за фосфатами в 1963—1978 гг. получены главным образом шведскими и финскими судами и для временны́х рядов станций BY 2 (80), BY 5 (62) и BY 9 (46) их количество составляет 5—10 измерений в год. Для ст. BY 15 (37) количество данных по фосфатам значительно больше (табл. 9.7). С 1978 г. общее количество наблюдений возрастает и на станциях мониторинга достигает 25 измерений в год (для ст. BY 15 — более 30 измерений), распределение данных по фосфатам в течение года изменяется: наблюдения проводятся до 3—4 раз в месяц и охватывают практически весь годовой цикл.

Анализ временны́х рядов данных наблюдений по фосфатам показал, что базовые станции имеют длительные выборки: для основных сезонных интервалов — до 35—45 значений (для ст. BY 15 (37) — до 50—60 значений) и для остальных месяцев — до 20—30 значений за многолетний период. Это позволяет получить статистические характеристики для исследования внутригодовой и межгодовой изменчивости фосфатов.

Для ст. BY 29 данные по фосфатам, как и по другим биогенным элементам, были получены лишь шведскими судами, что позволяет рассчитать

Таблица 9.5

Распределение данных наблюдений по водородному показателю (pH) в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1947																										*											1
1949														I																							1
1954														I														*									2
1955															I		I																				2
1956																						I															1
1957														*			*					I									I						4
1958																*	*	*			*	*	F							*							7
1959								*						*							F		I														4
1960																			F																		1
1961																			F	F										°							3
1962						°									*°						F	°					F			A							7
1963						°														F		F	A°							A°							7
1964	A					°													F			AA	°							*	A	°					9
1965		A			°					A				+	F		A						°	A								°		A			10
1966														A°				*				°		A									A				6
1967				A	°										°	A			F					°							°				A		8
1968				A		°								°		F	°		F						A					°		A					9
1969			A		°		D		P		A			°		F	FFF		FF	P	P					P				°		A	A	DD			20
1970		A	A	°		°			D	D	K	K				A	F			FF					A				A					I			15
1971		A										A					F						AF			I								A			7
1972							A							*	A	F		F	FF				A							A		*					10
1973					°										A*											A			I		*						6
1974						A									F							F				A					A						5
1975								A						*	F	A									A												5
1976				*			A						A											A*								*	A				7
1977					*			A								A*				I				F									A				7
1978							A		*		×	F	*	A			×				<			A				*×		××	×××		A*				18
1979		A				*			*				*			A							F*		P				*		A×						11
1980		A	×						*		×			*	A					×		*	F				*		*	A	×			×			14
1981		×					××	A		×	*			A*			I			F		*×		F	×	I		I		I		A					18
1982					**		A	*	×			×	*	A				*			F	*	**	I				*		**	×	A					19
1983			A		*						I		*I		×		A	*			*	×	×*		**		A			*	×	A					18
1984				*					*			×	×*	A	×			*	*			*				*	A				A						13
1985				*									*			*				×					***					×*							9
1986	*																																				1
Сумма за месяц		12			21			21			14			39			30			26			40			21			27			29			7		287

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

Таблица 9.6

Распределение данных наблюдений за щелочностью в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1956																						I															1
1957													*									I									I						3
1958																*						*	F							*							4
1959								*					*										I														3
1962						°									*°							°								*							5
1963						°																	°								°						3
1964																															*						1
1965					°					A			+				A						°	A							°			A			8
1966													A											A								A					3
1967																A																		A			2
1968				A												A									A							A					4
1969			A		°		D		P		A		°			F	F		P	P			I	°		P		D	D	°		A	A	DD			20
1970		A	A			°			D		K					A									A				A					I			9
1971		A										A											A			I							*	A			6
1972									A				*		A							*	A														5
1973		A			°										A											A											4
1974																										A					A						2
1975								A								A									A							A					4
1976							A											A						A								A					3
1977								A								A																A					3
1978			A								×			A				A						A								A					5
1979		A														A		A													A						4
1980		A													A															A							3
1981								A						A																							2
1982							A							A																			A				3
1983			A														A									A							A				4
1984														A												A					A						3
Сумма за месяц		9			7			10			5			15			11			2			18			9			9			16			6		117

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

Таблица 9.7

Распределение данных наблюдений за содержанием фосфатов в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Годы	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1957														*								I															2
1958																*						*								*							3
1959														*									I														2
1961						°								°									°							°							4
1962						°									°							°								°*							5
1963						°								°									A°							A°							6
1964	A					°					A			°								AA	°							*	A	°					10
1965		A			°					A				+			A						°	A								°		A			9
1966														A°								°		A						°			A				6
1967				A	°										°	A			F					°							°				A		8
1968				A		°										A	F		F					°	A					°		A					9
1969			AA		°°°	°	DD		P	A	A	I		°°I	°°	F	FF		FF	PP	P		I			PP		D°	DD	°	°°	A	A	DD	D		40
1970		A	AA		°	°			D	D	K	K		D	°	AA	F			FI		P		°	AKK	K			A			D°		P	I		27
1971		A			°							A					F						AF							°			*	A			9
1972					°		A				I	°		*	A	F		F					A	°						A°		*					13
1973		A			°	°							°		A*			F				°				A	°		°I					°			13
1974				°		A°						°		°	F°						°	F	°			A	°		°		A				°		15
1975					°	°	°	A	°			°	°	*	F°	A	°			°		F°		°	°		°		°	°			A			°	22
1976				*			A	°				°	A		°I		I		°				°	A°*			°			°°		*	A			°	19
1977			°		*°			A	°				°			A*		°				°		A	F*°				°	*		°	A	°			19
1978			A°			°	*°		*			FF	*	A°		F	×°				×		°	A				*					A*			°	21
1979		A°			°	*			*				*			A°							F*	A°	*				*		A				°		16
1980	S	A°	×		°			°	*	S	×°			S*	A°			F	°	×	F	S*	F	°			*			A°	×			×		S	28
1981		×			°	S	×	A		S	*	°	°	AS°*				S		F		F		*F	S		°		S°		S	A		°			25
1982					*×S	*	SA	*	×			×°	*	A°	S		°	*		S	F	S*	**	S°		°	S	*		*°	×		A°				32
1983		S	A°	S		°	S		°S		I	°	*I	°	×		A	*		S	*		*	S°	**		AF		S°	*×	×	A	°			°	33
1984	°		A	S	°	°	S		*°	S		×	S×	A°	S×			*		°		°	S	°			A°			°	AS*		°	S		°	30
1985				S									*			*				I		**			**					*°							10
Сумма за месяц		24			43			30			28			61			34			23			62			31			43			36			21		436

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

только сезонные характеристики изменчивости в этом районе; база данных для исследования межгодовой изменчивости значительно беднее, чем для других базовых станций и составляет 4—5 наблюдений в год, тем не менее их достаточно, чтобы получить оценки для пространственного сопоставления режима фосфатов.

Общий фосфор. Количество данных по общему фосфору несколько меньше, чем по фосфатам, так как наблюдения стали проводить в 1968 г., т. е. на 10 лет позже, а данные Госкомгидромета появились лишь начиная с 1980 г.

Обеспеченность базовых станций данными по общему фосфору значительно различается. Наибольший по объему массив данных имеется для ст. BY 15 (табл. 9.8), в который, в отличие от массивов других станций, включен большой объем наблюдений БалтНИИРХа за 1972—1984 гг. Данные для ст. BY 2 (80) и BY 5 (62) за 1968—1978 гг. преимущественно относятся к основным сезонным срокам наблюдений. Если до 1980 г. количество определений общего фосфора для ст. BY 2 и BY 5 составляло около 5—15 в год, а для ст. BY 15 — до 20, то с 1980 г. оно возросло до 15—30 в год. Массивы данных для ст. BY 9 (46) и BY 29 сформированы главным образом сезонными наблюдениями.

В целом данные по общему фосфору для ст. BY 15, сезонные выборки для которых включают 25—40 значений, а в остальные месяцы — от 10 до 20, обеспечивают достаточно подробный анализ внутригодовой изменчивости. Массивы данных для станции BY 2 и BY 5 также позволяют получить сопоставимые сезонные характеристики и ориентировочные для межсезонных интервалов года, а для станции BY 9 и BY 29 массивы данных достаточны лишь для сезонных оценок. Исследование межгодовой изменчивости содержания общего фосфора в период 1968—1984 гг. возможно для всех станций.

Органический фосфор. Так как практически для всех наблюдений за общим фосфором имеются соответствующие данные по фосфатам, то по их разности для каждого наблюдения можно получить данные по органическому фосфору и рассчитать его процентное содержание от общего. Сформированные соответствующим образом массивы данных количественно несколько меньше, чем массив по общему фосфору, вследствие отбраковки некоторой части наблюдений.

Кремний. Начало определений содержания кремния относится к 1958 г. Для большинства базовых станций имеется около 180 наблюдений, а для ст. BY 29 — вдвое меньше. До 1968 г. эти наблюдения проводились эпизодически в основном на советских и финских судах. С 1968 по 1977 г. массив данных по кремнию пополнили шведские наблюдения. Шведские данные носят сезонный характер и их количество составляет около 5—10 значений в год. В период проведения исследований по программе МГБ количество наблюдений увеличилось до 10—20 в год. С 1978 г. количество определений кремния в среднем составляет 10—15 в год.

В целом для всех базовых станций, кроме ст. BY 29, многолетние ряды данных для основных сезонных сроков включают 20—30 наблюдений (табл. 9.9). Для остальных месяцев количество данных несколько меньше — от 10 до 20. Для ст. BY 29 массив данных позволяет сформировать многолетние ряды из 10—15 значений и только для основных сезонных сроков.

Данные для описания межгодовой изменчивости содержания кремния для всех станций относятся к периоду 1968—1984 гг.

Нитриты. Наблюдения за нитритами на всех базовых станциях, кроме ст. BY 29, проводятся с 1957—1958 гг. и их количество составляет от 180 до 240. В качестве примера в табл. 9.10 представлено распределение данных по нитритам для ст. BY 15. До 1965 г. наблюдения имели эпизодический характер и их количество не превышало 3 измерений в год, а с 1965 г. начинаются регулярные сезонные наблюдения (5—7 измерений в год). В период работ по программе МГБ количество наблюдений возросло до 10—18 в год. С 1978 г. наблюдения проводятся не только в основные сезонные сроки, но и между ними и их количество увеличивается до 10—20 в год.

Многолетние ряды для основных сезонных сроков на большинстве базовых станций с 1965 г. содержат 20—35 наблюдений, а на ст. BY 15 — до 40 (ежегодно 2—3 измерения в течение одного сезона). Минимальное количество наблюдений за 1958—1985 гг. отмечается в июле и декабре (меньше 10), а для остальных месяцев составляет 10—20 значений.

Для ст. BY 29 многолетние ряды данных формируются только для основных сезонных сроков и включают 10—15 значений, так как наблюдения за нитритами, начатые в 1969 г., проводились главным образом на шведских судах. Количество наблюдений в году не превышает 4, за исключением 1969—1970 гг., когда оно составляло около 10 в год.

Нитраты. Количество данных по нитратам, наблюдения за которыми начаты в 1965 г., для основных базовых станций составляет 160—220, а для ст. BY 29 — около 70. До 1978 г. наблюдения проводились в основные сезонные сроки, исключение составляют 1969—1970 гг., когда было проведено 10—15 измерений на основных станциях, а на ст. BY 15 — до 18—19 наблюдений в год (табл. 9.11). С 1978 г. количество ежегодных наблюдений за нитратами возрастает до 10—20, а на станциях BY 2 и BY 15 — до 25 за счет выполнения измерений не только в основные сезонные сроки, но и между ними.

Наибольшая обеспеченность многолетними данными по нитратам имеется для основных сезонных сроков. Для станций BY 5 и BY 9 количество измерений с 1965 по 1985 г. составляет 25—35, а для станций BY 2 и BY 15 — до 40. Минимальное количество данных (менее 10 значений) для декабря, для остальных месяцев отмечается около 10—20 значений. Для ст. BY 29 массив многолетних данных значительно меньше, но благодаря регулярности наблюдений ряды для сезонных сроков достаточно полны.

Таким образом, данные по нитратам для всех основных станций в открытой части Балтийского моря обеспечивают проведение статистического анализа внутригодовой и межгодовой изменчивости.

Аммоний. Первые определения содержания аммония были выполнены в 1965—1966 гг., а начало регулярных наблюдений относится к 1969 г. Количество наблюдений на станциях невелико и состав-

Таблица 9.8

Распределение данных наблюдений за содержанием общего фосфора в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1968				A												AF	F		F												A						6
1969											A			I		F	F		FF				I								A	A					9
1970		A	A													AA	F			FF					A			A					I			10
1971		A										A					F						AF										A			6
1972					°		A				I	°			A	F		F	A				A	°						A°			A			13
1973		A				°							°		A			AF				°			A	A	°		°I				°			13
1974				°		°						°		°	F°						°	F	°			A	°		°		A			°		14
1975					°		°	A	°			°	°		F°	A	°			°		F°		°	A		°		°	°			A		°	20
1976							A	°				°	A		°I		I		°				°	A**			°			**		*	A		°	18
1977			°	A	°			D	°				D			A		°				°		F	F°*			°			°		A	°		17
1978			A°			°	°					FF		A*		F	°						°	A									A*		°	15
1979		A°			°											A°							F	A°					A°	**		A			°	13
1980	S	A°			°			°		S°				S*	°A				°	×	F	S*	F	°			*		*	A°	×			×		S	25
1981		×			°	S	×	A		S		°	°	AS°*				S		F		*	°	°	S		°		S°		S	A*		°			25
1982					S×*	°	AS		×			×°		AS°			°			S	F	S		S°I		°	S	*		*°	×	A	°				27
1983		S	A°	S		°	S		S°	I		°	I	°	×		A			S				S°	**		AF		S°	*°	×	A	°			°	29
1984	°		A	S	°	°	S		*°	S		×	S×	A°	S×			*		°		°	S	°			A°			°	AS*		°	S		°	30
1985				S									*			*				I		**			*×					*°							10
Сумма за месяц		18			23			21			19			38			27			18			40			25			29			27			15		300

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

Таблица 9.9

Распределение данных наблюдений за содержанием кремния в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1957																						I															1
1959														*									I														2
1961																														°							1
1962															°						F	°								°							3
1963						°																	°							°							3
1964						°																	°							*		°					4
1965					°									+									°														3
1966														°								°								°							3
1967					°										°				F											°							4
1968				A									I	°I		AF	F		F					°	A					°		A					12
1969			A		°		D		P		A			°I		A	A			P	P		I					D	DD	°		A	A	DD			20
1970		A				°			D	D	K			D		A	F					P			AK				A				P				13
1971		A										A					F						AF			I							A				7
1972							A				I			*	A	F		F					A							A		*					9
1973		A													A*											A				*							5
1974						A									F							F			A	A				A							6
1975								A						*	F	A						F		A	A							A					8
1976							A						A											A								A					4
1977								A								A*								F	F*					*			A				8
1978			A				*		*			FF	*	A		F								A				*					A				11
1979		A				*			*				*			A							FI	A							A						9
1980	S	A							*	S				S*	A			F			F	S*	F				*			*	A				S		16
1981						S		A		S	*			AS*			I	S		F				F	S				S		S	A*					16
1982					S*		AS	*					*	AS						S	F		*							*			A					13
1983			A										*				A	*					*		*		AF			*			A					10
1984			A						*				*	A												*	A					A						7
1985													*									*			*													3
Сумма за месяц	10			12			16			10			35			20			9			29			18			18			20			4			201

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

Таблица 9.10

Распределение данных наблюдений за содержанием нитритов в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1958																						*								*							2
1959								*						*									I														3
1962															∘																						1
1963									∘																												1
1964																																∘					1
1965		A								A				+			A							A										A			6
1966														A										A													2
1967					•														F					∘							∘						4
1968													K	K		AF	F							∘	A					∘							8
1969							D		P							F	F		FF	P	P					PP		D	DD	∘		A	A	DD			18
1970		A				∘			D	D	K	K		D		AA	F			F		P			AK	K			A		D		P				18
1971		A							S			A					F						AF			I		S						A			9
1972			S				AS							*	A		S	F				*	A		S					AS		*					13
1973		A			S						S				A*			S						S		A			I		*						10
1974						A																									A						2
1975								A						*	F	A									A								A				6
1976				*			A								I		I							A*								*	A				8
1977					*			A									A*							F	F*					*			A				9
1978			A				*		*			FF	*	A		F								A				*					A*				12
1979		A				∘			*				*			A							F*I	A	*				*		A						12
1980		A							*					*	A			F		×	F	*	F				*		*	A	×						14
1981		×					××	A			*			A*			I			F		*		F								A*		×			13
1982					**		A	*	×			×	*	A				*			F	*	**					*		**	×	A					18
1983			A		*						I		*I		×		A	*			*	×	×*		A*		AF			*		A					18
1984			A	*								×	×*	A	×			*	*			*				*	A				A*						14
1985				*									*			*				×		**			×**					×*							11
1986	*																																				1
Сумма за месяц		12			12			21			12			31			26			13			33			23			22			24			5		234

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

Таблица 9.11

Распределение данных наблюдений за содержанием нитратов в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1962																					F																1
1965		A								A							A							A										A			5
1966														A										A													2
1967																			A																		1
1968																AF	F								A						A						5
1969			A				D		F		A					F	F		FF	P	P					PP		D	DD			A	A	DD			19
1970		A							D	D	K	K		D		AA	F			FF		F			AK	K			A		D		P				18
1971		F							S			A					F						AF					S						A			8
1972			S				AS								A	F	S	F						A		S				AS								11
1973		A			S						S				A			FS						S			A			I							9
1974						A									F							F									A						4
1975								A							F	A						F			A								A				6
1976							A								I		I							A*									A				6
1977								A								A*								F	F*		I			*			A				9
1978			A				*		*			FF	*	A		F								A				*					A*				12
1979	S	A				*			*				*			A							FS*	A	*				*		A						13
1980		A							*	S				S*	A					×	F	A*	F				*			*	A	×			×		S	17
1981		×				S	×	A		S	*			AS*			I	S		F		*		F	S				S			S	A*					19
1982					F*		AS	*					*	AS				*		S	F	S*	*	S			S	*		**			A					20
1983		S	A	S	*		S		S		I		I*		×		A			S	*		×*	S	**		AF		S	*			A					23
1984				*			S		*	S		×	S×	A	S×							*	S				A				AS*			S				18
1985													*							×		**			×**					×*								9
Сумма за месяц	13			9			22			15			29			25			16			33			24			21			21			7			235

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

ляет 80—100 измерений. Представление о распределении данных на примере ст. BY 15 дает табл. 9.12. Данные по аммонию за 1969—1977 гг. главным образом зарубежные, они носят сезонный характер и их количество, как правило, не превышает 10 в год, за исключением 1969—1970 гг., когда оно составило от 10 до 17. С 1978 г. число наблюдений увеличивается до 10—15 в год, так как выполняются они не только в основные сезонные сроки, но и между ними. Однако не все данные по аммонию можно использовать при статистическом анализе, например данные, полученные судами Литовского УГМС (см. п. 9.3).

Достаточно ограниченный объем данных по аммонийному азоту позволяет исследовать лишь основные особенности его режима: сезонные изменения, вертикальное распределение, зависимость концентраций от кислородных условий в глубинном слое.

Общий азот. По общему азоту количество данных наименьшее и составляет 40—80 измерений на каждой станции (данные только зарубежные). Это связано с трудностями методического характера при проведении анализов проб воды (см. п. 9.3). Наибольшее количество измерений проведено в период с 1969 по 1984 г. Распределение данных на примере ст. BY 15 представлено в табл. 9.13. Начало советских наблюдений относится к 1980 г., однако из-за несопоставимости полученных данных с зарубежными они не использовались для расчетов и анализа.

Поскольку количество данных по общему азоту невелико и база данных включает главным образом сезонные наблюдения, можно рассматривать лишь самые общие закономерности режима этого элемента.

Органический азот. Во всех случаях определения содержания общего азота практически всегда измеряется и содержание его минеральных форм — нитритов, нитратов и аммония. Это позволяет получить по разности концентраций общего и минерального азота данные по содержанию органического азота и рассчитать его процентное содержание от общего. По этим элементам были сформированы соответствующие массивы данных для статистического анализа, количественно идентичные с массивом для общего азота.

9.3. Химико-аналитические методы определения гидрохимических показателей и сопоставимость данных информационной базы

Данные по гидрохимическим показателям, полученные в течение последнего 30-летия, достаточно однородны и имеют высокое качество в химико-аналитическом отношении. Это объясняется постоянной тенденцией к методической унификации гидрохимических наблюдений на Балтийском море, так как при обобщении материалов наблюдений, полученных с использованием различных средств измерений, перед исследователями с особой остротой встает проблема сопоставления (интеркалибрации) результатов измерений. Так, по инициативе Международной комиссии по охране среды Балтийского моря в марте 1977 г. в Киле была проведена интеркалибрация средств и методов гидрохимических наблюдений, в которой приняло участие 23 представителя от 15 лабораторий из всех прибалтийских стран. Она носила характер официальный и установочный для участников Программы международного мониторинга Балтийского моря. В частности, в решениях относительно методик анализа биогенных элементов, полный набор которых впервые был представлен на интеркалибрацию, отмечались удовлетворительная точность и сопоставимость результатов, полученных с использованием различных модификаций методики или различной техники (различные методы встречались редко) [133]. При этом было принято решение об отсутствии необходимости в дальнейшем проводить подобные интеркалибрации по этим элементам (кроме общего азота), если в методиках не произойдет существенных изменений.

Тем не менее в последующие годы было проведено еще три интеркалибрации: в 1982 г. в Ренне — по биогенным элементам в рамках программы морских биологических наблюдений, в 1986 г. — при осуществлении международного проекта PEX и в 1989 г. — по биогенным элементам по программе МСИМ, в работе которой приняло участие 68 лабораторий (анализировались пробы, присланные по почте) [314].

При использовании объединенной базы зарубежных и советских гидрохимических данных проблема их сопоставимости возникает в связи с тем, что на Кильской интеркалибрации были представлены не все методики, используемые в системе Госкомгидромета, и, кроме того, Клайпедская ГМО, производившая наблюдения в открытой части Балтийского моря, не принимала в ней участие. Хотя советские методики принципиально не отличаются от международных, для ряда элементов они модифицированы по условиям проведения аналитических реакций и технике измерения. Как показало исследование базы данных по заливам Балтийского моря, эти отличия могут заметно сказываться на уровне получаемой информации [84].

Другая сторона проблемы сопоставимости данных связана с качеством серийных определений, которое не всегда обеспечивается объективными условиями химико-аналитической работы на судах. В связи с этим был выполнен статистический анализ данных, полученных зарубежными судами и Клайпедской ГМО, и проведено сопоставление, которое заключалось в сравнении вероятностных характеристик распределения данных в соответствующих выборках за один и тот же промежуток времени (1976—1985 гг.) при одинаковых сезонных условиях. Сравнение результатов вероятностного анализа проводилось на примере двух станций: BY 5 и BY 9, для которых сопоставимость исследовалась в области относительно низких концентраций — для верхнего слоя, а в области высоких концентраций — для придонного слоя.

Представленный ниже анализ информационной базы гидрохимических данных в отношении химико-аналитических методов их получения подготовлен на основе результатов Кильской интеркалибрации [133], согласно которым качество метода определения отражается следующими характеристиками:

— предел обнаружения — наименьшая концентрация, определяемая данным методом со свойственной ему точностью;

Таблица 9.12

Распределение данных наблюдений за содержанием аммония в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1965										A							A							A										A			4
1966														A																							1
1969							D									F	F		FF									D	DD			A	A	DD			12
1970		A							D	D	K	K		D		AA	F				F		P			AK	K			A		D		P			17
1971		A										A					F																	A			4
1972							A									F		F						A						A							5
1973		A													A			F								A											4
1974						A									F								F									A					4
1975								A							F	A							F			A								A			6
1976							A																	A										A			3
1977								A								A								F	F									A			5
1978			A						*			FF	*	A		F								A										A			9
1979		A							*				*			A								F*	A	*			*			A					10
1980		A							*					*	A						F			F			*			*							8
1981								A			*			A						F					F								A					6
1982						I								A							F	*											A				5
1983			A														A										AF							A				5
1984			A											A				*									A						A					5
1985																*														*								2
Сумма за месяц	8			2			10			8			13			17			6			14			11			8			14			4			115

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

Таблица 9.13

Распределение данных наблюдений за содержанием общего азота в информационной базе для ст. BY 15 по годам, месяцам и декадам

Год	Январь			Февраль			Март			Апрель			Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь			Октябрь			Ноябрь			Декабрь			Сумма за год
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1969																	F														A	A				3
1970		A														A	F			F					A				A							6
1971		A										A											A														3
1972							A								A	F			F					A						A							6
1973		A													A											A											3
1974																															A						1
1975								A								A									A							A					4
1976							A																	A								A					3
1977																A								F	F							A					4
1978			A									FF		A		F								A								A					7
1979		A														A							F	A						A							5
1980	S	A								S				S*	A			F			F	S*	F					*	A						S		14
1981						S		A		S				AS				S		F				F	*			S		S	A						12
1982					S		AS							AS						S	F	S	*	S			S				A						12
1983		S	A	S			S		S								A			S				S			A	S			A						11
1984			A	S			S			S				A	S								S				A			AA			S				11
1985																													*									1
Сумма за месяц	10			4			9			6			12			12			6			16			8			7			14			2			106

Примечание. Условные обозначения те же, что и в табл. 9.4.

— точность — величина, характеризующая абсолютную или относительную систематическую ошибку, т. е. отклонения найденных значений от истинного в единицах измеряемой величины или в процентах от последнего. Точность определения может быть установлена только для тех элементов, для которых может быть приготовлен модельный стандартный раствор (для кислорода, например, это невозможно);

— воспроизводимость — величина, характеризующая случайные ошибки, определяемые средним квадратическим отклонением в единицах измеряемой величины (S) или в процентах (относительное стандартное отклонение) от среднего арифметического значения из n определений (V):

$$S = \pm\sqrt{[(x_1-\bar{x})^2+(x_2-\bar{x})^2+\ldots+(x_n-\bar{x})^2]/(n-1)};$$
$$V = (S/x)\,100,$$

где x_1, x_2, ..., x_n — значения, найденные в индивидуальных определениях; $\bar{x}$ — общее среднее арифметическое из всего набора определений.

Характеристики метода, сопровождающие его описание, как правило, получены на основе поверки в одной лаборатории, тогда как при интеркалибрации эти понятия отражают качество метода и сопоставимость данных, получаемых разными учреждениями. Поэтому для целей данного обсуждения наибольший интерес представляют характеристики метода, прошедшего интеркалибрацию.

Растворенный кислород. Практически все данкислороду получены с использованием титрометрического метода Винклера, предложенного 100 лет назад, и его модификаций [68, 222, 242, 261]. Предел обнаружения — 0,06 ‰ по объему [68], но точность не может быть определена из-за трудности получения стандартного раствора; воспроизводимость для концентраций не более 2 ‰ составляет ±0,02 ‰, а для более высоких — ±0,04 ‰ [129]. При интеркалибрации стандартное отклонение оценивалось в ±0,03 ‰ [222, 223] и отмечалась хорошая сопоставимость результатов, полученных различными странами.

Сероводород. Ввиду относительно малых концентраций сероводорода в водах Балтийского моря, образующегося эпизодически в придонном и глубинном слоях впадин, для его определения используется описанный Фонселиусом [229] спектрофотометрический метод на основе образования окрашенного соединения при реакции с метиленовым голубым. Хотя метод не был проверен в интеркалибрациях, простота его техники и высокая чувствительность дали основание Фонселиусу предположить удовлетворительную сопоставимость результатов при использовании его различными странами.

Щелочность. Для определения щелочности наиболее широко применяются объемно-аналитические методы прямого или обратного титрования [68]. Однако почти весь имеющийся массив данных по щелочности получен методом обратного титрования Шведским гидрографическим институтом (Гетеборг), поэтому вопрос о сопоставимости данных для этого элемента не возникает. Метод характеризуется высокой точностью — 0,3 % [49], воспроизводимость составляет ±5 % [69].

Водородный показатель (pH). Основной объем данных по pH в описываемой информационной базе получен электрометрическим способом. Точность измерений зависела от качества приборов, стандартных буферных растворов для калибровки приборов и от условий проведения анализа. Для советских приборов (pH-262 и pH-340) точность измерений составляет ± (0,01—0,04) [68], для зарубежных — не хуже 0,01 [262]. Оценки воспроизводимости измерений, полученные различными участниками интеркалибрации, отсутствуют, а общая оценка воспроизводимости на основе средней квадратической погрешности равна 0,01.

Наибольшая часть данных по pH, полученных на советских судах в 60-х годах, определена с помощью визуального колориметрического метода с использованием эталонов стандартной шкалы. Метод характеризуется не меньшей точностью, чем электрометрический, но воспроизводимость при сопоставлении данных, полученных разными исполнителями, ухудшается и составляет ±0,05.

Ввиду различия приборной базы и стандартных растворов, используемых на зарубежных и советских судах для определения pH, было проведено сопоставление статистических характеристик распределения данных (см. п. 9.4) в сезонных выборках, примерно одинаково обеспеченных наблюдениями за период с 1976 по 1985 г., для интервалов года с наиболее стабильными условиями: январь—март, июнь—август и конец октября—ноябрь, а также за весь указанный выше период для данных измерений на придонном горизонте. Результаты сопоставления (табл. 9.14) показали достаточно удовлетворительную сходимость характеристик распределения, хотя чувствительность техники измерений на советских судах, очевидно, меньше, чем на зарубежных. Об этом свидетельствует тенденция к занижению значений характеристик на 0,04—0,11 в верхнем слое и преобладающее завышение их на 0,01—0,09 в придонном слое.

Фосфаты. Метод анализа неорганических фосфатов основан на образовании желтой фосфоромолибденовой гетерополикислоты в кислой среде с последующим восстановлением ее до гетерополисини, окраска раствора которой измеряется при длине волны 885 нм. В используемой информационной базе данных преобладающая часть наблюдений за фосфатами получена с применением метода Морфи и Райли [367], в котором в качестве восстановителя используется аскорбиновая кислота. За рубежом этот метод используется с 1962 г. [222, 415] и в настоящее время выполняется в модификации Королеффа [321] со следующими характеристиками метода: чувствительность 0,3 мкг/л, среднее квадратическое отклонение ±5 % при средних концентрациях (27 мкг/л), ±2 % при высоких концентрациях (86 мкг/л) и ±15 % при низких концентрациях (6 мкг/л) [133].

В системе Госкомгидромета данный метод в модификации, изложенной в работах [68, 133], используется с 1973 г. При этом при измерении спектрофотометром или прибором ФЭК-60, которые обеспечивают область максимального светопропускания 885 нм с кюветой 100 мм, чувствительность равна 2,5 мкг/л, относительное стандартное отклонение не превышает 0,9 %, а средняя относительная ошибка — не более 1,1 % [68].

Кильская интеркалибрация, на которой была представлена данная методика Госкомгидромета, показала хорошую сопоставимость результатов: точность определений 14 участников для стандарт-

Таблица 9.14

Сопоставление данных по pH, полученных зарубежными судами и судами «Лев Титов» и «Океанограф» на основе характеристик распределения их в сезонных и многолетних выборках 1976—1985 гг.

Период наблюдений	Суда	T	$x_{0.25}$	$x_{0.75}$	Q	n	T	$x_{0.25}$	$x_{0.75}$	Q	n
		Ст. BY 5					Ст. BY 9				
		Горизонт 0 м					Горизонт 0 м				
1 I—31 III	«Лев Титов», «Океанограф»	8,07	8,02	8,12	0,10	13	8,07	7,99	8,12	0,13	11
	Зарубежные	8,14	8,06	8,21	0,14	8	8,15	8,10	8,18	0,08	7
	Разность	—0,07	—0,04	—0,09	—0,04		—0,08	—0,11	—0,06	0,05	—
1 VI—31 VIII	«Лев Титов», «Океанограф»	8,41	8,30	8,50	0,20	12	8,42	8,37	8,47	0,10	17
	Зарубежные	8,49	8,37	8,65	0,28		8,40	8,35	8,52	0,17	7
	Разность	—0,08	—0,07	—0,15	—0,08		0,02	0,02	—0,05	—0,07	
1 IX—10 XII	«Лев Титов», «Океанограф»	8,12	8,09	8,15	0,06	6	7,99	7,93	8,07	0,13	7
	Зарубежные	8,10	8,05	8,19	0,14	8	8,12	8,03	8,27	0,24	9
	Разность	0,02	0,04	—0,04	—0,08		—0,13	—0,10	—0,20	—0,11	—
		Горизонт 80 м					Горизонт 100 м				
1976—1985 гг.	«Лев Титов», «Океанограф»	7,51	7,38	7,72	0,34	42	7,45	7,35	7,60	0,25	45
	Зарубежные	7,45	7,30	7,63	0,33	39	7,44	7,35	7,53	0,18	28
	Разность	0,06	0,08	0,09	0,01		0,01	0,00	0,07	0,07	—

Примечание. Здесь и далее во всех таблицах n — количество наблюдений.

ных (модельных) проб составляла в среднем (среднее стандартное отклонение) ±1,5 мкг/л в ряду концентраций 0—60 мгк/л, а для проб морской воды находилась в пределах ±1,0 мкг/л (0,03 моль/л) [223]. Характеристики метода при интеркалибрации в среднем лишь в 2 раза превышают методические, приведенные выше, а диапазон относительных отклонений составляет 24—57 % в области низких концентраций (2—7 мкг/л), 7—20 % для средних концентраций (15—27 мкг/л) и 5—6 % для высоких концентраций (68—95 мкг/л) [133].

Как уже отмечалось, основная часть зарубежных данных по фосфатам получена по методу Морфи и Райли. Советские данные до 1972 г., представленные в информационной базе, получены другим методом, отличающимся восстановителем, в качестве которого принимался раствор двухххлористого олова [68]. По чувствительности данный метод даже превосходит метод Морфи и Райли, однако ввиду неустойчивости окраски требует строгого соблюдения времени измерения и учета влияния температуры и солености [68]. Необходимо учесть также, что в практике работ на судах Госкомгидромета нередко использовался прибор ФЭК-56, не обеспечивающий требуемую чувствительность. Как показало сопоставление статистических характеристик данных по заливам, полученных с использованием этих методов, их уровень в целом одинаков, хотя при способе определения с двухххлористым оловом разброс данных больше [84].

Учитывая указанные выше недостатки отечественных данных, было проведено сопоставление статистических характеристик с аналогичными, рассчитанными по шведским данным за 1964—1982 гг. (рис. 9.6). Как видно из представленных данных, в некоторых случаях отмечается превышение верхнего предела нормы для зимних и весенних данных на 3—4 мкг/л, что, однако, не превышает отклонений результатов, полученных в ходе Кильской интеркалибрации. Аналогичное сопоставление статистических характеристик, рассчитанных для общего массива данных и по зарубежным данным, показало, что их значения практически не различаются, поэтому для получения справочных характеристик использовался весь массив данных по фосфатам.

Общий фосфор. Все методы определения общего фосфора как суммы неорганических и органических фосфорсодержащих соединений основаны на окислении органических форм, продуктами которых являются фосфаты. В используемой информационной базе гидрохимических данных по Балтийскому морю основная часть наблюдений за общим фосфором получена с помощью различных модификаций персульфатного метода окисления органического вещества [68, 133, 321] и лишь данные ГДР — методом фотохимического окисления [133, 162]. Как следует из результатов Кильской интеркалибрации, оба метода дают одинаковые показания. При этом в открытой части Балтийского моря пробы не фильтруются, поэтому результаты измерений характеризуют содержание валового общего фосфора, т. е. растворенную и взвешенную формы [133]. Аналитические показатели данных методов следующие: точность ±1,5 мкг/л, воспроизводимость ±1 мкг/л при концентрациях 0—60 мкг/л [133].

За рубежом при применении персульфатного метода пользуются техникой окисления по Короллеффу — под давлением (нагревание проб в автоклаве) [133]. В системе Госкомгидромета окисление проводят при кипячении проб в обычных условиях, что обеспечивает полное разложение лишь растворенных органических соединений. Для правильной квалификации результатов анализа рекомендуется предварительная фильтрация проб воды через мембранный фильтр, так как часть органи-

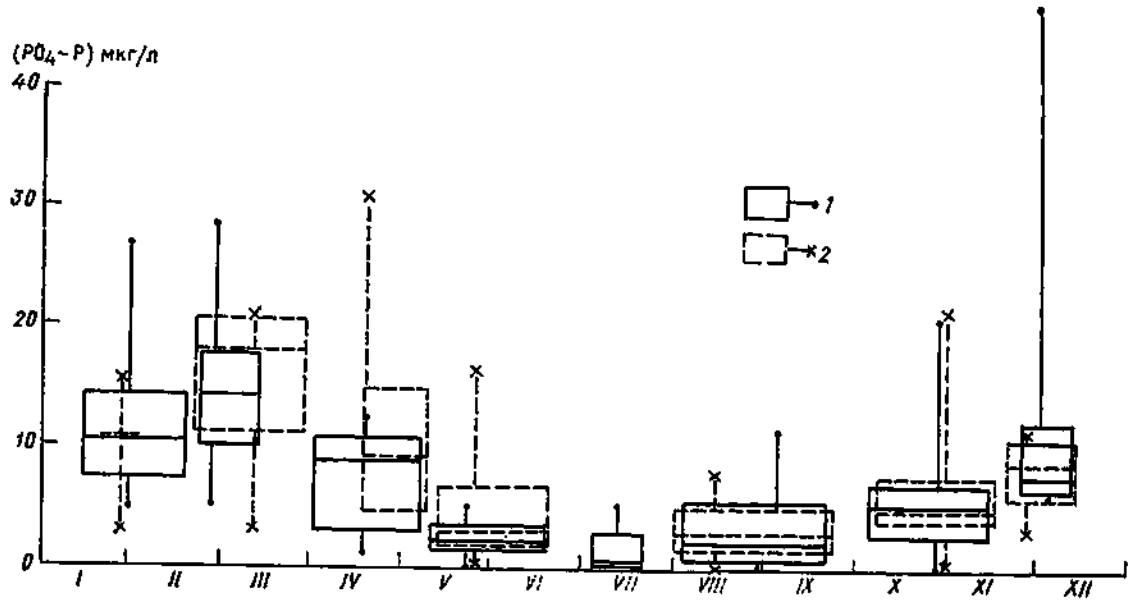


Рис. 9.6. Вероятностные характеристики распределения концентраций фосфатов в выборках за 1976—1982 гг.

1 — данные получены на судах «Скагеррак» и «Аргос» (Швеция); *2* — на судах «Океанограф» и «Лев Титов» (СССР).

ческого фосфора во взвешенной форме также может подвергаться окислению [68]. Поскольку принято считать, что в открытой части Балтийского моря взвешенная форма органического фосфора составляет незначительную часть от валового его содержания, то пробы обычно не фильтруются. Данный вариант метода, имеющий при выполнении всех требований к работе на спектрофотометре хорошую воспроизводимость (среднее относительное стандартное отклонение ±3 %), в Кильской интеркалибрации не испытывался на сопоставимость с методикой Короллеффа. Поэтому было проведено сопоставление статистических характеристик для данных по общему фосфору за 1976—1985 гг. аналогично тому, как это сделано для pH.

Результаты статистического сопоставления показали, что данные, полученные с использованием окисления персульфатом по методике ГОИНа, для верхнего слоя дают не заниженные значения характеристик, как это можно было бы ожидать, а завышенные, особенно для лета. Причем завышение достаточно значительное и достигает 70—80 % для ряда средних концентраций 30—45 мкг/л на глубине 40 м, в то время как для более низких значений концентраций на поверхности оно составляет 15—35 %. Это связано, по-видимому, с причинами, не зависящими от полноты или неполноты окисления органического фосфора в сравниваемых методиках.

Для высоких концентраций (50—100 мкг/л) статистические характеристики на 10—20 % ниже рассчитанных по зарубежным данным, что, в отличие от завышения, можно считать вполне приемлемым. Однако оказалось, что наибольшие расхождения наблюдаются для расчетных показателей: органический фосфор (разность концентраций общего и фосфатного фосфора) и его процентное содержание. Статистические характеристики для этих показателей, рассчитанные по данным Клайпедской ГМО, в 1,5—2,0 раза превышали значения, рассчитанные по зарубежным данным. В связи с этим данные Клайпедской ГМО были исключены из массива наблюдений.

Что касается данных по общему фосфору, то для статистических расчетов по глубинному слою использовался общий массив наблюдений, а по верхнему слою — данные Клайпедской ГМО были исключены.

Кремний. Аналитические методы, обычно применяемые в морских наблюдениях, обеспечивают определение суммы растворенных неорганических соединений кремния, в основном ионов кремнекислоты — моно- и дисиликатов. За рубежом пользуются методом, основанным на образовании желтого кремнемолибденового комплекса с восстановлением его до голубого. Модификации метода различаются восстановителями: большинство участников Кильской интеркалибрации применяют методику Короллеффа с восстановлением аскорбиновой кислотой [323], в то время как в Методическом руководстве ГОИНа в этом качестве рекомендуется метолсульфитная смесь [90], которая также широко применялась за рубежом [405].

По результатам Кильской интеркалибрации методике с аскорбиновой кислотой было отдано предпочтение ввиду ее простоты. При этом она характеризуется хорошей точностью: относительная ошибка при низких концентрациях (порядка 125 мкг/л) составляет ±4 %, при средних концентрациях (1250 мкг/л) — (±2,5) %, при высоких концентрациях (4000 мкг/л) — (±6,0) %. Предел обнаружения составляет 1,4 мкг/л при низких концентрациях и 28 мкг/л при высоких [133].

Методика с использованием метолсульфитной смеси характеризуется точностью ±5 % (средняя относительная ошибка) и воспроизводимостью 3 % (относительное стандартное отклонение). Однако при содержании кремния более 500 мкг/л эти показатели заметно ухудшаются и применение методики не рекомендуется [68]. Хотя вариант методики определения кремния, применяемый в системе Госкомгидромета, не был представлен на Кильской интеркалибрации, тем не менее две лаборатории применяли этот же восстановитель, и воспроизводимость результатов в диапазоне концентраций 100—1000 мкг/л была не хуже методической [133]. В ре-

Таблица 9.15

Сопоставление данных по кремнию, полученных зарубежными судами и судами «Лев Титов» и «Океанограф», на основе характеристик распределения их в сезонных и многолетних выборках 1976—1985 гг.

Период наблюдений	Суда	T	$x_{0.25}$	$x_{0.75}$	Q	n	T	$x_{0.25}$	$x_{0.75}$	Q	n
		Ст. BY 5					Ст. BY 9				
		Горизонт 0 м					Горизонт 0 м				
I I—I V	«Лев Титов», «Океанограф»	493	360	550	190	15	473	395	600	204	16
	Зарубежные	505	450	534	84	11	468	400	527	127	12
	Разность	—12	—90	16	106	—	4	—5	73	77	—
I V—I X	«Лев Титов», «Океанограф»	216	152	270	118	18	337	210	460	250	29
	Зарубежные	191	138	236	98	25	187	140	253	113	17
	Разность	25	14	34	20	—	150	70	207	137	—
I X—31 XII	«Лев Титов», «Океанограф»	338	281	400	119	10	270	180	380	200	10
	Зарубежные	294	222	369	148	8	285	199	367	168	10
	Разность	44	59	31	—28	—	—15	—19	13	32	—
		Горизонт 80 м					Горизонт 100 м				
1976—1985 гг.	«Лев Титов», «Океанограф»	1335	965	1675	710	39	1420	1220	1580	360	59
	Зарубежные	1428	1098	1761	663	41	1379	1121	1607	486	40
	Разность	—93	—133	—86	47	—	71	99	—27	—126	—

шениях Кильской интеркалибрации отмечается также, что главная проблема анализа содержания кремния — это влияние солевого эффекта и необходимость использования качественного стандарта (кварц Фудзи или гексафторсиликат натрия). Указывается также на необходимость учета мешающего влияния сероводорода (окисление бромом или разбавление проб) и разбавления проб при высоком содержании кремния [133].

В Методическом руководстве ГОИНа при высоких концентрациях рекомендуется применять другую методику, основанную на колориметрировании желтого кремнемолибденового комплекса в ультрафиолетовой области спектра [56, 68]. Эта методика характеризуется хорошей точностью: в ряду концентраций более 200—300 мкг/л средняя относительная ошибка составляет ±2,5 %, относительное стандартное отклонение не превышает 1,5 % [68]. При меньших концентрациях ошибка определения возрастает. Поскольку концентрации кремния в Балтийском море охватывают большой диапазон значений, в практике наблюдений Госкомгидромета используются оба метода.

Различия методик, стандартов, техники измерения, способов учета влияния сероводорода могут быть источником расхождения результатов наблюдений за кремнием в используемой информационной базе. Следует указать, что на станциях международного мониторинга при работах по этой программе определения кремния на судах Госкомгидромета выполнялись в соответствии с методическими рекомендациями по мониторингу [268], тогда как все прочие наблюдения — по Методическому руководству ГОИНа [68]. В связи с этим было проведено сопоставление статистических характеристик по кремнию, полученных советскими судами, с зарубежными данными (табл. 9.15). Результаты сопоставления данных для ст. BY 15 показали неприемлемость большинства данных Клайпедской ГМО, полученных для периодов сероводородных условий, которые в 1,5 раза и более превышали значения, полученные в это же время зарубежными судами. Вследствие этого данные Клайпедской ГМО по кремнию на ст. BY 15 были забракованы и изъяты из массива данных для расчетов по глубинному слою (100—240 м).

Сопоставление данных по кремнию на станциях BY 5 и BY 9 по придонному слою (на ст. BY 5 определения кремния на судах Клайпедской ГМО проводятся по программе мониторинга и по методикам ГОИНа, на ст. BY 9 — только по методикам ГОИНа) показало, что расхождения значений статистических характеристик находятся почти в пределах методической воспроизводимости (см. табл. 9.15). Это свидетельствует об удовлетворительной сопоставимости методик при средних концентрациях кремния и отсутствии сероводорода.

Для верхнего слоя летом (период относительно низких концентраций кремния) сопоставимость данных ухудшается, причем в наибольшей степени для ст. BY 9, где применяется модификация метода с метолсульфитной смесью в качестве восстановителя. Завышение характеристик, полученных по отечественным данным, в этом случае столь значительно, что влияет на сезонные различия и делает неприемлемым использование их для анализа годового хода и расчета справочных характеристик. В то же время для ст. BY 5 сопоставимость статистических характеристик оказалась более удовлетворительной (рис. 9.7), и для анализа годового хода использовался весь массив данных после отбраковки грубых ошибок. Аналогичное положение с данными по кремнию в верхнем слое для станций BY 15 и BY 2, которые как станции международного мониторинга имеют более однородные массивы наблюдений.

Следует отметить, что в используемой информационной базе данных по кремнию небольшая их часть (преимущественно отечественные), относящаяся к 1958—1967 гг., была получена с помощью

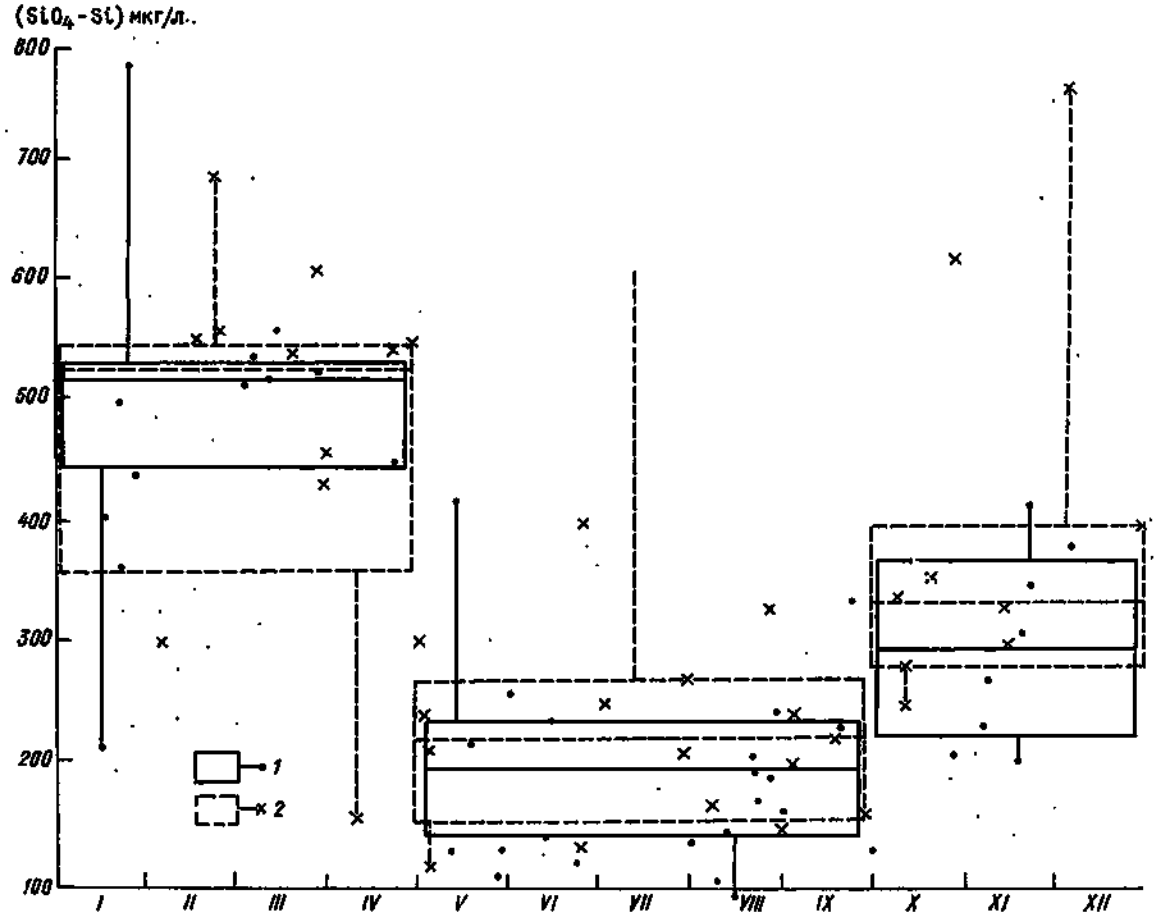


Рис. 9.7. Вероятностные характеристики распределения концентраций кремния в выборках за 1976—1982 гг.

1 — данные получены на судах «Скагеррак» и «Аргос» (Швеция); *2* — на судах «Океанограф» и «Лев Титов» (СССР).

метода, основанного на измерении окраски желтого кремнемолибденового комплекса в видимой области спектра, чувствительность, точность и воспроизводимость которого были признаны недостаточными [68]. По этой причине для расчета справочных статистических характеристик был использован массив данных по кремнию начиная с 1968 г.

Нитриты. В химической океанографии для определения нитритов применяется высокочувствительный и специфичный метод, основанный на диазотировании нитритов при их реакции с сульфаниламидом и последующим образованием красной азокраски. Известны два варианта метода, отличающиеся реагентом для образования окраски: метод Грисса—Илосвая, в котором используется α-нафтиламин [68], и метод Бендшнайдера—Робинсона, где применяется α-нафтилэтиленаминдигидрохлорид [144]. Последний метод более прост и удобен, имеет лучшую точность и воспроизводимость по сравнению с методом Грисса—Илосвая [68], поэтому нашел широкое применение за рубежом. Метод Бендшнайдера—Робинсона позволяет определять концентрации нитритного азота, равные 0,14 мкг/л, тогда как метод Грисса—Илосвая — 0,5 мкг/л. Воспроизводимость метода Бендшнайдера—Робинсона составляет ±0,2 мкг/л, а метод Грисса—Илосвая позволяет получать результаты с относительным стандартным отклонением ±15 % [68]. В системе Госкомгидромета из-за труднодоступности реагента применяется метод Грисса—Илосвая, который более чувствителен к влиянию солености и требует его учета при подготовке калибровочных графиков.

Оба метода в практике гидрохимических работ признаются сопоставимыми при учете влияния солености, обеспечении чистоты стандарта, учета влияния сероводорода, который следует удалять продуванием проб азотом [133].

Следует отметить, что определение нитритов необходимо производить не позднее, чем через 30 мин после отбора пробы, так как при хранении нитриты образуются в качестве продукта нитрификации аммония, а при более длительных сроках — окисляются до нитратов. В отечественных наблюдениях в 1958—1968 гг. это требование нередко не выполнялось, поэтому данные измерений за этот период были изъяты из массива данных для расчета справочных характеристик.

Нитраты. В информационной базе данных представлены лишь результаты определений нитратов, полученные восстановлением их до нитритов на кадмиевом редукторе с последующим определением по методике анализа нитритов. В практике гидрохимических наблюдений на Балтике используются различные варианты методики определения нитратов, отличающиеся процедурой восстановления.

По данным Кильской интеркалибрации в ряде лабораторий восстановление проводится с помощью амальгамированного кадмия — по методу Морриса и Райли [369] в описании Карлберга для судовых анализов [173]. Другой вариант — модификация Грассхоффа [263] метода Вуда, Армстронга и Ри-

чардса [81] — основан на применении омедненного кадмия для восстановления, которое проводится в присутствии аммиачного буфера. Метод имеет следующие характеристики: предел обнаружения около 1 мкг/л, относительная погрешность в ряду концентраций 0—140 мкг/л равна ±3 %, воспроизводимость зависит от уровня концентраций и составляет ±3 мкг/л для концентраций 0—70 мкг/л, ±6 мкг/л для концентраций 70—140 мкг/л и ±14 мкг/л для более высоких концентраций. При работе на одном редукторе воспроизводимость результатов вдвое выше.

Кильская интеркалибрация, на которой были представлены оба метода и различные виды редукторов, показала точность и воспроизводимость данных в пределах методических показателей [133] для большинства участников.

В системе Госкомгидромета используется другой вариант метода — восстановление на омедненном кадмии в присутствии трилона Б — модификация, разработанная в ИОАН [84]. Методика характеризуется чувствительностью около 2 мкг/л нитратного азота, точностью ±2,5 % для концентраций 5—30 мкг/л и воспроизводимостью около 3 % для концентраций 20—30 мкг/л, которая ухудшается при большем и меньшем содержании нитратов [68]. Данный метод достаточно удобен для океанических вод или вод с незначительной изменчивостью солености, поэтому из-за солевого эффекта (влияние солености на развитие окраски) вызвал сомнение для использования на Балтийском море и не был представлен на Кильской интеркалибрации. Из-за потенциально высокой «солевой» ошибки этот метод не был рекомендован и для международного мониторинга [133]. Тем не менее в наблюдениях, осуществляемых судами Госкомгидромета, применяется только этот метод с учетом влияния солености.

Результаты сопоставления статистических характеристик, рассчитанных по данным отечественных и зарубежных наблюдений, показали устойчивое завышение советских данных. Так, для зимы в верхнем слое (концентрации 40—70 мкг/л) статистические характеристики, рассчитанные по отечественным данным, на 20—40 % превышали значения, полученные по зарубежным наблюдениям: для придонного слоя (концентрации 100—160 мкг/л) завышение значений статистических характеристик составляло 20—30 %. По этой причине для исследования годового хода нитратов с целью выделения интервалов времени, когда происходят наибольшие межсезонные или внутрисезонные изменения, использовался весь массив данных, а для расчета справочных характеристик — только зарубежные данные.

Аммоний. В информационной базе данных представлены результаты наблюдений за содержанием аммонийного азота, выполненные с помощью метода Ричардса и Клетча [433] в модификации Королеффа [173, 320]. Метод дает возможность обнаружить концентрацию аммонийного азота менее 1 мкг/л и при соблюдении мер предосторожностей в отношении загрязнения аммонием извне может давать высокую точность и воспроизводимость: относительная ошибка 5 %, а относительное стандартное отклонение ±4,8 % [133]. В системе Госкомгидромета этот метод применяется в описании Королеффа [320], но его проверка показала несколько худшее аналитическое качество: в методике ГОИНа для вод Балтийского моря относительное стандартное отклонение составляет 12—13 %, однако при концентрации менее 5 мкг/л отмечается плохая воспроизводимость ввиду влияния загрязнения химической посуды, реактивов и воздуха лаборатории [68].

Кильская интеркалибрация показала, что в среднем в ряду концентраций не более 14 мкг/л стандартное отклонение составляло около 4 мкг/л, т. е. относительная погрешность около 30 %, однако в ряду меньших концентраций она возрастает до 60—70 % при содержании аммонийного азота 5,0—6,5 мкг/л [133].

Следует отметить, что участники Кильской интеркалибрации использовали различные модификации данного метода, отличающиеся техникой анализа или реагентами — источниками свободного хлора, которые признаны равноценными. По результатам интеркалибрации данный метод охарактеризован как наиболее подходящий и доступный и рекомендован для мониторинга [133]. Однако подчеркнута необходимость особой тщательности предотвращения загрязнения из различных источников и в особенности влияния воздуха лабораторного помещения [315].

Анализ данных по аммонийному азоту, представленных в информационной базе, показал, что результаты наблюдений на судах Госкомгидромета из-за условий работы, по-видимому, не сопоставимы с зарубежными данными. Сопоставление для верхнего слоя моря статистических характеристик по аммонийному азоту, полученных по данным советских судов, показало превышение значений по сравнению с зарубежными данными в несколько раз. Вследствие этого расчет справочных характеристик для аммонийного азота был выполнен только по зарубежным наблюдениям.

Общий азот. Определения общего азота были включены в практику гидрохимических наблюдений на Балтийском море после того, как был предложен метод Королеффа [319], основанный на окислении органического азота персульфатом калия в щелочной среде, продуктом которого являются нитраты. Известны также и другие методы, из которых наиболее обеспечивающим полное окисление органического азота считается фотохимический метод с применением УФ-облучения [127].

Довольно давно известным, но мало применяемым в практике, является метод Кьельдаля, основанный на переводе органического азота в аммоний. При расчете количества общего азота результаты данного анализа и определения нитратного азота суммируются [68].

В используемой информационной базе данных содержатся результаты наблюдений за общим азотом лишь с использованием модификаций персульфатного метода, который дает возможность определять общий азот с ошибкой 4—10 % для концентраций 280—560 мкг/л, причем в большинстве случаев отклонения не превышают ±3 % истинных значений [133]. Как показали результаты Кильской интеркалибрации, полученные данные были сопоставимы с результатами метода УФ-облучения, в то время как ряд определений по методу Кьельдаля отличался от них. В дальнейшем, в работе [129], было высказано сомнение в целесообразности проведения наблюдений по общему азоту до

тех пор, пока метод определения не будет усовершенствован.

Тем не менее наблюдения за общим азотом продолжались и был накоплен достаточно большой массив данных, основную часть которых составили зарубежные результаты наблюдений, а после 1980 г. — отечественные. Следует указать, что в Методическом руководстве ГОИНа для определения общего азота рекомендуется метод Кьельдаля [68], тем не менее в практике работ на Балтийском море он не применялся и был заменен на модифицированный вариант метода персульфатного окисления органического азота [48]. Сопоставление статистических характеристик для общего азота, полученных по отечественным и зарубежным данным, показало значительное завышение концентраций, рассчитанных по советским данным и невозможность их использования в получении справочных характеристик.

9.4. Методика статистического анализа

Анализ информационной базы гидрохимических данных по Балтийскому морю показал сравнительно небольшую длительность временны́х рядов наблюдений и неоднородность их структуры, а для некоторых элементов — довольно малые по объему массивы данных. Эти особенности информационной базы данных ограничивают информативность и корректность применения традиционных методов статистической обработки наблюдений. С другой стороны, выявление закономерностей изменчивости гидрохимических показателей основано на анализе информационной базы данных вероятностными методами, учитывающими особенности исследуемых процессов, специфику данных и масштабы изменчивости [13]. Исходя из этого, при подготовке данного издания был использован квантильный анализ [90] неэквидистантных временны́х рядов, эффективность применения которого была показана при исследовании годового хода гидролого-гидрохимических элементов [13, 21, 47, 84, 102, 104, 105, 424, 455, 456, 486].

Сущность метода заключается в том, что функция распределения $F(x)$ временно́го ряда может быть описана квантилями распределения x_p, при которых $F(x_p)=p$. Наибольший интерес представляют 5 квантилей

$$x_{\text{мин}},\ x_{0,25},\ x_{0,5},\ x_{0,75},\ x_{\text{макс}},$$

где $x_{\text{мин}}$, $x_{\text{макс}}$ — крайние члены ранжированного ряда x_i, $i=1,n$; $x_{0,5}$ — медиана (Me):

$$\text{Me}=\begin{cases} x_{(n+1)/2} \text{ при нечетном } n; \\ 0{,}5\,(x_{n/2}+x_{n/2+1} \text{ при четном } n; \end{cases}$$

$x_{0,25}$, $x_{0,75}$ — медианы левой и правой половин ранжированного ряда [13].

Наряду с перечисленными квантилями используются и их линейные комбинации: размах колебаний R и интерквартильное расстояние Q, которые определяются из выражений

$$R=x_{\text{макс}}-x_{\text{мин}};$$

$$Q=x_{0,75}-x_{0,25}$$

как оценки разброса данных и масштаба выборки.

В качестве оценки центра распределения рекомендуется [13, 90] использовать значения медианы $x_{0,5}$ и трехсреднего T, которое рассчитывается по значениям медианы и квантилей

$$T=(x_{0,25}+2\,\text{Me}+x_{0,75})/4.$$

При наличии асимметрии в распределении и при малом количестве данных во временны́х рядах T является лучшей оценкой центра, чем Me, так как учитывает плотность выборки вблизи ее центра. При количестве данных менее 5 в качестве оценки центра более предпочтительно использовать значение Me.

Критериями для оценок экстремумов в квантильном анализе служат значения границ: $x_{0,25}-1{,}5Q$ (нижняя) и $x_{0,75}+1{,}5Q$ (верхняя), в рамках которых располагается 99 % всех данных [90]. Значения, выходящие за указанные пределы, так называемые «внешние» члены выборки, квалифицируются как чрезвычайно большие или малые и нередко являются браком отбора пробы или химического анализа. Однако в случаях появления нескольких значений вблизи такого экстремума, значения, выходящие за пределы первых границ, принимались во внимание. Это относится даже к случаям, когда значения находились за пределами вторых границ: $x_{0,25}-3Q$ и $x_{0,75}+3Q$.

Основной особенностью применения квантильного анализа при описании гидрохимического режима Балтийского моря является способ формирования выборок данных для получения статистических характеристик. За основу взят принцип выделения группы данных по общности условий в ее пределах в отличие от традиционного приема объединения наблюдений по месяцам или годам [47, 104, 105, 424].

Анализ временны́х рядов гидрохимических данных для базовых станций, имеющих наибольшие массивы наблюдений, показал, что даже для них характерна существенная неоднородность распределения во времени: наиболее обеспечены наблюдениями сезонные сроки, а наименее — остальные месяцы. В связи с этим методика исследований заключалась в группировке всех данных временно́го ряда по месяцам, что позволяло получить совмещенный график годового хода. Последующий визуальный анализ такого графика позволяет выделить на нем «облака» точек, образующихся на временны́х интервалах с одинаковым комплексом условий и определяющих годовой цикл данного показателя. Определение временны́х границ таких выборок производится с точностью до декады, хотя при одинаковом разбросе «облака» данных в пограничных декадах учитывается возможность включения в выборки наибольшего количества лет. Одновременно рассматривается распределение данных по годам, месяцам и декадам.

На рис. 9.8 представлен годовой ход фосфатов в Готландской впадине (ст. BY 15), из которого видно, что резкое снижение концентраций весной происходит во 2-й декаде мая, а в 1-й декаде разброс данных подобен наблюдаемому в апреле. Анализ распределения данных во времени (см. табл. 9.8) показывает, что они заполняют некоторые пропуски лет в апрельских наблюдениях (1973, 1977 и 1979 гг.). Поэтому целесообразно объединить в одну выборку данные двух декад апреля и 1-й декады мая, благодаря чему более четко фиксируется последующий многолетний интервал резкого снижения концентраций фосфатов в этом районе

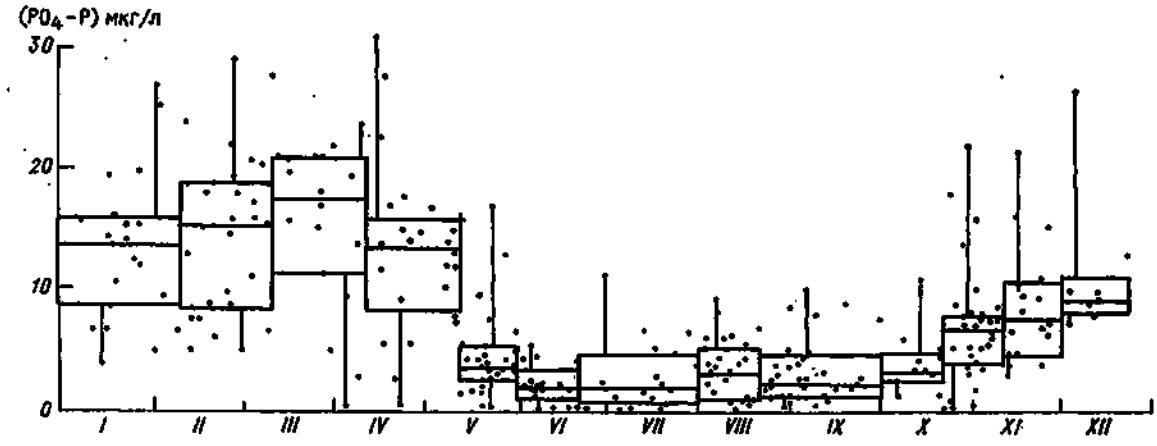


Рис. 9.8. Годовой ход фосфатов на поверхности Готландской впадины (ст. BY 15) по данным всех лет 1958—1985 гг. и квартили распределения сформированных выборок.

моря. Аналогичным образом данные 1-й декады апреля были сгруппированы с мартовской выборкой как близкие по разбросу и дополняющие ее. Точно такой же подход был использован при объединении данных в последней декаде октября и в начале ноября, чтобы более четко показать осеннее возрастание содержания фосфатов. Этот фенологический принцип позволяет более точно определить временны́е границы сезонных изменений гидрохимических показателей в многолетнем плане. Однако объединение данных следует проводить с известной осторожностью и учитывать годовой цикл данного элемента.

Количество и временны́е границы выборок формируются одинаково для всех горизонтов верхнего слоя 0—30 м, что позволяет дать анализ вертикального распределения характеристик и их внутригодовой изменчивости по многолетним данным. Однако это требует одинаковой обеспеченности наблюдениями всех стандартных горизонтов, что достигается интерполяцией данных на эти горизонты.

Для верхнего слоя Балтийского моря, где внутригодовой диапазон изменчивости является определяющим, с помощью приведенных выше статистических характеристик гидрохимических показателей для 5 базовых станций, расположенных в основных районах моря, были рассмотрены особенности пространственной изменчивости и получены многолетние оценки вертикального распределения.

В глубоководной части Балтийского моря на горизонтах ниже галоклина, как правило, внутригодовая изменчивость гидрохимических показателей не проявляется. Доминирующая изменчивость в их динамике — межгодовая, обусловленная эпизодическими поступлениями североморских вод через Датские проливы. В периоды между этими поступлениями длительностью в несколько лет происходит постепенная трансформация вод, при этом в наиболее глубоких впадинах содержание кислорода быстро уменьшается вплоть до его полного исчезновения и образования сероводорода. Процесс смены окислительно-восстановительных (аэробных на анаэробные) условий приводит к резкому изменению всех гидрохимических показателей и особенно биогенных элементов. В связи с этой спецификой гидрохимических условий статистический анализ данных для глубин 60 м и ниже проводился по нескольким временны́м диапазонам:

— за весь период регулярных наблюдений (1958—1986 гг.);

— по межгодовым циклам, обусловленным крупномасштабными обновлениями глубинных вод;

— по интервалам каждого цикла в случаях смены окислительно-восстановительных условий (для станций BY 5 (62), BY 15 (37) и BY 29, где это характерно);

— по двум группам данных: первая — с кислородными условиями, вторая — с сероводородными условиями.

Выделение межгодовых циклов, обусловленных вторжениями североморских вод, проведено по результатам анализа временны́х рядов солености и содержания кислорода на придонных горизонтах для станций BY 5 (62), BY 9 (46), BY 15 (37) и BY 29. С учетом пространственных различий были определены даты начала и конца каждого межгодового цикла (см. гл. 12) и для каждого цикла рассчитаны квантильные характеристики распределения данных по всех гидрохимическим элементам, на основании которых рассмотрены многолетние изменения в данных районах моря.

Для станций, на которых в межгодовых циклах происходит смена аэробных условий на анаэробные и последние имеют достаточную длительность и обеспеченность данными (станции BY 15 (37) и BY 29), были рассчитаны квантильные характеристики для каждого интервала времени, в течение которого наблюдалось наличие кислорода у дна или отмечалось развитие сероводородных условий. Такой подход, выполненный для всех гидрохимических элементов, обеспечил более детальное исследование характера межгодовых и многолетних изменений гидрохимических условий в придонном слое. Поскольку для большинства элементов диапазоны значений, характерные для аэробных и анаэробных условий, резко различаются, были рассчитаны интегральные характеристики для двух групп таких данных по станциям BY 5 (62), BY 15 (37) и BY 29.

10. ОБЩАЯ ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МОРЯ И ФАКТОРЫ, ФОРМИРУЮЩИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Балтийское море — один из крупнейших в мире водоемов с солоноватой водой, режим которых отличается неустойчивостью [458], проявляющейся в многолетней изменчивости гидрологических условий. Для Балтийского моря эта неустойчивость усиливается его специфическими особенностями — полузамкнутым характером, значительным материковым стоком и относительной мелководностью. Даже небольшие изменения термохалинных характеристик и, вследствие этого, гидрохимических условий оказывают влияние на функционирование биотических компонентов экосистемы, что в свою очередь приводит к заметным изменениям отдельных звеньев биогеохимического круговорота вещества. В этом заложены естественные причины формирования многолетней изменчивости гидрохимических условий.

В последние десятилетия природная неустойчивость усугубляется антропогенным воздействием, обусловленным социально-экономическими процессами в густонаселенном водосборном бассейне моря с высоко развитой промышленностью и интенсивным сельским и лесным хозяйством. Однако относительный вклад природных и антропогенных факторов в формирование современного гидрохимического состояния все еще до конца не выяснен и является главной проблемой современных исследований Балтийского моря (см. гл. 8).

10.1. Внешние факторы, формирующие специфику гидрохимического режима

Специфика гидрохимического режима Балтики обусловлена уникальным комплексом факторов, определяющих поступление, распространение и трансформацию вещества в море. Важнейшие из них — ограниченный водообмен с Северным морем и мощный материковый сток, формирующий устойчивую стратификацию водных масс с затрудненным вертикальным обменом между слоями, а также сложная геоморфологическая структура моря [129].

Положительный водный баланс и затрудненность водообмена с Северным морем в сочетании с пространственной «разнесенностью» поступления речного стока и североморских вод являются факторами, определяющими наличие двух постоянных генетически различных водных масс — опресненного верхнего слоя и осолоненного глубинного слоя, которые разделяет слой скачка солености (галоклин), затрудняющий вертикальный обмен.

В гидрохимическом режиме верхнего слоя имеются особенности, обусловленные географическим положением моря, размещением внешних источников поступления вещества, спецификой сезонной стратификации и биотических факторов, но в целом динамика условий подобна динамике, характерной для фотического слоя и других морей данной климатической зоны.

Уникальность гидрохимических условий в глубинном слое определяется ограниченным водообменом Балтийского моря с Северным, осуществляемым через узкие и мелководные Датские проливы (прол. Большой Бельт, через который в основном происходит водообмен, имеет среднюю глубину 12 м, среднюю ширину 36 км [13]).

Отток воды из Балтики вызван разностью уровней Балтийского и Северного морей и различием плотностей распресненных балтийских и тяжелых соленых североморских (каттегатских) вод [129]. При умеренных и слабых ветрах в Датских проливах образуется компенсационное придонное противотечение как входной поток. При сильных восточных ветрах в проливах во всей толще вод наблюдаются выходные течения из Балтики, а при сильных западных ветрах — входные потоки, которые в виде штормовых нагонов (при определенных условиях) приводят к вторжениям в глубинный слой моря больших объемов соленых вод. Однако такие вторжения, обновляющие воды глубинного слоя Балтийского моря, происходят крайне нерегулярно и редко [13, 334].

Из-за наличия постоянного галоклина, препятствующего аэрации глубинных вод за счет атмосферы, североморские воды, поступающие при водообмене в нормальных условиях или при штормовых нагонах, являются главным источником пополнения запасов кислорода в глубинном слое. Ограниченность и нерегулярность аэрации приводят к постоянному дефициту кислорода, расходуемого на окисление органического вещества в глубинном слое обширной части глубоководной зоны Балтики [129, 225, 494].

Особенности гидрохимического режима глубинного слоя определяются не только поступлением, но и распространением североморских вод в Балтике, осуществляемом в зависимости от их плотности и объема адвекцией течениями на разных глубинах. Пути распространения североморских вод в Балтийском море обусловлены морфометрической структурой моря, дно которого представляет собой цепь глубоководных впадин, разделенных высокими порогами и соединенных узкими желобами. Особенности рельефа дна, отражающие естественное разделение Балтийского моря на районы (рис. 10.1), представлены на продольном профиле дна для восточного и западного разрезов (рис. 10.2).

В большинстве нагонных ситуаций в Датских проливах, повторяющихся почти ежегодно, а иногда и по несколько раз в год, североморские воды, трансформируясь по пути следования, поступают в Балтику либо по галоклину (в юго-западной части моря [85]), либо в верхнюю часть слоя под ним (в Центральном бассейне [85]), образуя активный глубинный слой [129, 309, 479].

Глубже в глубоководных впадинах расположен инертный придонный слой, обновление которого возможно лишь при редких мощных вторжениях высокосоленых североморских вод [37, 129, 225, 239, 494]. Запасы кислорода, поступающие при этом, довольно быстро иссякают, и у дна образуется, распространяясь в толще глубинных вод, сероводород, токсичный для придонной фауны.

При смене аэробных условий на анаэробные (изменение окислительно-восстановительных условий) происходит перестройка комплекса физических, физико-химических и биохимических процессов, проте-

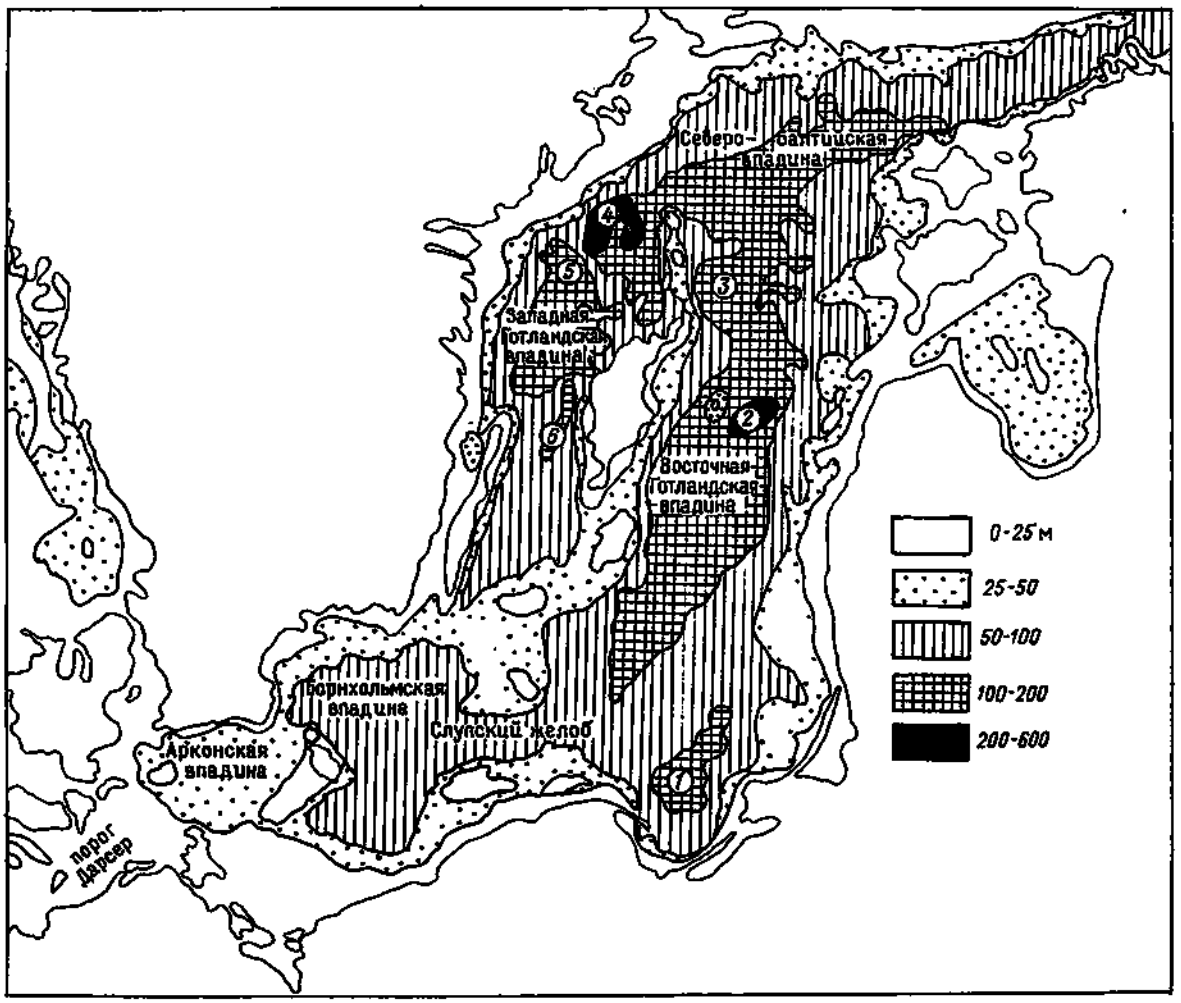


Рис. 10.1. Морфометрическое строение открытой части Балтийского моря [366].
Впадины: *1* — Гданьская; *2* — Готландская; *3* — Форе; *4* — Ландсортская; *5* — Норчепинг; *6* —Карлсё.

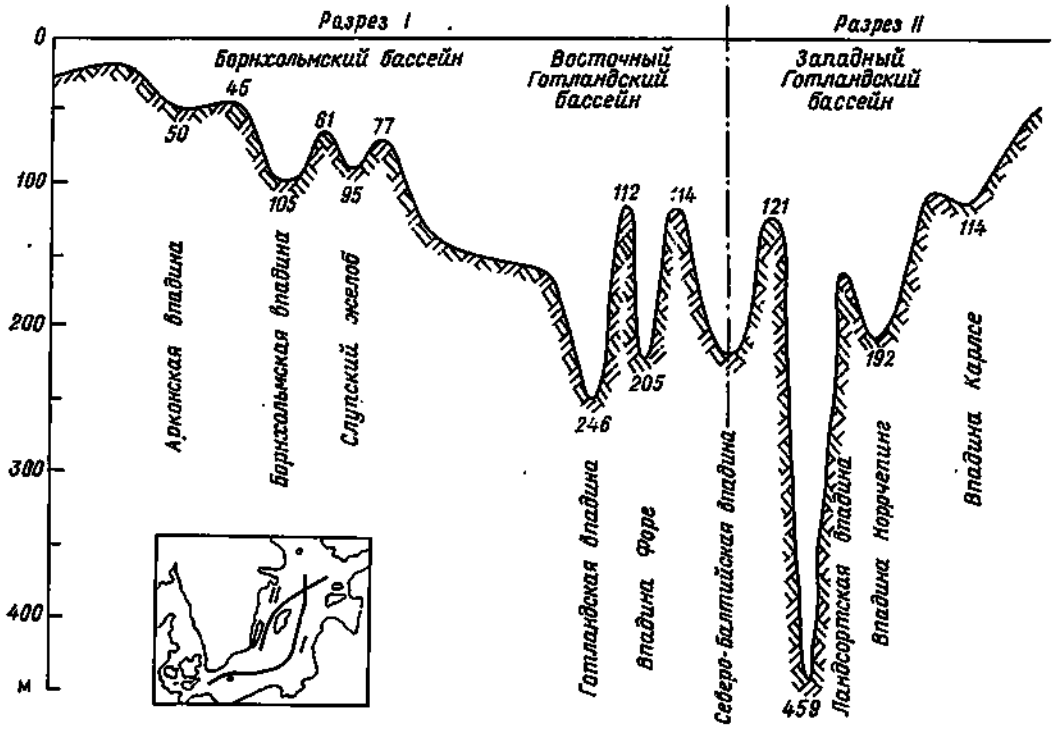


Рис. 10.2. Продольные профили дна Балтийского моря по восточному (I) и западному (II) разрезам [129].

кающих у дна, с накоплением в результате этого в глубинных водах значительного количества фосфатов и аммония [129, 225, 494]. При подъеме этих вод, вызванном распространением североморских притоков, особенно по активному глубинному слою [113], содержание минеральных соединений азота и фосфора в верхнем слое увеличивается [113, 129, 225, 494], хотя при вхождении в кислородсодержащие воды часть фосфатов, вступая в процессы адсорбции на взвешенных веществах, возвращается вновь в глубинный слой [113], а аммоний окисляется до нитратов [54]. Таким образом, анаэробные воды являются одним из источников включения дополнительного количества биогенов в биологический цикл [129, 225].

Балтийское море относительно мелководно и на глубинный слой (считая от верхней границы галоклина) приходится 34 % общего объема вод открытой части моря[1], однако специфика протекающих в нем процессов в значительной мере определяет интенсивность и сбалансированность круговорота вещества в Балтийском море в целом [72].

Особенность гидрохимического режима в прибрежной зоне, площадь которой относительно невелика (см. рис. 10.1), связана с ее ролью приемника и трансформатора материкового стока и поступающим с ним антропогенным загрязнением в виде органического вещества, биогенных элементов и токсичных веществ. Биогеохимический круговорот вещества в этой зоне определяется цикличностью продукционно-деструкционных процессов и специфическими физико-химическими процессами, происходящими при смешении речных и морских вод.

Прибрежная зона выполняет функцию биофильтра по отношению к открытой части моря, поскольку большая часть биогенных веществ, поступающих с береговым стоком, включается в локальный биогеохимический круговорот в теплый период года. Однако «буферная» роль этих зон в холодный период значительно меньше и поступление антропогенного загрязнения в открытое море определяется сложными гидродинамическими процессами, пока еще мало изученными [129]. Генетически прибрежная зона и открытое море объединены одной водной массой — верхним слоем глубоководной части моря.

В данной монографии «...под режимом моря понимается статистический ансамбль состояний системы гидрологических, метеорологических и гидрохимических процессов в диапазонах межгодовой, сезонной, синоптической и внутрисуточной изменчивости» [13, 64]. С этой точки зрения различие гидрохимического режима верхнего и глубинного слоев моря выражается в доминирующих в них диапазонах временно́й изменчивости показателей: в верхнем слое наибольшее значение имеет внутригодовая изменчивость, а в глубинном, к которому мы относим и галоклин, преобладает специфический вид межгодовой цикличности изменений, обусловленной апериодическим обновлением вод этого слоя в результате мощных вторжений североморских вод.

[1] Рассчитано по данным объемов глубинных вод в главных глубоководных бассейнах — Арконском, Борнхольмском и Центральном [225] и общего объема вод собственно Балтики (12710 км³) [13].

10.2. Общая характеристика гидрохимических условий в верхнем слое моря и определяющие их факторы

Верхний слой Балтийского моря формируется при смешении вод материкового стока с балтийскими водами, и влияние этого фактора отражается не только в пониженной солености, но и в химическом составе вод. Наибольшее значение для гидрохимического режима и биологических условий Балтики имеют относительная обедненность верхнего слоя фосфором и минеральными соединениями азота и высокое содержание кремния, гидрокарбонатов и гумуса. Эти особенности обусловлены составом пород (известняк и гранит) и болотистыми и подзолистыми почвами водосбора впадающих рек [1, 19, 225].

Изолированность верхнего слоя по отношению к глубинному усугубляет его бедность биогенами, которые в значительной мере выводятся с продуцируемым органическим веществом (в виде взвешенных веществ) в галоклин и в толщу вод под ним, где аккумулируются и регенерируются. Верхний слой Балтики беднее фосфатами и нитратами, чем продуктивный слой Баренцева и Северного морей [19].

Хотя Балтийское море считается малопродуктивным по потенциалу первичной продукции по сравнению с другими районами Мирового океана [1, 129], содержание растворенного органического вещества в нем (по данным нейтральной окисляемости) примерно в 5 раз выше, чем в океане [1], что связано с обогащением вод гумусом, поставляемым речным стоком.

10.2.1. Факторы, формирующие изменчивость гидрохимических параметров

Сезонная изменчивость является главной чертой гидрохимического режима верхнего слоя моря и определяет не только наибольший размах колебаний показателей, но и динамику вертикальной структуры, и пространственные различия, которые в многолетнем плане могут быть типизированы на основе сезонных статистических характеристик [105].

Временная изменчивость гидрохимических характеристик в верхнем слое Балтики включает и все другие масштабы, но они связаны с сезонными условиями, и, как правило, не рассматриваются в отрыве от них. Это относится и к внутрисуточным колебаниям, которые определяются суточным ходом солнечной радиации, регулирующей интенсивность фотосинтеза, и к короткопериодной (синоптической) изменчивости, формируемой как гидродинамическими процессами синоптического масштаба, так и неоднородностью протекания продукционно-деструкционных процессов. Межгодовые и многолетние изменения большинства гидрохимических показателей с большой амплитудой сезонных колебаний (биогенных элементов, в частности) исследуются также для определенных интервалов года, чаще всего — для холодного периода, когда гидрохимические условия относительно устойчивы.

Годовая ритмика, формируемая цикличностью продукционно-деструкционных процессов — наиболее характерная черта гидрохимических условий в фотическом слое морей зоны умеренного климата.

Географическое положение и климатические условия Балтийского моря накладывают свой отпечаток на особенности формирования биологических циклов и определяемой ими сезонной динамики гидрохимических показателей. Влияние годового хода речного стока и водообмена в Датских проливах также вносит свой дополнительный вклад, больший или меньший в зависимости от природы показателя и района моря. Однако наибольшая специфика сезонной изменчивости гидрохимических характеристик в Балтийском море — в проявлении ее закономерностей не только в поверхностных водах, но и во всей толще ВКС.

Сезонным изменениям на больших глубинах верхнего слоя Балтийского моря нередко не придается значения, по-видимому, по аналогии с другими водоемами, где в толще вод под термоклином сохраняется неизменным зимний уровень значений гидрохимических показателей. В Балтийском море, однако, наличие галоклина усложняет сезонную стратификацию и повышает ее значение для гидрохимических и гидробиологических процессов.

Для выявления относительной роли гидродинамических и биологических процессов в сезонной динамике гидрохимических показателей был проведен статистический анализ формирования термической стратификации на основе многолетних рядов данных 1958—1986 гг. (см. п. 10.2.2), результаты которого дополняют соответствующие материалы вып. 1 монографии по Балтийскому морю [13].

Сопоставление позволило сделать заключение об отсутствии влияния термоклина в начальной фазе его развития, о сильном экранирующем эффекте в период его максимальной интенсивности и о связи последующих сезонных изменений с заглублением термоклина и осенней конвекцией.

Факторы, определяющие снабжение верхнего слоя веществом: речной сток, перенос из глубинного слоя, а в близкой к Датским проливам мелководной зоне — притоки североморских вод, также оказывают влияние на сезонную динамику гидрохимических показателей, поскольку сами подвержены этой изменчивости.

Так, влияние речного стока отмечается в период его максимума, который с учетом времени, необходимого для распространения в море «волны» распреснения, в северной части моря наблюдается в июне—августе, в остальных районах — позднее и проявляется слабее.

Для биогенных элементов, концентрации которых в летний период минимальны, данный фактор формирует аномально высокие значения летних максимумов годового хода, как, например, по заключению Юрковского, для фосфора в мае—июне в отдельные годы в Готландской впадине [111, 114, 117].

Значительное влияние речного стока на годовой ход концентраций кремния отмечается в Северной Балтике, где оно «наслаивается» на сезонные изменения, определяемые фотосинтезом диатомовых [112]. Для одного из гидрохимических показателей (щелочности), как показало сопоставление статистических данных, внутригодовая изменчивость полностью определяется годовым ходом речного стока, а не влиянием фотосинтеза на карбонатное равновесие, как предполагалось ранее [14].

Сезонные изменения, связанные с речным стоком, сопровождаются уменьшением солености в поверхностном слое моря, поскольку в ее годовом ходе роль годовой ритмики распреснения является определяющей (см. 10.2.3). Соответственно влияние водообмена с Северным морем, проявляющееся вблизи Датских проливов, сопровождается повышением солености и наиболее значительно в период усиления притока североморских вод — осенью и зимой [13].

Роль вертикального переноса вещества в верхний слой и галоклина из его последующего перераспределения, осуществляемого путем турбулентного и конвективного перемешивания, определяется сезонной динамикой этих процессов, усиливающихся в осенне-зимних условиях. Сезонные изменения гидрохимических характеристик в холодный период года, обусловленные главным образом интенсивностью гидродинамических процессов, коррелируют с переносом соли в верхний слой. Подъемы глубинных вод в связи с адвекцией по галоклину североморских вод также играют роль факторов повышения содержания биогенных веществ в верхнем слое, и сезонный характер их проявления в различных районах моря отражается в годовом ходе солености и температуры. В целом сезонные изменения вертикального обмена с галоклином отражаются в вертикальной структуре солености в ВКС, который становится гомогалинным лишь в холодный период года. В связи с этим, как и для термических условий, было проведено статистическое исследование годового хода солености и ее вертикальной структуры в верхнем слое (см. п. 10.2.3), результаты которого дополняют соответствующие материалы вып. 1 [13].

Пространственные различия гидрохимических показателей в верхнем слое Балтийского моря определяются тремя главными факторами: 1) фазовыми сдвигами в годовых циклах элементов — смещением в направлении с юга на север временных границ биологических сезонов, что вызывает наибольшие количественные различия; 2) пространственной «разнесенностью» районов формирования водных масс различного генезиса, находящихся под наибольшим влиянием речного стока на северо-востоке и притоков североморских вод в юго-западной части моря; 3) локальными особенностями — глубиной района, спецификой гидродинамических процессов.

Предложенные для статистического исследования годового хода методы обеспечили возможность определения средних многолетних временных границ (с точностью до декады) для характерных фаз годового цикла и выделение интервалов года с наибольшими пространственными различиями гидрохимических показателей вследствие фазовых сдвигов. С целью иллюстрации величины и направленности (с юга на север) таких различий для некоторых параметров были специально рассчитаны статистические характеристики для временных интервалов, на которые приходятся фазовые смещения. Пространственные различия, обусловленные внешними факторами — влиянием речного стока и притоков североморских вод, относительно невелики и представлены на основе сопоставления статистических характеристик для интервалов года с наиболее устойчивыми химико-биологическими условиями.

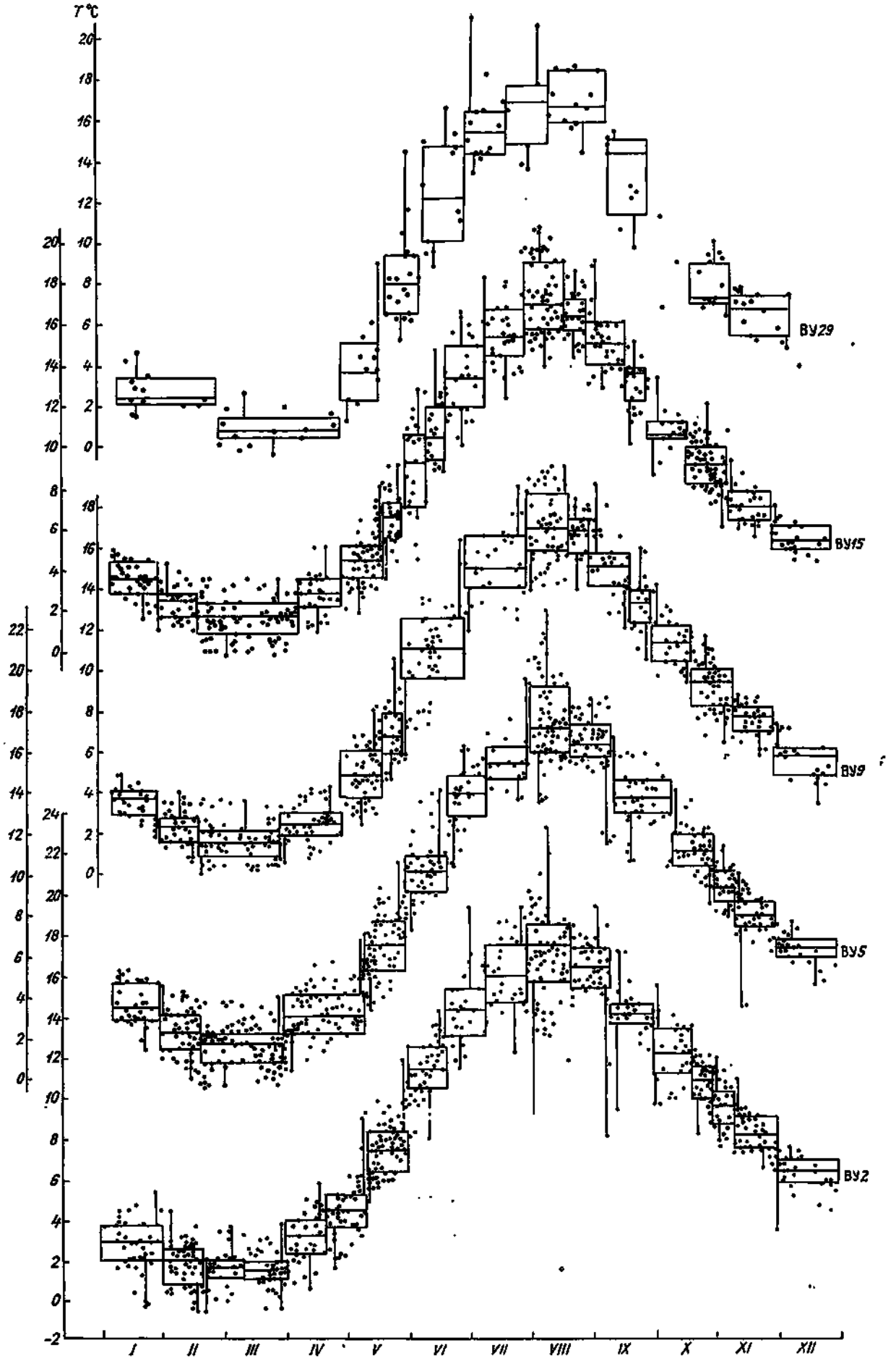


Рис. 10.3. Годовой ход температуры воды на поверхности различных районов Балтийского моря по данным квартильного анализа.

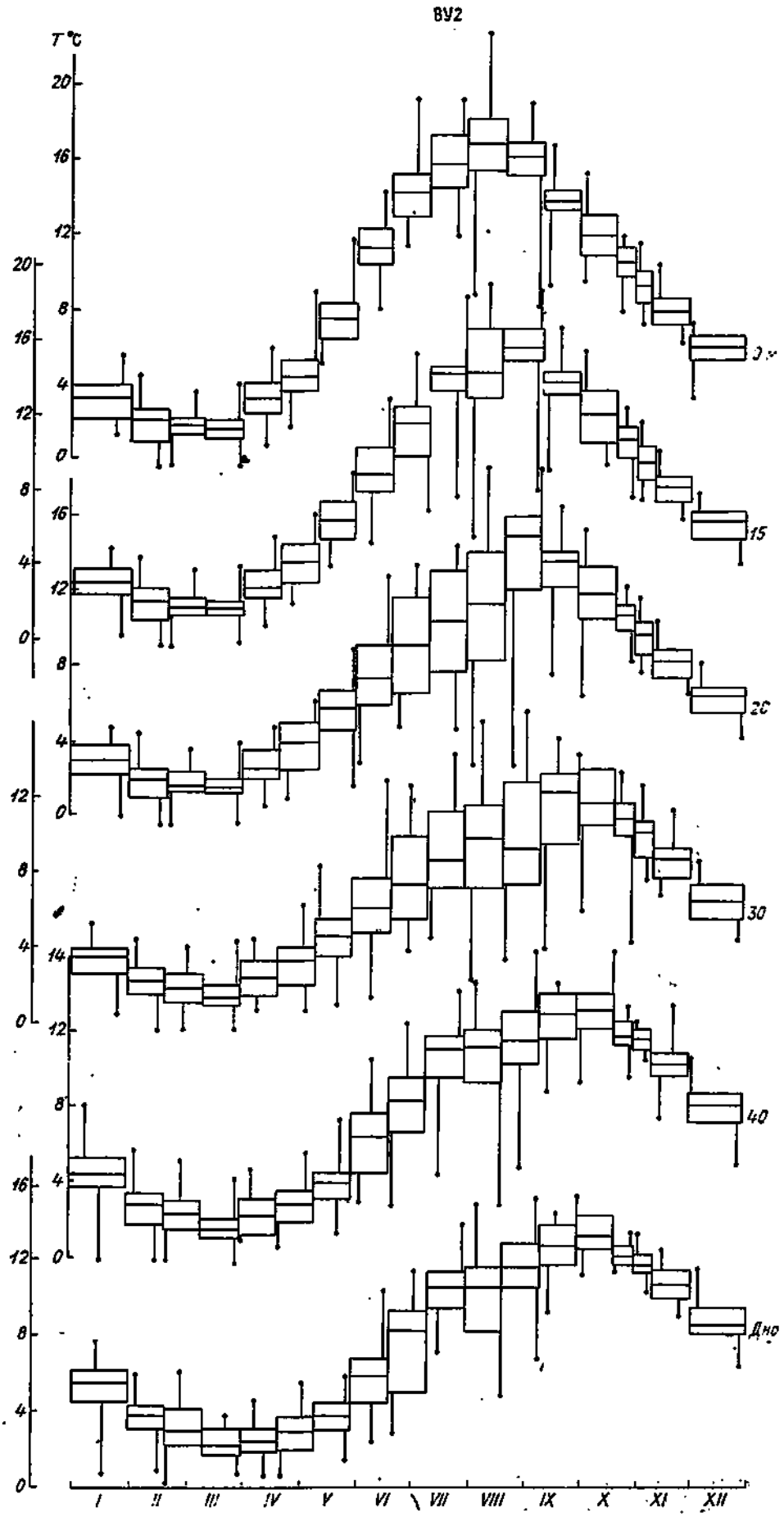
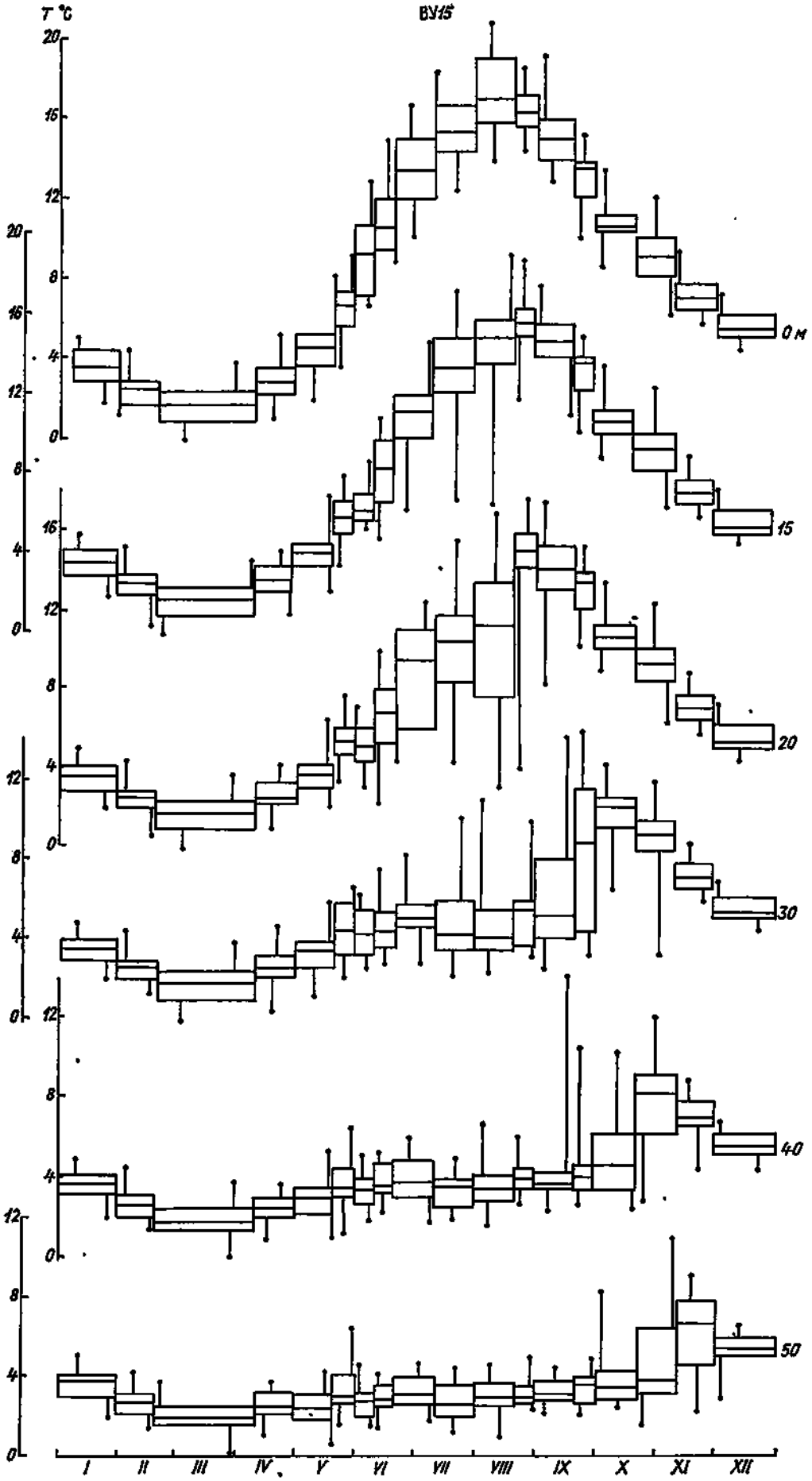
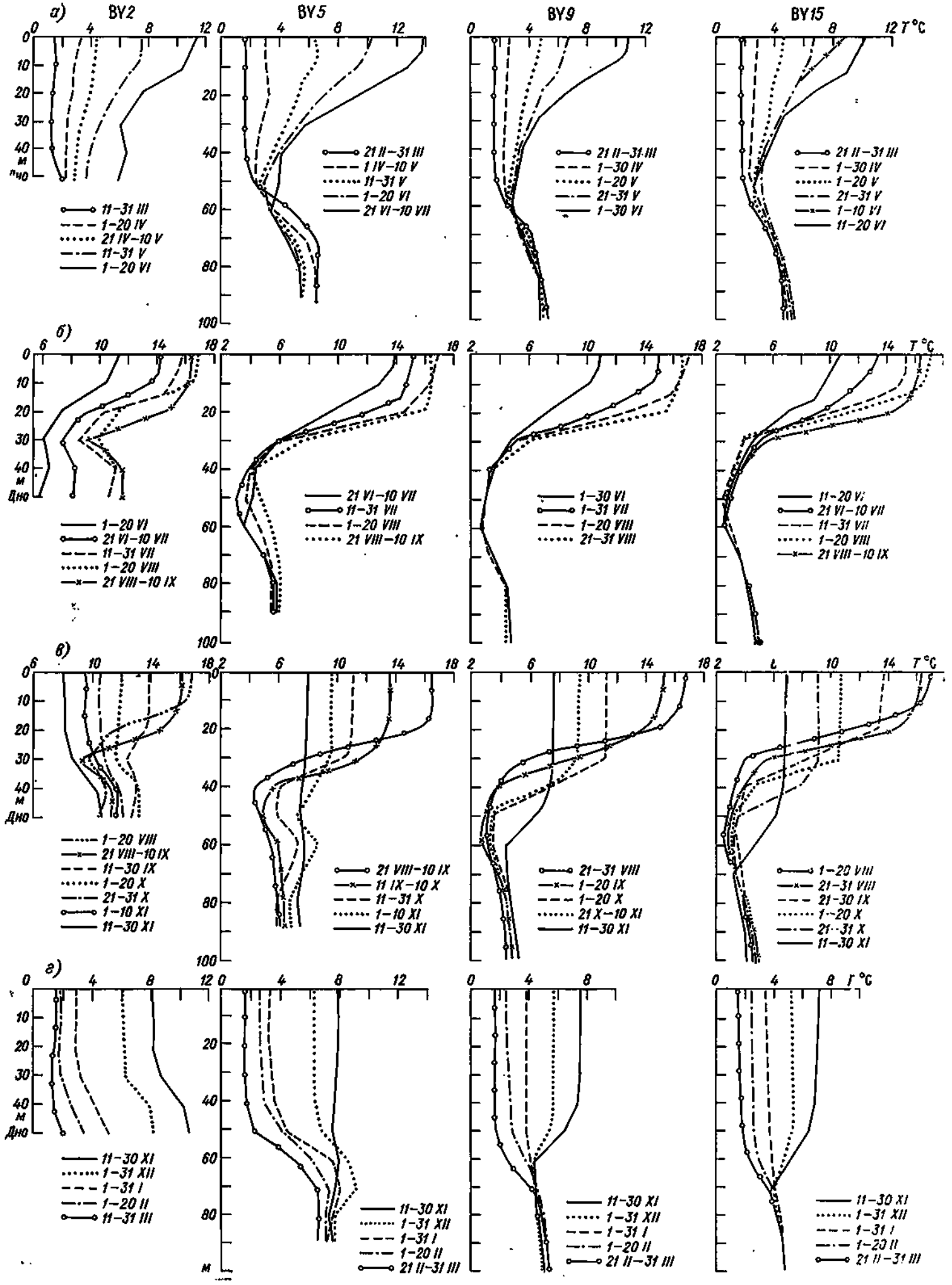


Рис. 10.4. Годовой ход температуры воды на различных глубинах Арконской (ст. BY 2) и



Готландской (ст. BY 15) впадин по данным квартильного анализа.


а)
ВУ2
ВУ5
ВУ9
ВУ15
T °C
м
Дно
11–31 III
1–20 IV
21 IV–10 V
11–31 V
1–20 VI
21 II–31 III
1 IV–10 V
11–31 V
1–20 VI
21 VI–10 VII
1–30 IV
1–20 V
21–31 V
1–30 VI
1–10 VI
11–20 VI
б)
1–20 VI
21 VI–10 VII
11–31 VII
1–20 VIII
21 VIII–10 IX
11–20 VI
1–30 VI
1–31 VII
1–20 VIII
21–31 VIII
в)
1–20 VIII
21 VIII–10 IX
11–30 IX
1–20 X
21–31 X
1–10 XI
11–30 XI
21 VIII–10 IX
11 IX–10 X
11–31 X
1–10 XI
11–30 XI
21–31 VIII
1–20 IX
1–20 X
21 X–10 XI
11–30 XI
г)
11–30 XI
1–31 XII
1–31 I
1–20 II
11–31 III
21 II–31 III

10.2.2. Термические условия

Главная черта термических условий в верхнем слое Балтийского моря — образование и разрушение трехслойной термической структуры — обусловлена ограничением толщи вод, где годовой ход температуры формируется лишь соответствующей ритмикой солнечной радиации, тонким поверхностным слоем в 15—20 м [13, 37, 97]. Глубже происходит трансформация сезонных изменений температуры, закономерности которых определяются не только теплообменом с атмосферой, но и изменениями вертикального обмена между теплыми поверхностными и холодными глубинными водами. Обусловленные данными факторами годовые колебания температуры определяют ее изменчивость только до галоклина [13, 39, 97].

Кривые годового хода температуры воды на стандартных горизонтах верхнего слоя были рассчитаны Маттеусом [347] с помощью регрессионного метода для 9 станций, представляющих главные районы Балтийского моря, по данным 1902—1973 гг., а по массиву данных 1956—1985 гг. — Н. Н. Михайловым [13].

Годовой ход температуры для станций, используемых в качестве опорных в данной работе, представлен в виде ансамбля квантилей распределения данных за 1959—1985 гг., сгруппированных в неэквидистантные выборки с преобладающим шагом в 2 декады (рис. 10.3 и 10.4). Для иллюстрации обеспеченности натурными данными и аргументации их объединения в выборки эти данные представлены на диаграммах в виде точек.

Наиболее существенные пространственные различия годового хода температуры на поверхности Балтийского моря связаны с различием продолжительности и сроков наступления экстремумов на юге и в северной части (см. рис. 10.3), в то время как пространственные различия средних многолетних значений экстремумов невелики.

Период минимума температуры в южных и центральных районах моря продолжается немногим более месяца — с последней декады февраля по март, а в северных — на месяц дольше — по апрель. Весенний прогрев верхнего слоя происходит с постепенно возрастающей интенсивностью, наибольшей в 3-й декаде мая — 1-й декаде июня. По оценкам на основе сравнения средних многолетних характеристик в этот период года температура воды возрастает в среднем за декаду на 1,6—1,8 °С на юге (ст. BY 5), на 2,2—2,4 °С в центральной части (ст. BY 15) и на 2,8—3,0 °С — в северной (ст. BY 29). Максимальные значения температуры для всех районов открытой части моря наблюдаются в течение первых двух декад августа (на севере — весь месяц). Осеннее выхолаживание на севере моря происходит интенсивнее, чем на юге, и составляет соответственно 1,8 и 1,2 °С за декаду. Разброс значений, характеризуемый интерквартильным расстоянием, составляет 2,0—2,5 °С (на севере моря несколько больше), общий размах осенних значений достигает 6—7 °С.

Годовой ход температуры воды наблюдается в толще вод до глубины 15 м. На глубине более 15 м на севере и в центральной части моря и глубже 20 м в южной части происходит трансформация рассмотренного годового хода, обусловленная сезонными изменениями условий вертикального теплообмена и динамикой вод: уменьшается размах годового хода за счет снижения максимальных значений и возрастания минимальных, сдвигается на более поздний срок наступление периода максимальных значений температуры воды (см. рис. 10.4).

Сезонные изменения вертикальной термической структуры для опорных станций представлены вертикальными профилями температуры, построенными по медианным значениям сезонных выборок для стандартных горизонтов слоя 0—100 м (рис. 10.5). (Для северной ст. BY 29 малое количество данных не позволило дать столь же подробную картину.) Полный набор вертикальных профилей для года в целом иллюстрирует внутригодовую изменчивость термической структуры в верхнем слое моря на основе всех характеристик квантильного анализа на примере Готландской (рис. 10.6) и Арконской впадин (рис. 10.7).

В период с января (в Арконском бассейне — с сентября) по апрель водные массы в глубоководной части моря по термическим условиям разделяются на ВКС низких температур и более теплый глубинный слой, в отличие от остального времени года, когда соотношение температур в этих слоях обратное.

С началом весеннего прогрева поверхностных вод в апреле в глубоководных районах моря в течение одной—двух декад происходит некоторое увеличение температуры ВКС при сохранении вертикальной структуры водных масс, типичной для зимних условий, а затем характерно монотонное уменьшение температуры с глубиной при общем прогреве толщи вод верхнего слоя (см. рис. 10.5). Такая динамика вертикального распределения температуры указывает на весьма интенсивный вертикальный теплообмен, достаточно медленно ослабевающий со временем и по глубине на протяжении апреля—мая.

Формирование сезонного термоклина начинается преимущественно в 1-й декаде июня в юго-западных районах (станции BY 2 и BY 5) и юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и на декаду позднее в центральных и северных глубоководных районах (станции BY 15 и BY 29). Зарождение термоклина происходит в этот период в слое 10—20 м. Интенсивность прогрева и перестройки термической структуры возрастает в направлении с юга на север: разность значений температуры на глубинах 10—20 м по средним показателям составляет около 2 °С в южной, 3 °С в центральной и 4 °С в северной частях моря.

Дальнейший летний прогрев приводит к формированию устойчивой трехслойной термической структуры в верхнем слое моря: гомотермического поверхностного слоя высоких температур, термоклина и холодного промежуточного слоя, расположенного между сезонным термоклином и постоянным галоклином. В юго-западной части моря возникновение этой структуры наблюдается преимущественно начиная с последней декады июня, в юго-восточной части Готландской котловины — в начале июля,

Рис. 10.5. Вертикальное распределение температуры воды (медианные значения) в Арконской (ст. BY 2), Борнхольмской (ст. BY 5) впадинах, в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и в Готландской впадине (ст. BY 15) в различные периоды года.

а — весенний прогрев; *б* — формирование и максимальное развитие термоклина; *в* — разрушение термоклина; *г* — осенне-зимнее охлаждение.

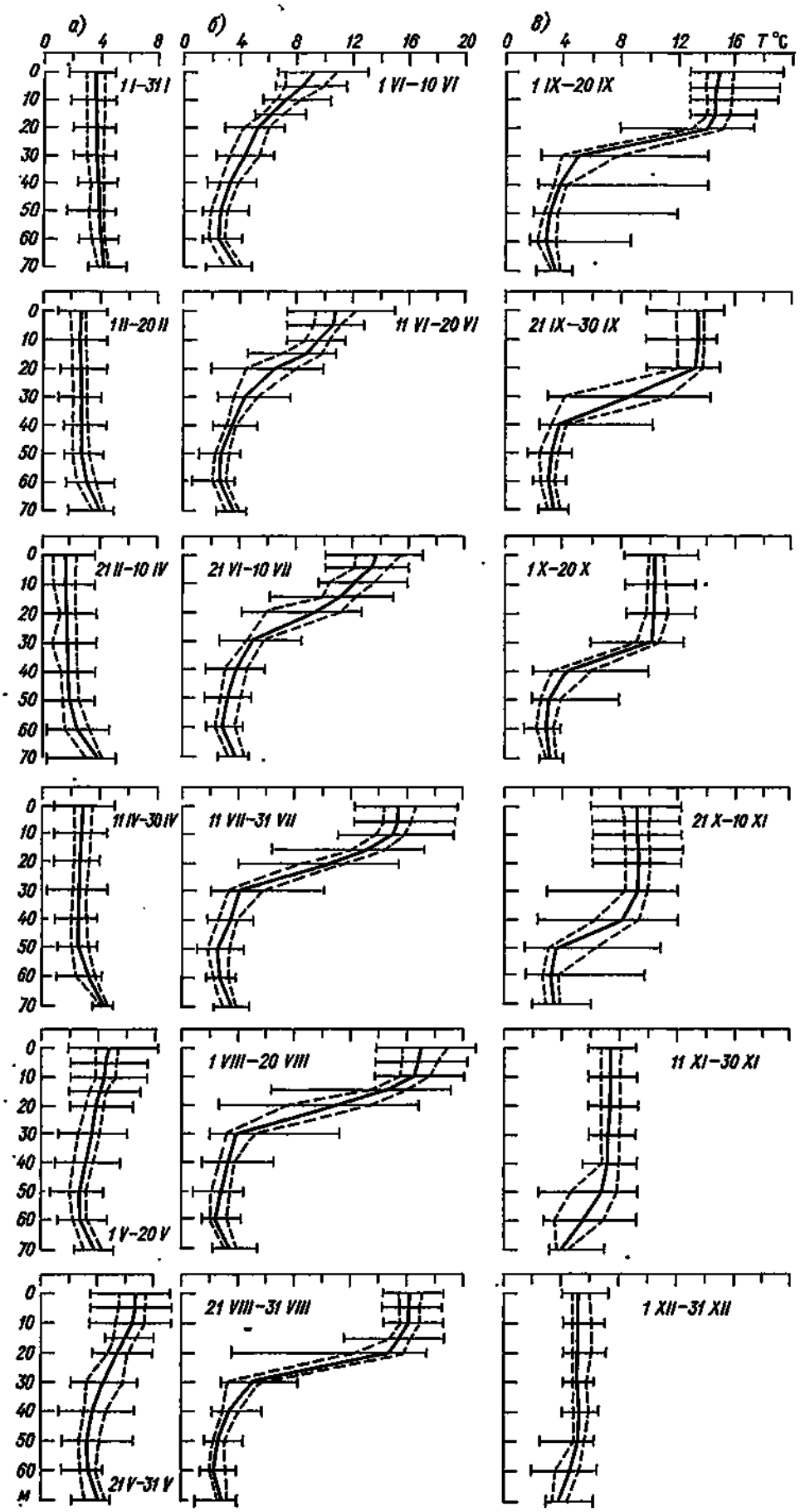


Рис. 10.6. Вертикальное распределение квартильных оценок температуры воды в верхнем слое Готландской впадины (ст. BY 15) в различные периоды года.

а — зима — начало весеннего прогрева; *б* — развитие летнего термоклина; *в* — разрушение термоклина — осенне-зимнее охлаждение.

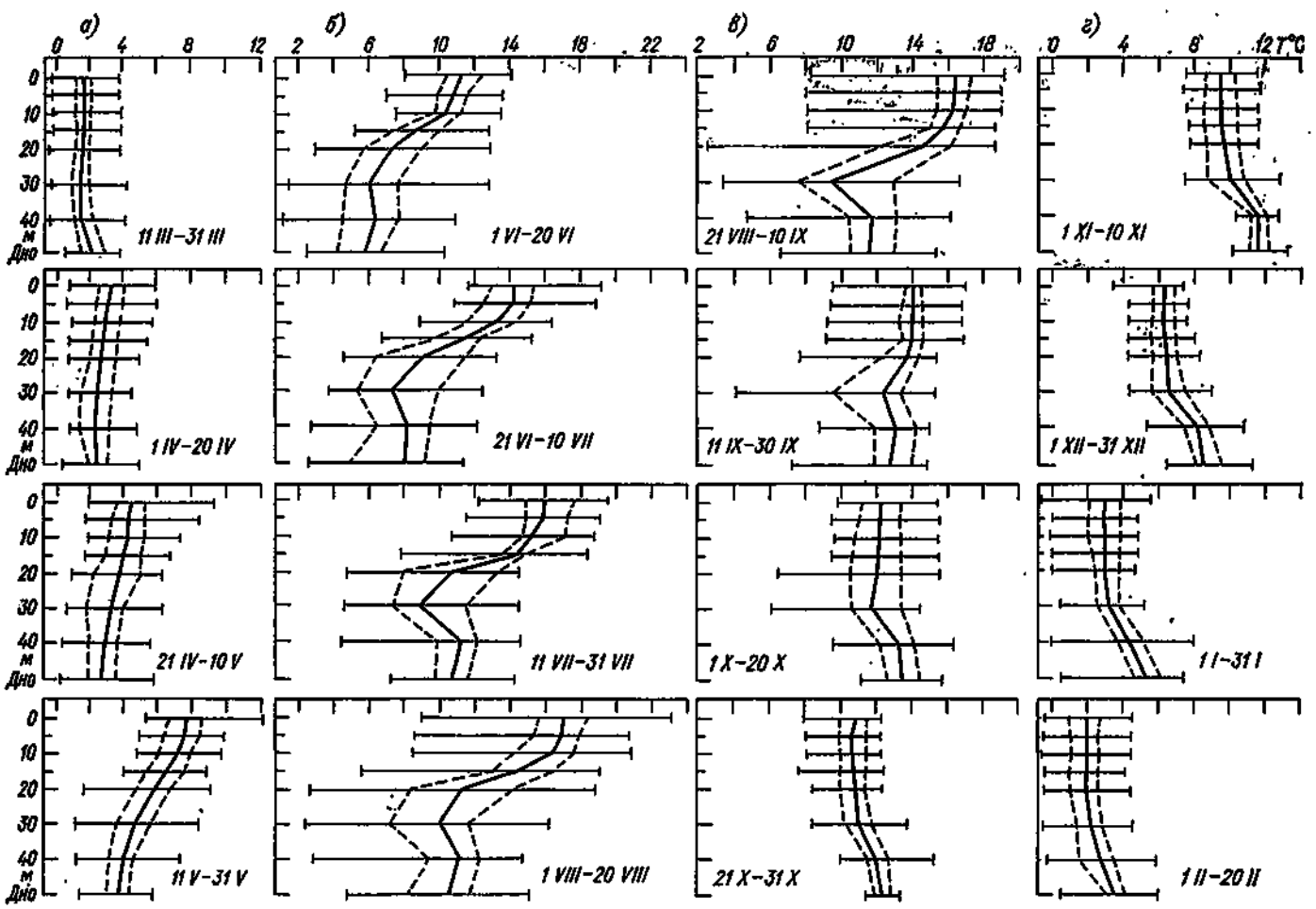


Рис. 10.7. Вертикальное распределение квартильных оценок температуры воды в Арконской впадине (ст. BY 2) в различные периоды года.

а — весенний прогрев; *б* — развитие летнего термоклина; *в* — разрушение термоклина; *г* — осень — зима.

в центральной ее части — во 2-й декаде июля, в северных районах моря — в последней декаде июля.

Трехслойная термическая структура водных масс верхнего слоя достигает предельного развития в период максимальных значений температуры воды в гомотермическом слое моря: на юге и в центре собственно Балтики — в 1-й — 2-й декадах августа, на севере — со 2-й декады августа по 2-ю декаду сентября. В это время года толщина теплого однородного слоя повсеместно увеличивается до 15 м, а температура воды в нем составляет в среднем 17 °С. Термоклин в этот период года наблюдается на глубине 15—30 м. Перепад температуры в нем составляет около 5 °С в Арконском бассейне и от 10 до 12 °С в остальной части моря (по медианным значениям).

С последней декады августа, а на севере во 2-й декаде сентября начинается осенняя перестройка вертикальной структуры водных масс: охлаждение гомотермического слоя, развитие конвективных движений, приводящее к увеличению толщи ВКС с постепенным выравниванием в нем температурных условий.

В Арконской впадине (ст. BY 2) в период с конца августа до 3-й декады октября в верхнем (0—20 м) и придонном (30 м — дно) слоях наблюдаются разнонаправленные процессы: ВКС охлаждается в результате теплообмена с атмосферой, а глубинный слой нагревается, по-видимому, преимущественно за счет адвекции теплых вод из проливов.

Борнхольмский бассейн имеет свою специфику осенней перестройки, связанную, во-первых, с более высоким расположением галоклина и более тонким холодным промежуточным слоем, и, во-вторых, с влиянием адвекции североморских вод. В период с августа по ноябрь здесь наблюдается повышение температуры в галоклине за счет поступления теплых североморских вод преимущественно в слое 50—60 м (см. рис. 10.5 и 10.8).

Дальнейшее охлаждение изменяет соотношение температуры в слоях: верхний слой становится холоднее глубинного. В Арконском бассейне, где зимнее перемешивание охватывает толщу вод до дна, с декабря по март происходит постепенное выравнивание температуры почти во всем столбе воды (см. рис. 10.5, ст. BY 2).

10.2.3. Режим солености

Режим солености вод верхнего слоя Балтийского моря (до первичного галоклина) формируется при взаимодействии с океаном (обмен через Датские проливы с Северным морем), с материком (речной сток, поставляющий в море не только пресную воду, но и содержащиеся в ней органические и минеральные вещества), с атмосферой (атмосферные осадки, поток соли на границе раздела вода—воздух, фазовые переходы вода—лед), а также в результате вертикального обмена с глубинным слоем моря.

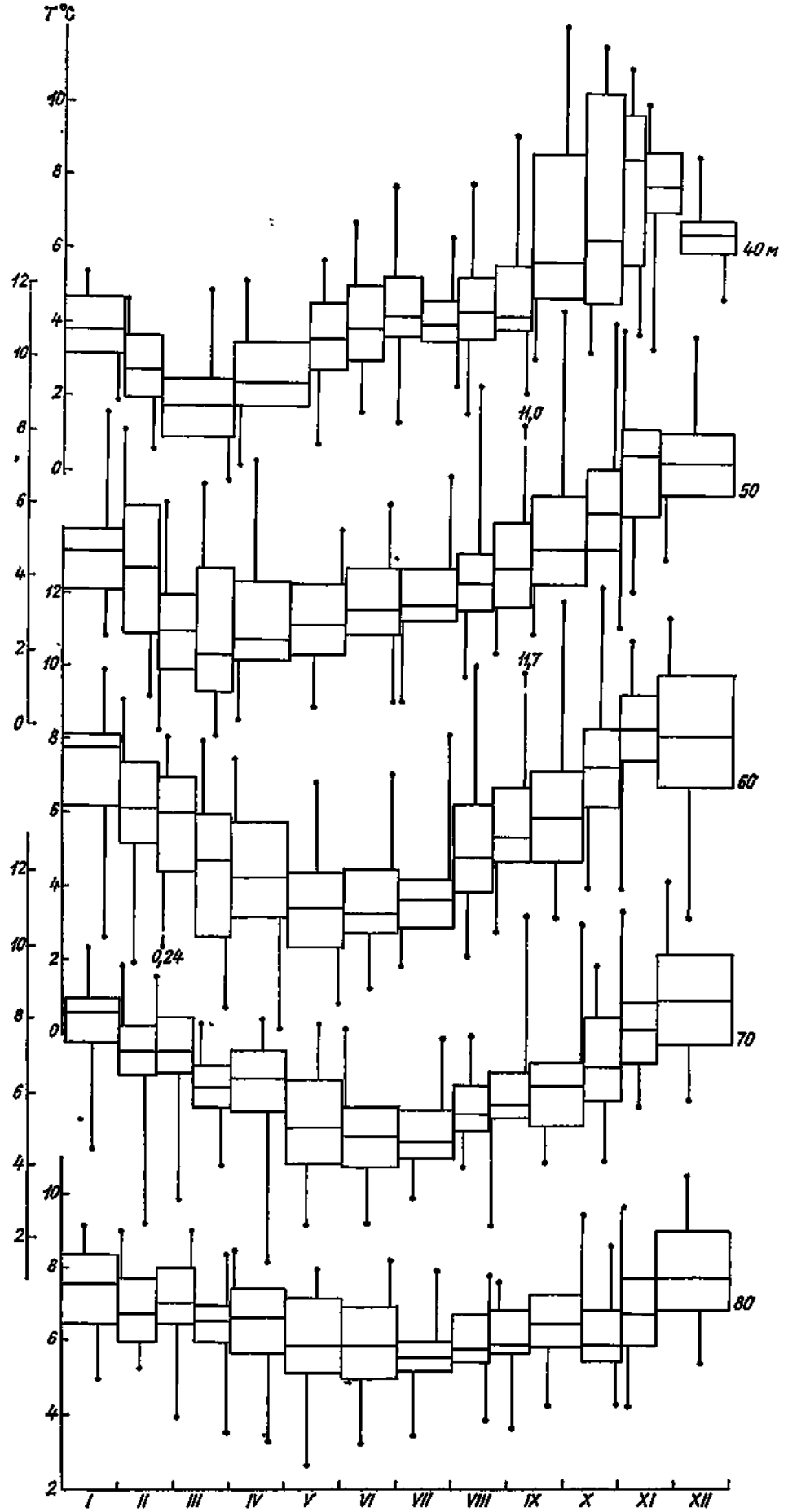


Рис. 10.8. Годовой ход температуры воды на разных глубинах Борисхольмской впадины (ст. BY 5).

Сезонная изменчивость является характерной особенностью режима солености верхнего слоя Балтийского моря, хотя размах изменений относительно невелик. Наибольшие его значения характерны для северной части моря (0,9‰), где преобладает влияние речного стока, и в зоне, прилегающей к Датским проливам (0,7‰), где годовой ход солености формируется в значительной степени под воздействием сезонных колебаний водообмена с Северным морем.

Годовой ход солености в поверхностных водах в северной и центральной частях моря, а также в глубоководных зонах более южных районов в наибольшей степени определяется годовыми изменениями речного стока. Доминирующая роль этого фактора иллюстрируется сопоставлением внутригодовой изменчивости стока Невы и солености на поверхности (рис. 10.9) [53].

Пространственные различия годового хода солености на поверхности для основных районов Балтики представлены на рис. 10.10 в виде ансамбля квантилей распределения многолетних данных (1959—1985 гг.), сгруппированных в выборки без сглаживания формы в виде кривой.

Годовой ход солености на поверхности в открытой части Балтийского моря характеризуется длительными периодами относительно высокой и низкой солености и короткими переходными интервалами. Высокие значения наблюдаются в период осенне-зимнего осолонения, обусловленного развитием конвективных движений и ветро-волнового перемешивания вод верхнего слоя с более солеными водами галоклина. В северных и центральных районах моря развитию зимнего осолонения способствует льдообразование, минимальный сток рек в январе—марте и увеличение испарения с поверхности моря. В южных районах повышение солености связано с увеличением притока североморских вод через Датские проливы зимой и влиянием осенне-зимних штормовых нагонов. На фоне этих периодов выделяются четкие максимумы солености:

Район	Станция	Период максимума солености	Соленость, ‰
Арконский бассейн	BY 2	Декабрь—10 января	8,6
Борнхольмский бассейн	BY 5	Январь	7,9
Юго-восточный район	BY 9	Март — 10 апреля	7,8
Готландская впадина	BY 15	Март — 10 апреля	7,7
Северная часть	BY 29	Январь—март	7,4

В характерном для Балтийского моря снижении солености в направлении с юга на север в зимних условиях наибольшие горизонтальные градиенты отмечаются при переходе от Арконского к Борнхольмскому бассейну (рис. 10.11) из-за усиления влияния в этот период притоков североморских вод в Датских проливах.

В конце марта—начале апреля в результате увеличения пресного стока в море и преобладания осадков над испарением соленость на поверхности открытых районов моря начинает снижаться. В апреле этому процессу способствует таяние льда, а в мае—июле — большой сток рек. Наибольшее влияние весеннего распреснения на уровень солености характерно для северной части моря, и поэтому в апреле—мае наибольшие градиенты в пространственном распределении солености наблюдаются при переходе от северной к центральной части моря.

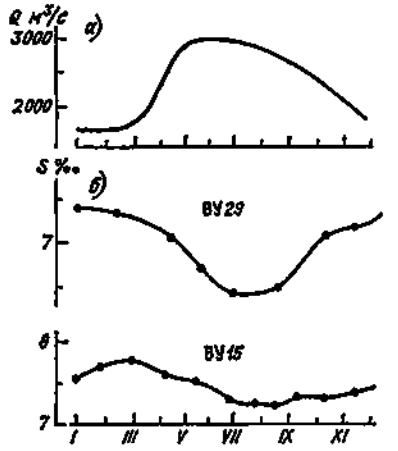


Рис. 10.9. Годовой ход стока Невы по средним месячным данным [53] (*а*) и солености по медианным значениям выборок (см. рис. 10.10) (*б*) на поверхности северной (ст. BY 29) и центральной (ст. BY 15) частей Балтийского моря.

Дальнейшее увеличение объема речных вод, поступающих в море в течение весеннего половодья, а также возрастание количества осадков при уменьшении испарения приводит к формированию общего периода низкой солености, который заканчивается осенью в связи с развитием конвективного и ветроволнового перемешивания. Увеличению солености вод в этот период способствует возрастание испарения с поверхности моря и сокращение активного поступления в море речных вод.

Годовой ход солености, рассмотренный для поверхности, повсеместно наблюдается и в слое 0—20 м с уменьшением его амплитуды с глубиной (рис. 10.12). Однако в отдельных фазах годового цикла наблюдаемые в поверхностном слое сезонные изменения охватывают бóльшую толщу вод. В холодный период повышение солености в результате конвективного и ветро-волнового перемешивания происходит во всей толще верхнего слоя до галоклина. Весной, когда повсеместно формируется поверхностный распресненный слой с монотонным возрастанием солености с глубиной, мощность его на севере и в центре моря достигает 40—50 м и уменьшается к югу до 30 м в Борнхольмском бассейне и 20 м в Арконском (см. рис. 10.12). Однако дальнейшее снижение солености в июне и в последующие месяцы не проявляется глубже 20 м. Это связано с развитием термоклина, препятствующего перемешиванию распресненных поверхностных вод с глубинными. По мере осеннего выхолаживания вод, заглубления и разрушения термоклина соленость вод под ним уменьшается в результате смешивания с поверхностными водами, менее солеными и более теплыми.

Наряду с этими сезонными изменениями, общими для всей толщи вод верхнего слоя, в теплый период года в холодном промежуточном слое между термоклином и галоклином (30—50 м) наблюдается довольно четкое повышение солености, обусловленное подтоками североморских вод по глубинному слою (до Слупского порога) и по галоклину (за ним) и подъемом их к поверхности [85]. В Арконской впадине адвекция этих подтоков приводит к особенно сильному (с 12 до 13‰) возрастанию

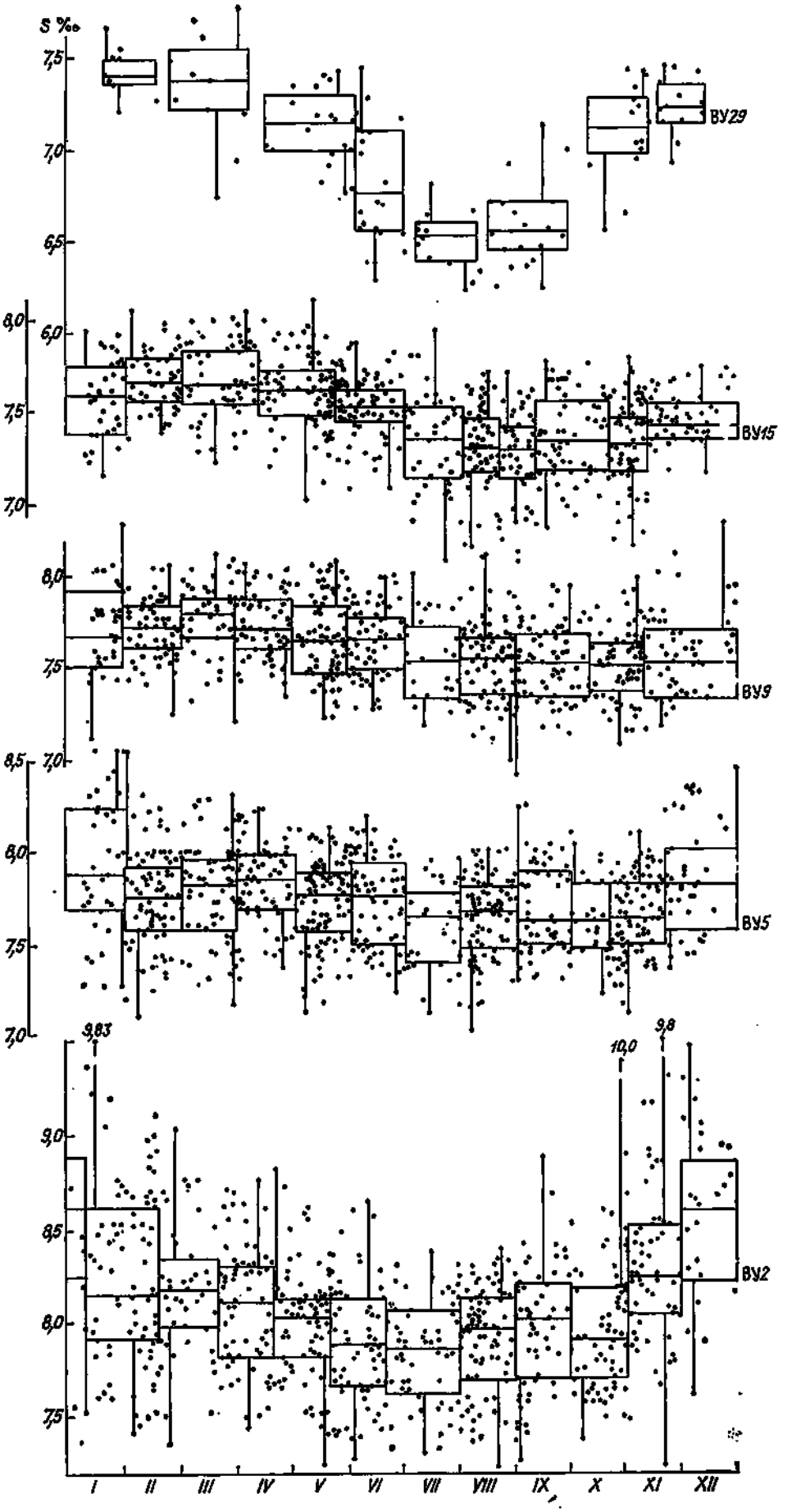


Рис. 10.10. Годовой ход солености на поверхности различных районов Балтийского моря по данным квартильного анализа.

солености на глубине 40 м в конце июня—июле и поддержанию этого уровня до декабря, когда дальнейшее повышение солености уже связано с усилением роли штормовых нагонов в Датских проливах. При этом в июне—июле возрастание солености отмечается и на глубине 30 м и даже (в повышении верхнеквартильных показателей) на глубине 20 м, хотя конкурирующее влияние распреснения здесь все-таки сильнее. Но в сентябре повышение солености сопровождается подъемом глубинных вод и даже выходом их на поверхность, что разделяет летний и осенний периоды распреснения в этом районе.

Эффект летнего повышения солености, отмеченный в Арконской впадине на глубине 40 м, в Борнхольмской наблюдается на границе с галоклином (50 м) также с июня по ноябрь. В июне и сентябре подъемы солености охватывают слой до термоклина (30—50 м) и отражаются даже на глубине 10—20 м в уровне высоких значений солености (верхнеквартильных значений). Устойчивое в многолетнем плане летнее повышение солености отмечается также в Готландской впадине и в северной части моря на глубине 50 м с августа по начало ноября (см. рис. 10.12).

Повышение солености в августе наблюдается повсеместно во всей толще холодных вод под термоклином (30—50 м), но по мере его заглубления прерывается проникновением распресненных поверхностных вод на глубину 30 м во всех районах в сентябре — начале октября, на глубину 40 м в октябре (см. BY 5) или в конце октября — начале ноября (станции BY 15 и BY 29). Комбинация этих сезонных изменений формирует летние максимумы солености, довольно четко выраженные в ее годовом ходе на данных горизонтах: для ст. BY 5 — на глубине 40 м в сентябре, для ст. BY 15 — на глубине 40 м с августа по октябрь (см. рис. 10.12).

В осенне-зимних условиях вертикальные градиенты возрастания солености с глубиной до галоклина так незначительны, что ВКС можно считать гомогалинным. По мере увеличения интенсивности сезонного термоклина возрастание солености в слое от верхней его границы до галоклина усиливается (рис. 10.13). В северной части моря, где летнее распреснение поверхностного слоя наибольшее в период предельного развития термоклина (в августе — сентябре), формируется и сезонный галоклин, усиливая расслоение, связанное с летней термической стратификацией в верхнем слое (рис. 10.14).

Сезонным изменениям подвержено не только вертикальное распределение солености в пределах ВКС, но и положение его нижней границы. Мощность ВКС в Балтийском море возрастает с юга на север. Принято считать, что сезонные изменения толщины ВКС происходят лишь в южной и юго-западной частях моря, а для глубоководной Центральной котловины они не характерны [13, 39]. Однако анализ сезонных изменений вертикальных профилей солености, сформированных из квантилей распределения многолетних данных по выборкам на стандартных горизонтах показывает установление наибольшей мощности ВКС повсеместно в конце зимы, когда достигается и наибольшая его однородность. Другой сезонный эффект наблюдается в ноябре—декабре, когда перемешивание распространяется до границы между ВКС и галоклином, что способствует ее довольно значительному размыванию и уменьшению при этом толщины ВКС.

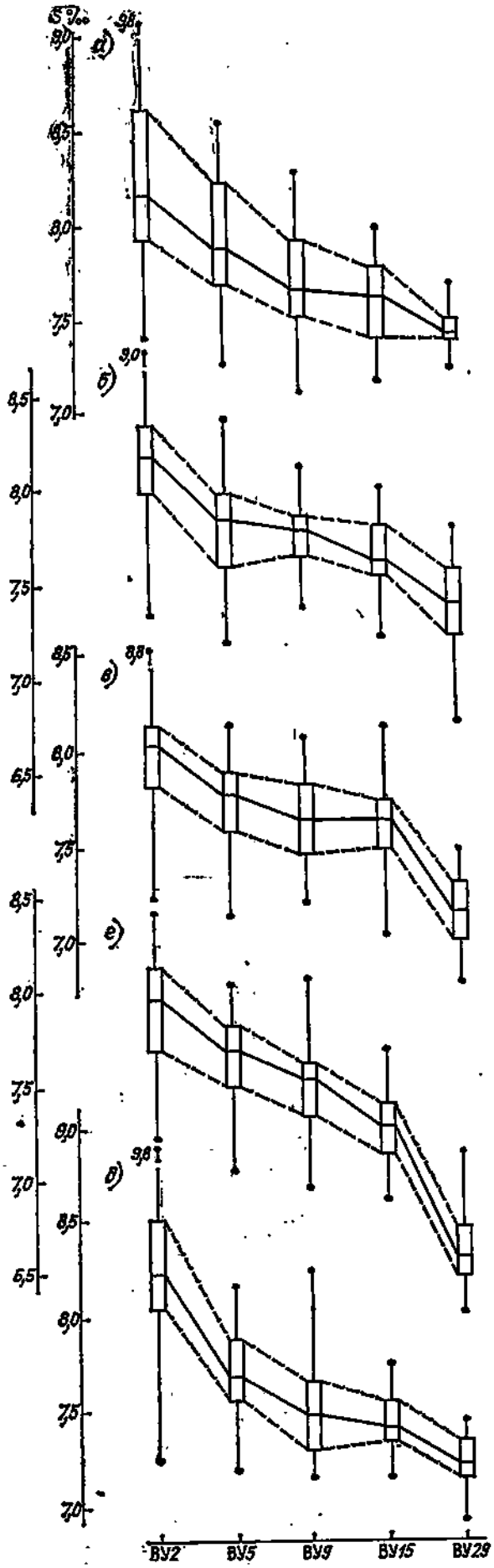


Рис. 10.14. Статистические характеристики солености на поверхности продольного разреза от Арконской впадины (ст. BY 2) до северной части моря (ст. BY 29) в январе (*а*), марте (*б*), апреле—мае (*в*), августе (*г*) и ноябре (*д*).

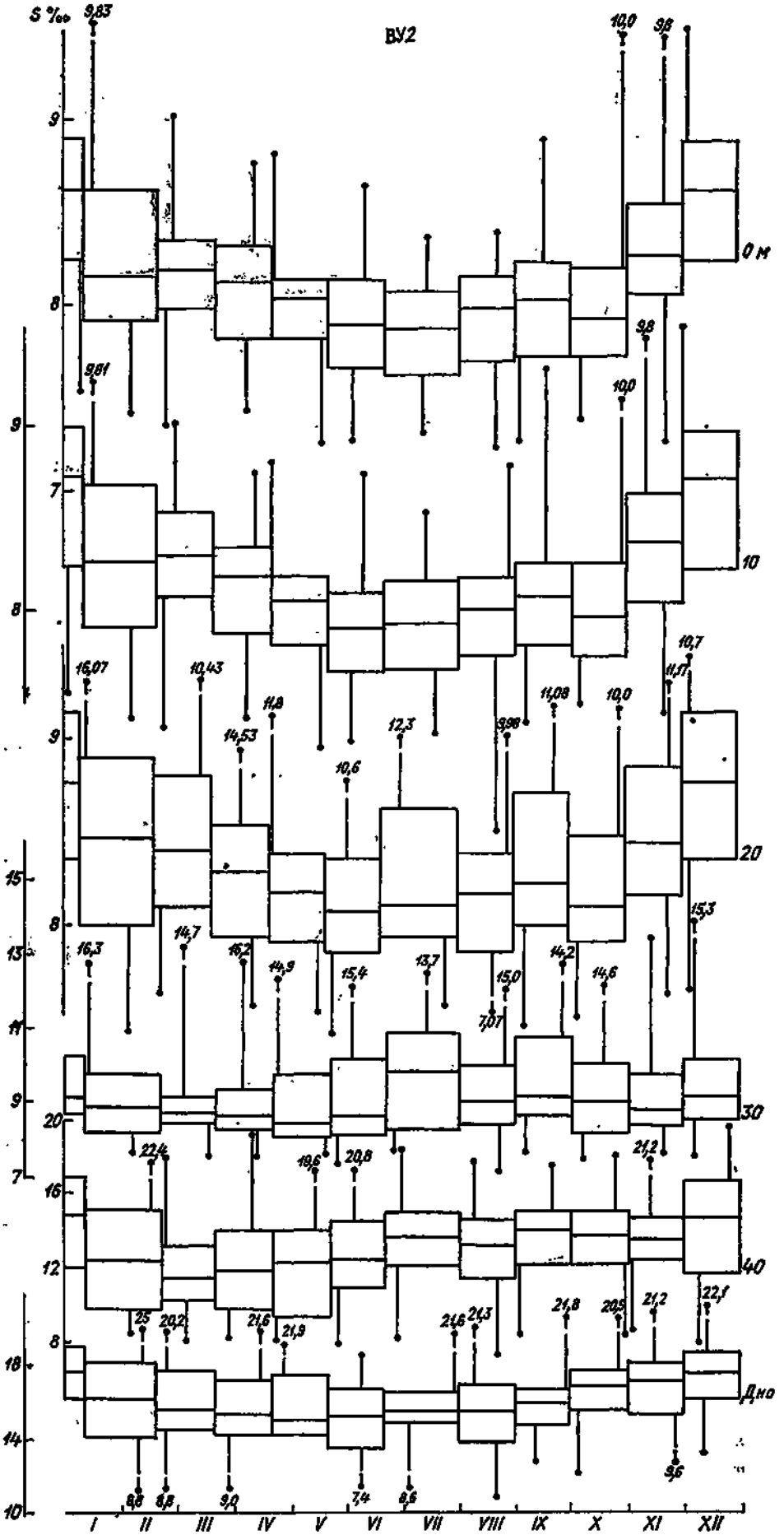


Рис. 10.12. Годовой ход солености в Арконской впадине (ст. BY 2), в верхнем слое Борнхольмской (ст. BY 5) и Готландской (ст. BY 15) впадин и северной части моря (ст. BY 29) по данным квартильного анализа.

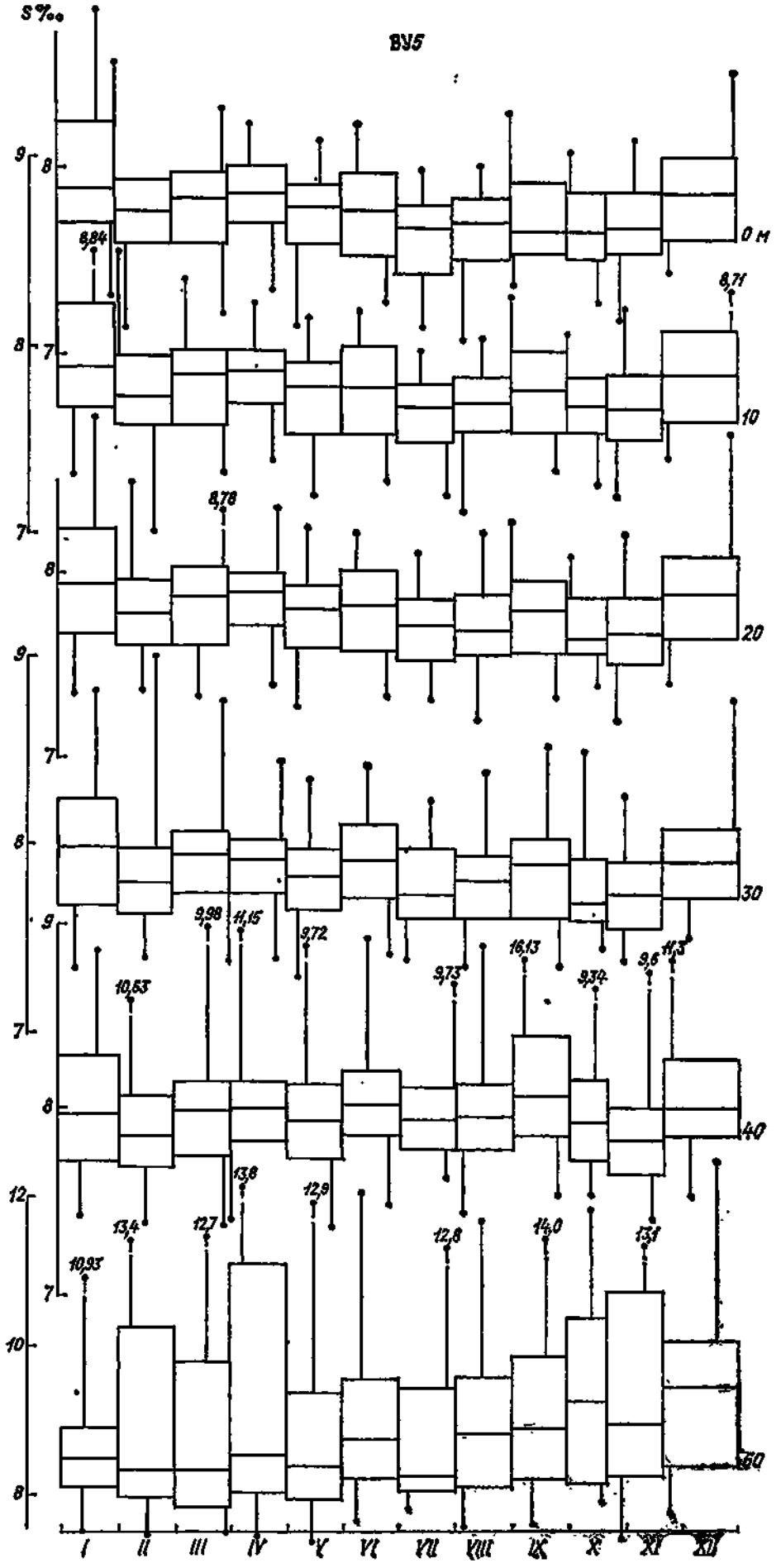


Рис. 10.12.

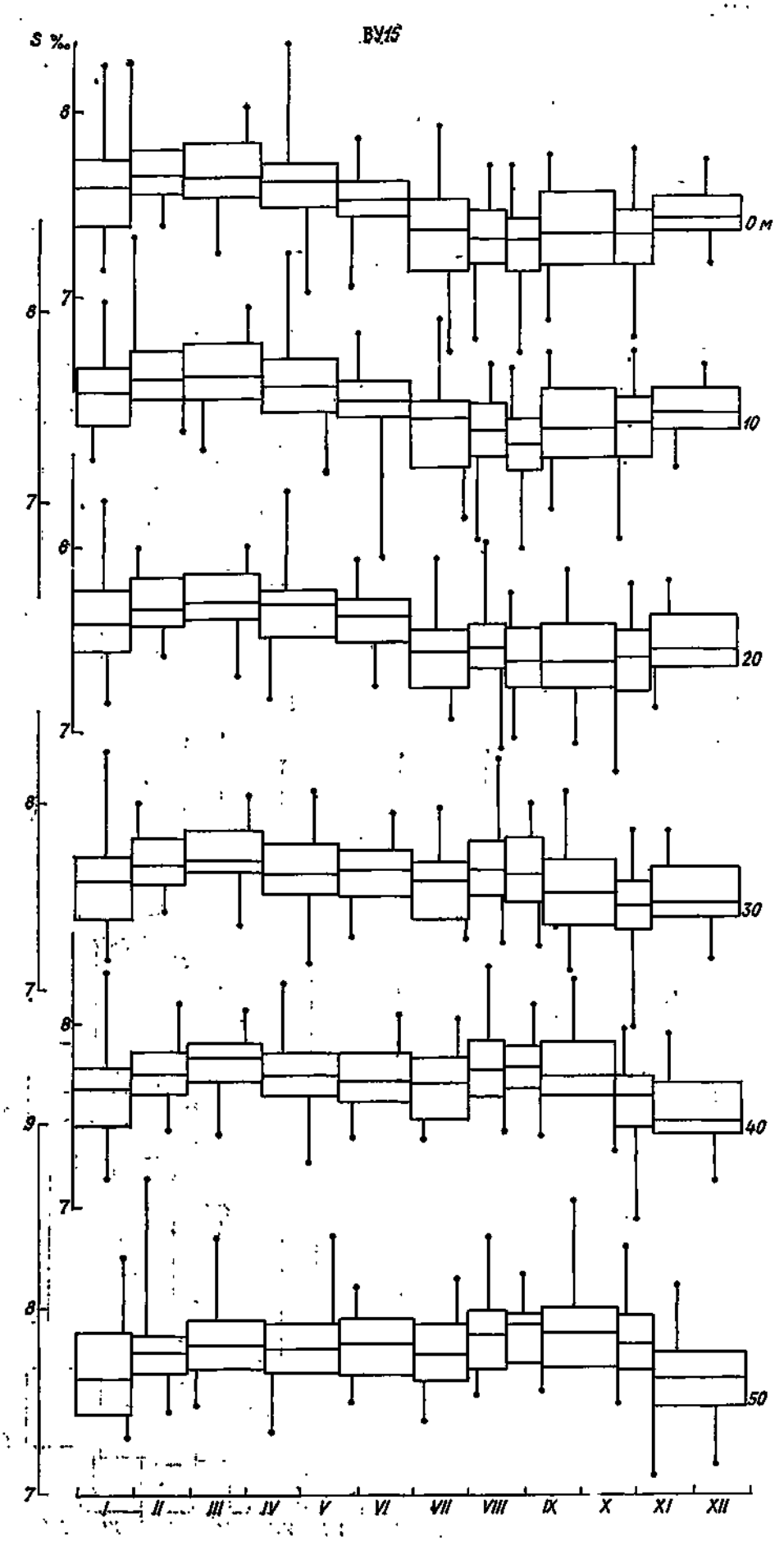


Рис. 10.12.

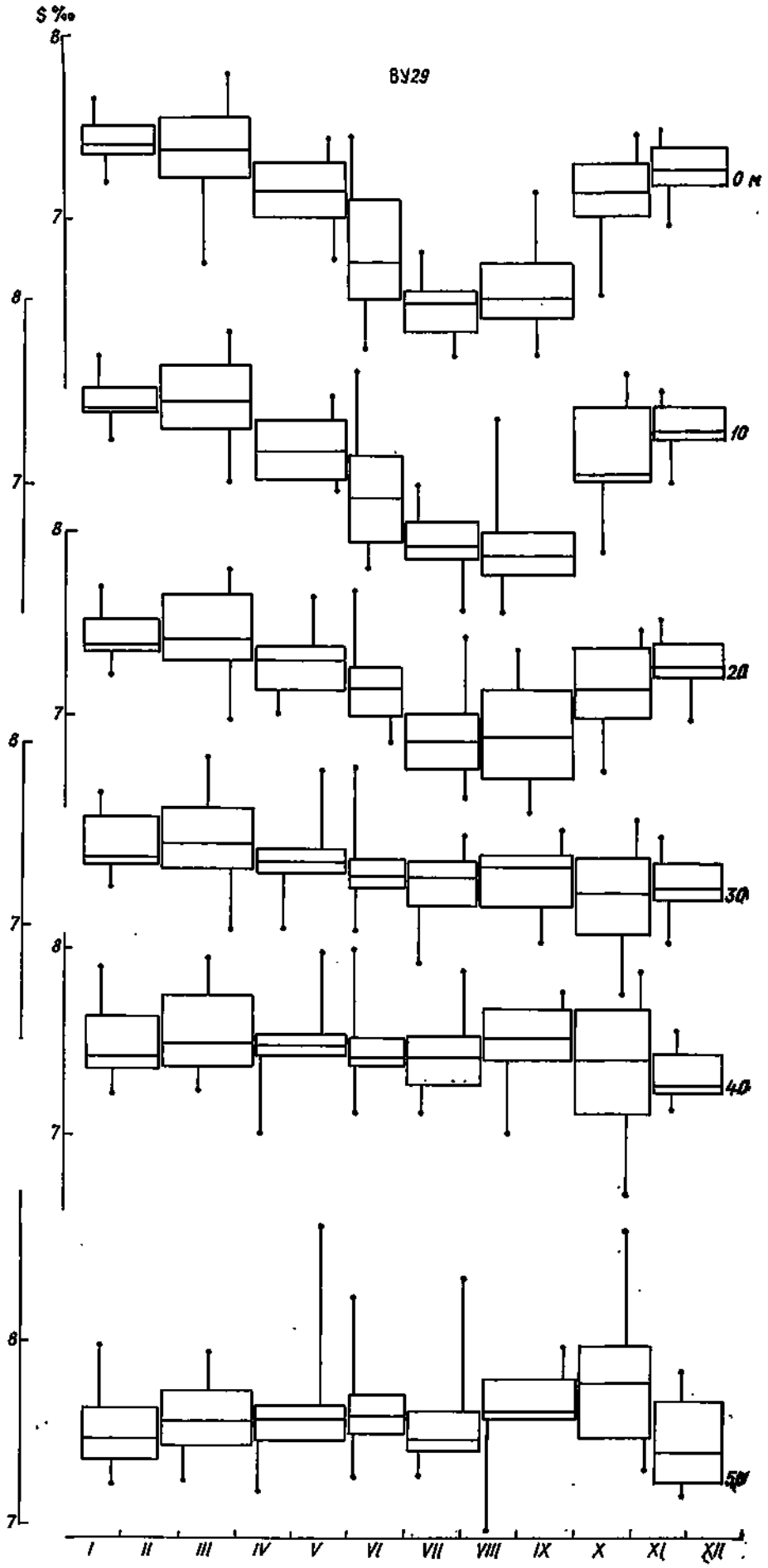


Рис. 10.12.

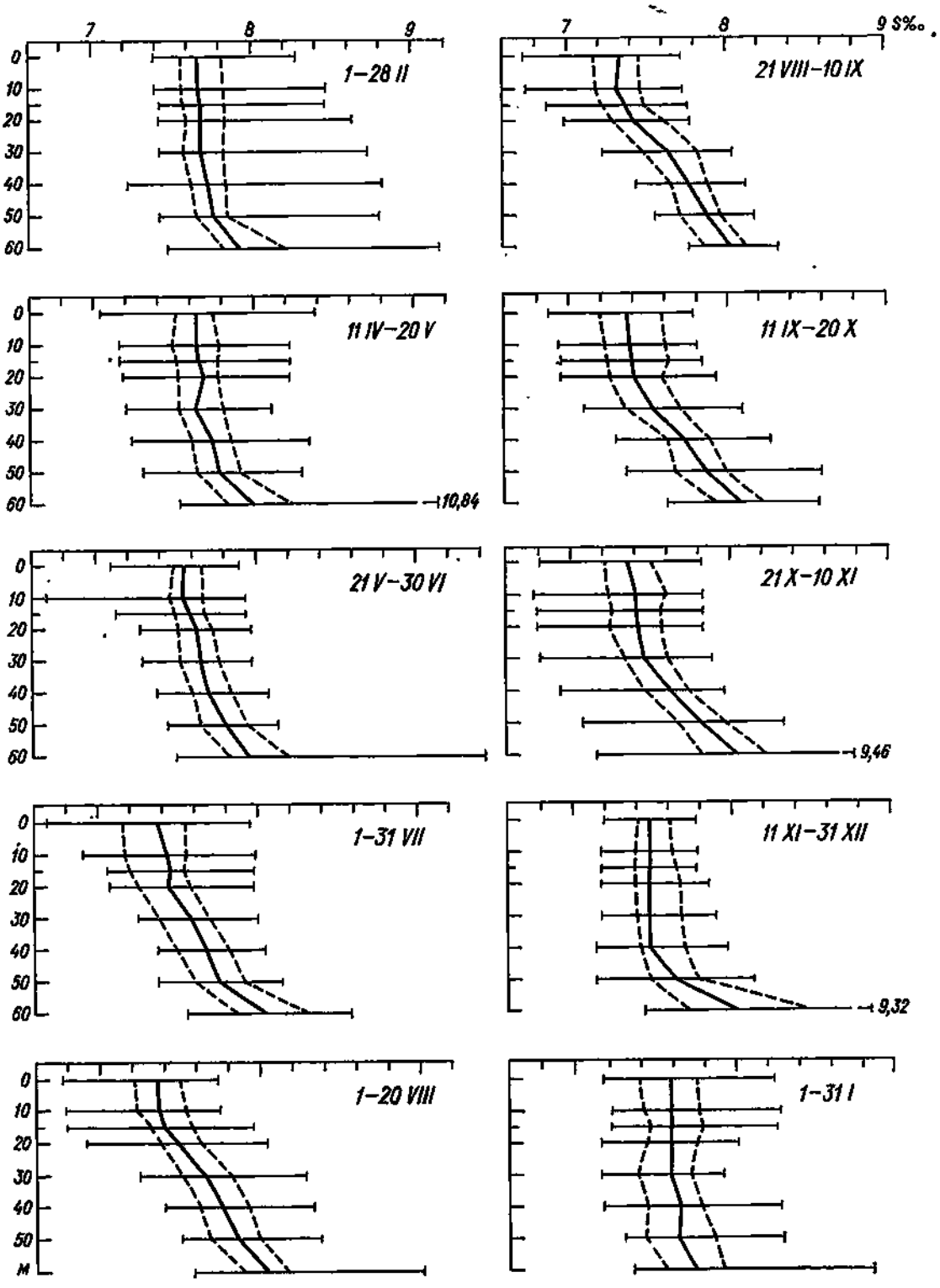


Рис. 10.13. Внутригодовая изменчивость вертикального распределения квартильных оценок солености в верхнем слое Готландской впадины (ст. BY 15).

10.2.4. Характеристика динамики гидрохимических условий в верхнем слое моря

Сезонная динамика гидрохимических условий в верхнем слое Балтики уже в 60-е годы в общих чертах была описана в монографии [19]. К этим сведениям часто обращаются до сих пор, хотя, например, по биогенным элементам методики и техника химического анализа существенно изменились и это необходимо учитывать при сопоставлении с современными данными.

И в монографии [19], и в более поздних публикациях при обобщении современной информации внутригодовая изменчивость представлена не на основе статистического анализа, а в виде качественного описания с приближенными оценками часто встречающихся значений или диапазона разброса данных и лишь для фотического слоя [57, 129, 264].

В данной монографии характеристики внутригодовой изменчивости условий представлены результатами статистического исследования годового хода для полного комплекса гидролого-гидрохими-

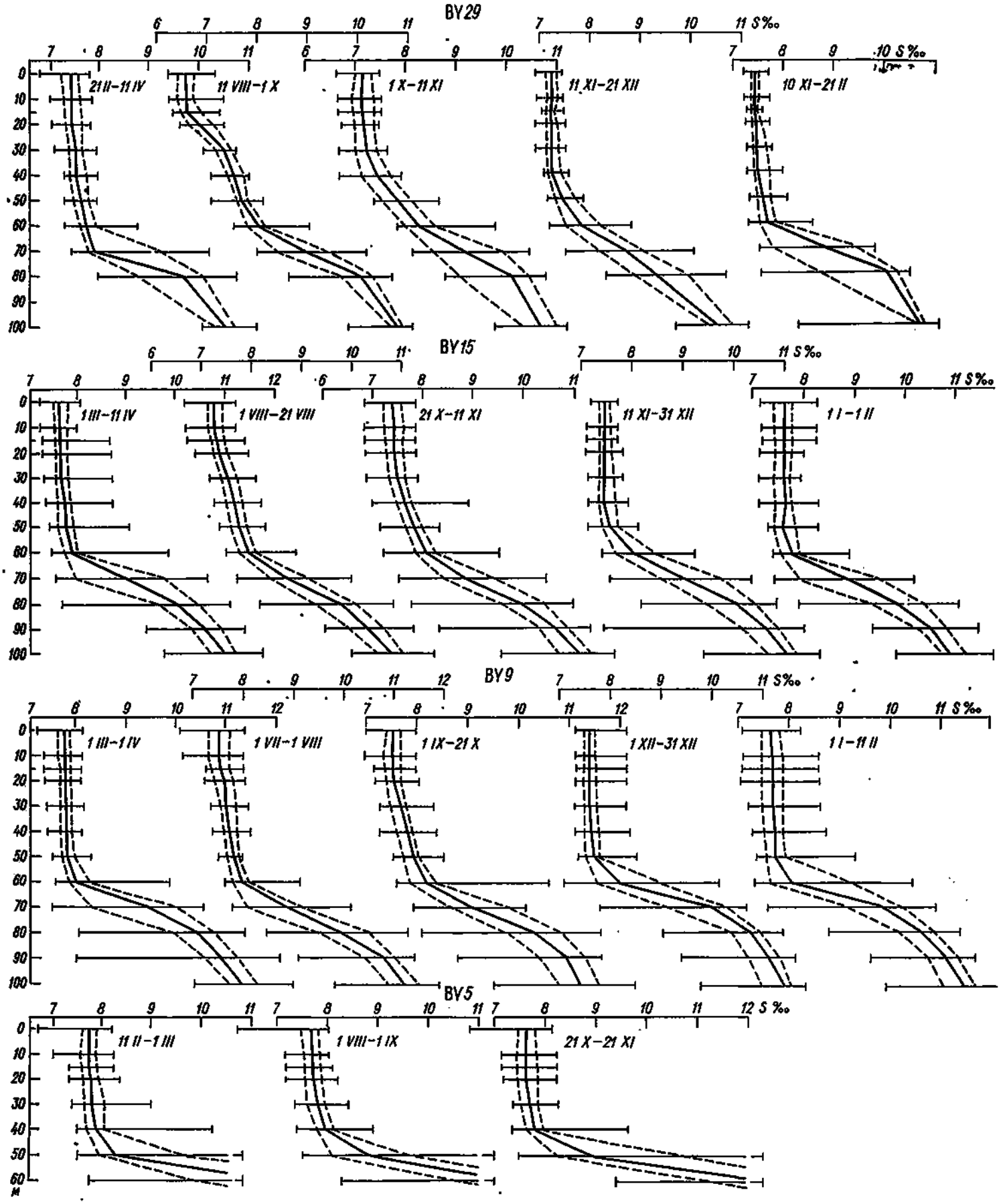


Рис. 10.14. Внутригодовая изменчивость вертикального распределения квартильных оценок солености в северной части Балтийского моря (ст. BY 29), в Готландской впадине (ст. BY 15), в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), в Борнхольмской (ст. BY 5) и Арконской (ст. BY 2) впадинах.

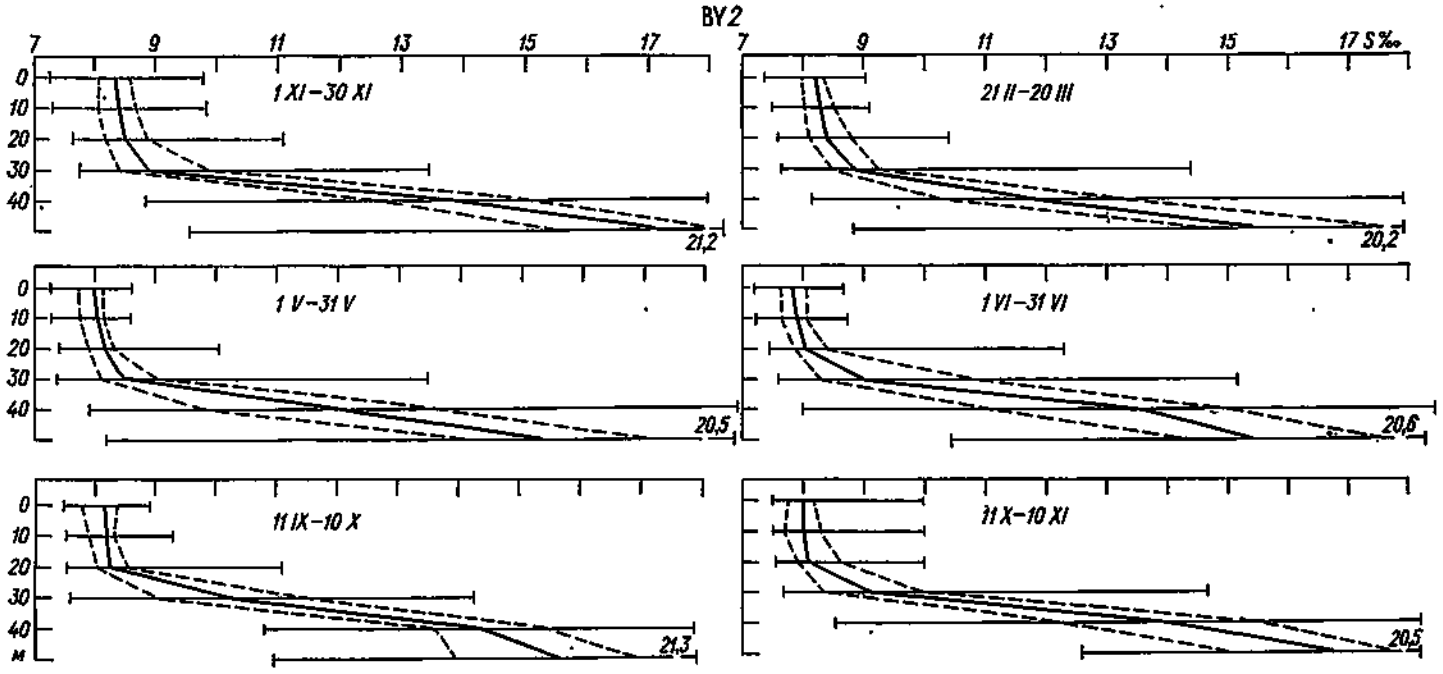


Рис. 10.14.

ческих показателей на основе объединенной информационной базы различных стран и учреждений (см. п. 9.2), созданной с учетом методической химико-аналитической сопоставимости данных (см. п. 9.3). Статистические характеристики получены методом, обеспечивающим уменьшение влияния структурной неоднородности базы данных (имеется в виду длина рядов и количество данных в выборках) и получение статистически сопоставимых оценок для большинства интервалов годового цикла (см. п. 9.4).

Средний многолетний «образ», или модель, годового хода с определенными параметрами — размахом, формой, сроками фазовых переходов, характерными для данной глубины и данного района моря, представлен ансамблями квантилей распределения данных для неэквидистантных довольно узких временных интервалов, отличающихся между собой комплексом химико-биологических и гидрологических условий [102, 105]. Изменения параметров годового хода с глубиной представлены ансамблями вертикальных профилей характеристик.

В холодный период года, когда из-за недостатка освещенности и низкой температуры воды фотосинтетическая активность водорослей чрезвычайно низка, главным фактором формирования гидрохимических условий в верхнем слое моря являются гидродинамические процессы — ветро-волновое и конвективное перемешивание, вертикальный турбулентный обмен, адвекция. Процессы тепло- и газообмена через границу раздела вода—атмосфера благодаря интенсивному перемешиванию во всей толще верхнего слоя обеспечивают его охлаждение и насыщение кислородом.

Вертикальный перенос биогенов из галоклина посредством турбулентной диффузии, эффективность которого зимой усиливается за счет конвективного перемешивания, охватывающего всю толщу верхнего слоя, приводит к обогащению его фосфатами, нитратами, силикатами с достижением внутригодового максимума их содержания к концу зимы, одновременно с максимумом солености.

Интенсивность зимнего возрастания содержания биогенов в верхнем слое повышается в случаях воздействия подъемов глубинных вод, вызванных притоками североморских вод из Датских проливов.

Вертикальное распределение гидрохимических показателей в верхнем слое в зимних условиях, как и для температуры и солености, однородно, но при этом транзит поверхностных вод течениями из заливов и прибрежных зон может вызывать небольшое повышение концентраций транспортируемых веществ на поверхности, как это отмечалось, например, для фосфора в Готландской впадине [113].

Весной, когда количество солнечной энергии возрастает, состояние гидрохимических условий в верхнем слое определяется активизацией фотосинтеза. Массовое цветение фитопланктона в течение одной—двух недель (весенняя вспышка) приводит к резким изменениям почти всех гидрохимических показателей: увеличиваются концентрации кислорода и перенасыщенность им воды, уменьшаются концентрации фосфатов и нитратов и возрастает содержание органических форм фосфора и азота, убывают концентрации растворенной двуокиси углерода и вследствие этого повышаются значения pH (рис. 10.15).

Сроки весенней вспышки фитопланктона в открытой части Балтики в направлении с юга на север различаются на 1,5—2,0 мес и по обобщенным в работе [76] литературным сведениям в Арконской и Гданьской впадинах приходятся на март—апрель, в Борнхольмской — на апрель, в Готландской впадине и в Финском заливе — на апрель—май.

В изменениях показателей в период цветения водорослей выделяются две стадии, соответствующие, по-видимому, двум фазам — началу весенней активизации фотосинтеза (ранняя весна) и ее пику (вспышка).

Активизация фотосинтеза проявляется в увеличении концентраций и насыщения вод кислородом (по средним показателям насыщение достигает 101,0—103,5 %), в уменьшении концентраций фосфатов, нитратов и силикатов и в увеличении доли органического фосфора в общем его содержании (для органического азота мало наблюдений в данный период). Лишь pH еще сохраняется на уровне зимних значений. Средние многолетние сроки наступления фазы ранней весны распределены следующим образом: в Арконской впадине — март, в Борнхольмской — первые две декады апреля, в Готландской впадине — 11—30 апреля (для ст. BY 29 мало данных в этом интервале времени). Длительность данного периода, вероятно, невелика и составляет несколько дней, а вышеуказанные сроки отражают межгодовую изменчивость в объединенных данных многолетних наблюдений.

Вертикальное распределение гидрохимических показателей в верхнем слое, как и для температуры, сохраняется однородным и аналогичным зимнему благодаря эффективному вертикальному перемешиванию, глубина распространения которого несколько уменьшается лишь в Готландской впадине и в северной части моря, охватывая слой до 50 м (а не 60, как зимой).

Многолетние сроки максимальных концентраций кислорода, обусловленных продуцированием его при фотосинтезе (среди изменений других показателей), по-видимому, наиболее адекватно отражают временные границы фазы массового цветения фитопланктона. В этот период резко возрастает и перенасыщенность воды кислородом, чему способствует повышение температуры воды и снижение его растворимости (по средним показателям насыщение составляет 107—112 %).

Последующее снижение концентраций (но не насыщения) связано с увеличением прогрева воды и отдачей избытка кислорода в атмосферу. Установленные на основании статистического анализа сроки максимума концентраций кислорода следующие: апрель — Арконская впадина, с 20 апреля по 10 мая — Борнхольмская впадина и юго-восточная часть Готландской котловины (станции BY 5 и BY 9), май — Готландская впадина.

Возможность считать указанные сроки характерными для вспышки фитопланктона подтверждается результатами расчета средней месячной первичной продукции, полученными Стигебрандтом по предложенным им формулам на основании оценки кислородного обмена с атмосферой через поверхность моря по данным 1957—1982 гг. Согласно этим оценкам, максимальная продукция фитопланктона в Арконской и Готландской впадинах отмечается соответственно в апреле и мае, в проливах Каттегат и Скаттеррак — в марте, а в Ботническом море и Ботническом заливе — соответственно в мае и июне [478]. По нашим данным, для северной части моря (ст. BY 29) период кислородного максимума, а следовательно, и вспышки фитопланктона наблюдается с 10 апреля по 10 мая, однако, возможно, что сроки более ранние, чем в центральной части моря, могут быть связаны и с меньшим количеством наблюдений, и с отличием периода (1965—1984 гг.), к которому они относятся, по сравнению с остальными базовыми станциями.

Указанные изменения гидрохимических показателей, как и ранней весной, характерны для всего верхнего слоя и даже для зоны, граничащей с галоклином (хотя и в меньшей степени), а в Арконской впадине — до дна. Причинами изменений на глубинах ниже фотического слоя, по-видимому, являются интенсивные процессы вертикального перемешивания, на которые указывает повышение температуры воды, в течение вспышки фитопланктона происходящее также во всем верхнем слое, а в Арконском бассейне — до дна (см. рис. 10.5—10.7). Как показали расчеты Маттеуса для Готландской впадины, вертикальная устойчивость в слое 0—40 м в первой половине мая сохраняется на уровне зимней при небольшом ее увеличении к концу месяца (рис. 10.16).

В вертикальном распределении соединений, утилизируемых в процессах фотосинтеза, — фосфатов, нитритов, снликатов, двуокиси углерода — в Готландской котловине и в северной части моря выделяются два слоя: верхняя 30-метровая толща вод, где их концентрации примерно одинаковы, и слой глубже 30 м, где концентрации незначительно возрастают с глубиной. В Борнхольмской и Арконской впадинах уменьшение содержания биогенных веществ прослеживается во всем верхнем слое, т. е. до 40 и 30 м соответственно. При этом в гомотермическом слое на горизонтах 0 и 10 м отмечаются равные концентрации элементов.

В вертикальном распределении элементов, концентрации которых возрастают в зоне фотосинтеза, влияние биологических процессов проявляется в большей степени. Так, в вертикальных профилях концентраций кислорода (для него наблюдения проводятся через 5 м) выделяется фотический слой мощностью 15—20 м с одинаковыми значениями характеристик, и далее в слое до галоклина происходит небольшое уменьшение их с глубиной. В вертикальных профилях насыщения вод кислородом выделяется к тому же слой 0—5 м с наибольшими значениями вследствие максимального продуцирования кислорода в нем. Под этим слоем в фотическом слое наблюдается небольшое уменьшение концентраций с глубиной, и в большей степени оно проявляется под фотическим слоем.

В слое 0—10 м наблюдаются максимальные концентрации и процентное содержание органического (в составе общего) фосфора с наибольшим уменьшением в слое 10—20 или 20—30 м (в зависимости от района моря) и слабым изменением или его отсутствием в остальной части верхнего слоя.

Окончание весенней вспышки обусловлено снижением скорости фотосинтеза вследствие истощения накопленных в течение зимы запасов нитратов, лимитирующих первичную продукцию в открытой части моря (см. п. 14.1). Массовое «залповое» отмирание водорослей образует дождь взвешенных веществ, которые при слабо развитом термоклине беспрепятственно выводятся из фотического слоя: часть взвешенных веществ задерживается на границе с галоклином, что и является причиной вертикального максимума растворенного органического вещества в этот период [111], другая их часть транспортируется в глубинный слой и оседает на дно. В этот период образуется максимальное в году количество взвешенных веществ [210, 366], что подтверждают данные наблюдений в северной части Балтики в Аскё (рис. 10.17). Накопление взвешенных веществ на границе верхнего слоя с галоклином в глубоководной части моря и у дна — в мелководных райо-

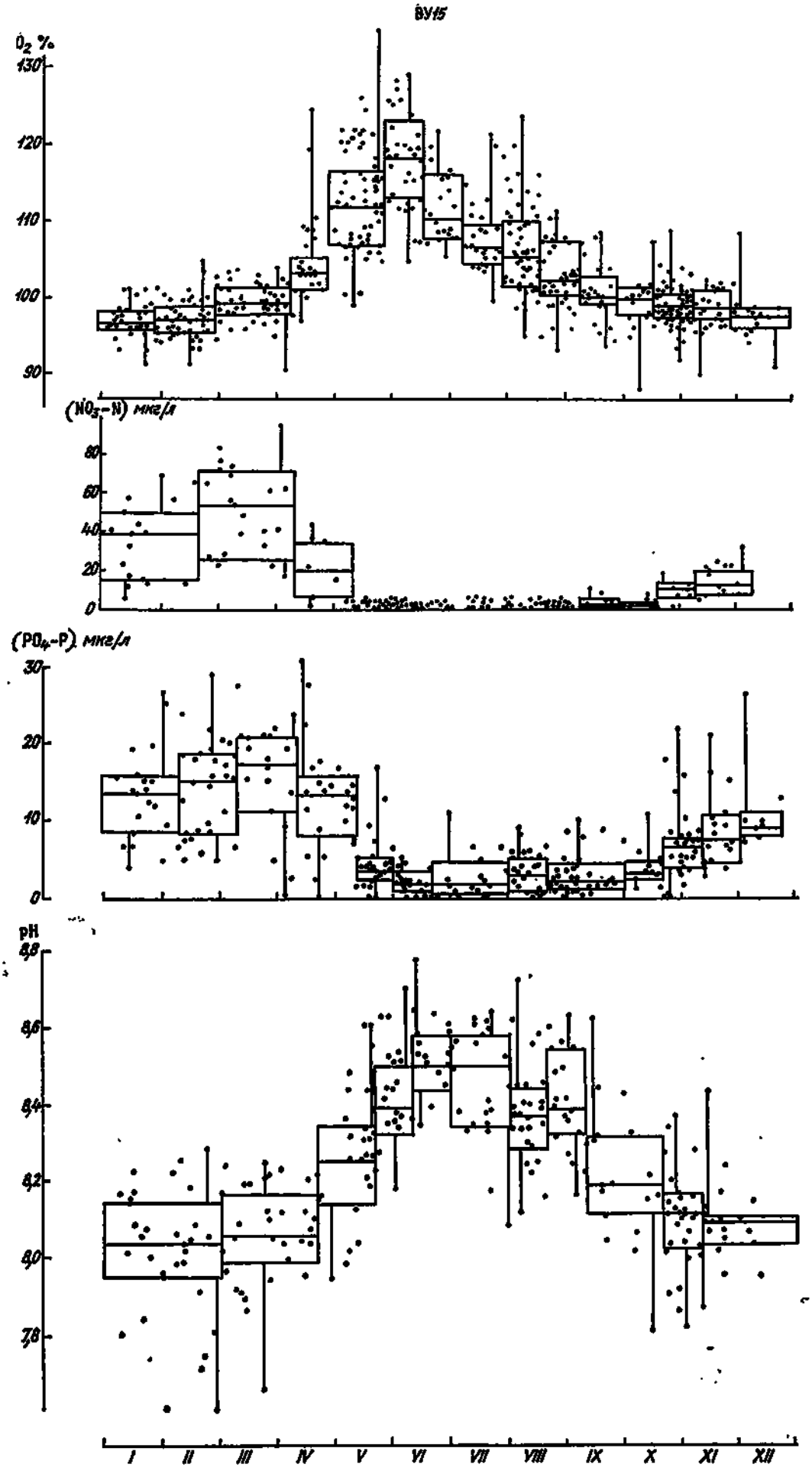
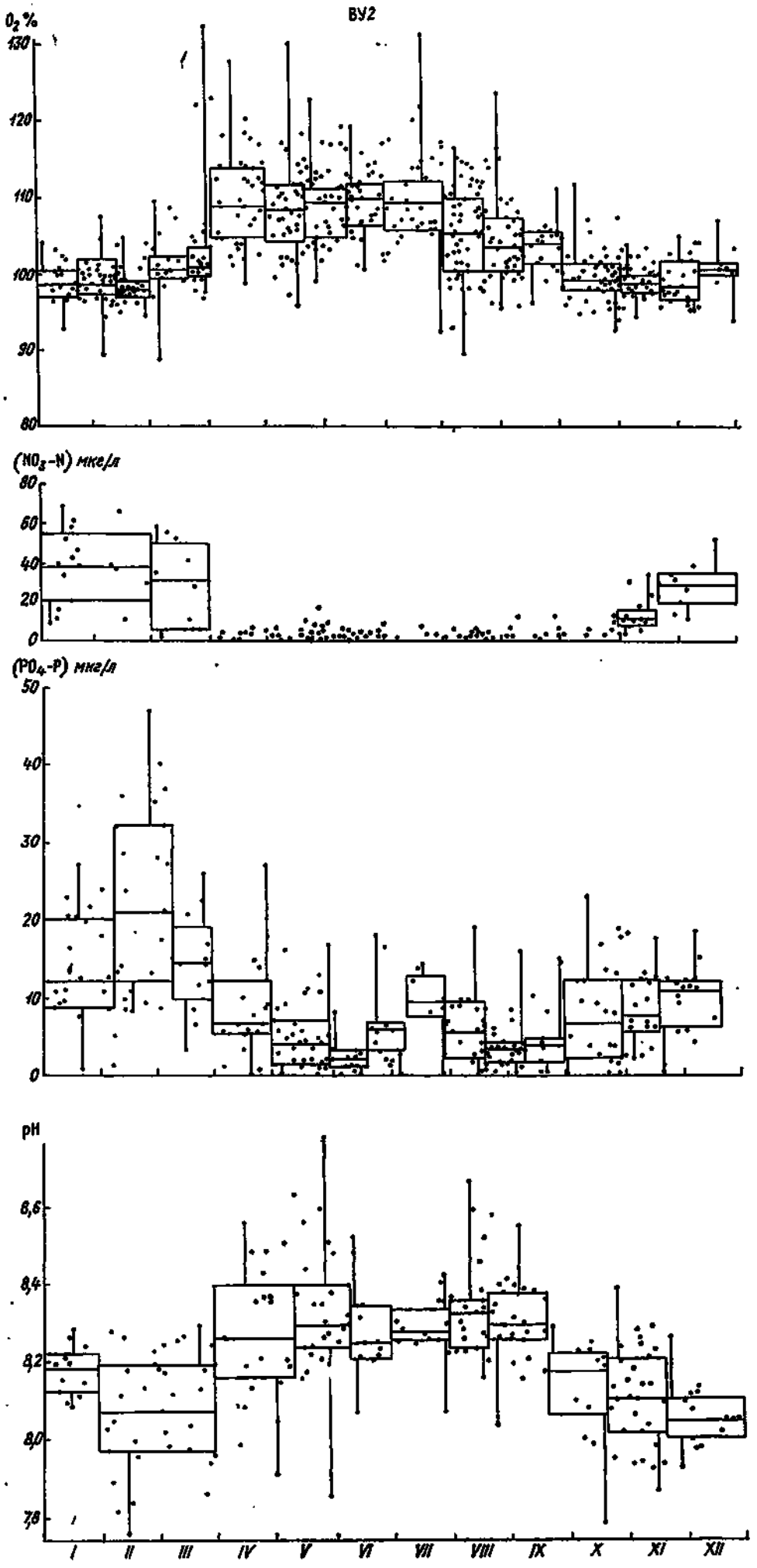


Рис. 10.16. Годовой ход различных гидрохимических показателей на поверхности в цен- квартильного



тральной части моря (ст. BY 15) и в Арконском бассейне (ст. BY 2) по данным анализа.

нах, а также последующая изоляция этого слоя развивающимся термоклином, повышающим вертикальную устойчивость вод (см. рис. 10.16), препятствуют возвращению в фотический слой органического вещества и биогенов, образующихся при его минерализации. Следствием этих процессов является дальнейшее уменьшение содержания биогенов: в течение первых двух декад июня концентрации фосфатов, нитратов и силикатов устанавливаются на уровне внутригодового минимума. Именно в этот период, а не в течение весенней вспышки происходит резкое снижение концентрации общего фосфора.

Сильный и быстрый прогрев воды в начале лета, уменьшающий растворимость кислорода и увеличивающий термическую стратификацию (см. рис. 10.5 и 10.7), приводит к максимуму насыщения воды кислородом в слое 0—30 м, вертикальный перенос которого вниз затруднен. Однако концентрации кислорода снижаются в связи с отдачей его избытка в атмосферу и затратами на окисление органического вещества в поверхностном слое и под ним. В это же время наблюдаются максимальные значения pH, свидетельствующие о минимальном содержании двуокиси углерода, израсходованной в период весенней вспышки.

Минеральный азот после полной утилизации водорослями нитратов представлен аммонийной формой, через которую в последующих фазах продукционного периода и происходит кругооборот азота в фотическом слое. Установлено, что аммонийный азот энергетически предпочтительнее для водорослей, чем нитраты [264].

Усиливающийся в начале лета термоклин хотя и затрудняет вертикальный обмен, но не перекрывает его: изменения содержания биогенов, наблюдаемые в фотическом слое происходят, как и ранее, и в слое толщиной 30—40 м, но в значительно меньшей степени (рис. 10.18).

Рассмотренная фаза годового цикла гидрохимических показателей является последней, когда их изменения по направленности одинаковы во всей толще верхнего квазиоднородного слоя, а в мелководных районах — до дна. Последующее развитие термоклина и увеличение вертикальной устойчивости оказывают более существенное влияние на процессы, происходящие в разных частях верхнего слоя. Приток биогенов в фотический слой посредством вертикального переноса практически перекрывается, и в качестве источников пополнения фондов биогенов выступают береговой сток и апвеллинг. Биомасса водорослей, регулируемая скоростью оборачиваемости биогенов, установившейся в июне, а точнее, азота, лимитирующего продукцию в открытой части Балтики и в последующий после вспышки период [177, 210, 401, 440], значительно снижается. Образующиеся при отмирании фито-

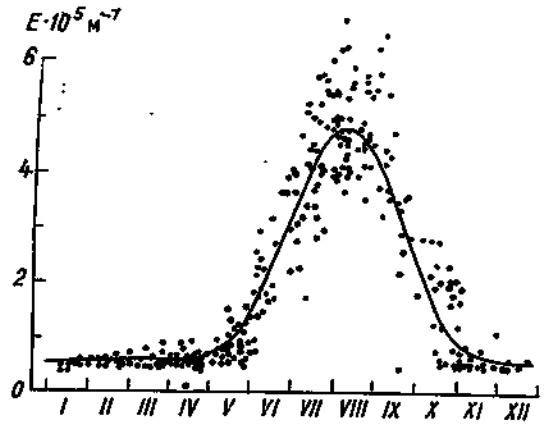


Рис. 10.16. Годовой ход вертикальной устойчивости поверхностного слоя (0—40 м) в Готландской впадине [355].

планктона мелкодисперсные взвешенные вещества (в период дефицита биогенов предположительно преобладают водоросли малых размеров. [210]) подвергаются деструкции в основном непосредственно в фотическом слое или вблизи верхней границы термоклина; поступление взвешенных веществ в слой под ним, по-видимому, незначительно.

Органическое вещество, сконцентрированное вблизи галоклина в предшествующей фазе, подвергается минерализации и вызывает повышение концентрации общего фосфора, фосфатов, двуокиси углерода и снижение значений pH в холодном промежуточном слое между пикноклинами. Статистический анализ показал, что эти изменения происходят в период установления трехслойной термической структуры в толще ВКС (см. п. 10.2.2): в Готландской котловине (станции BY 9 и BY 15) и в северной части моря (ст. BY 29) — в июле, в Арконской впадине — уже в конце июня. В Борнхольмском бассейне, где из-за более высокого положения галоклина толщина холодного промежуточного слоя мала, эти изменения менее выражены и в июне отмечаются преимущественно на глубине 40 м.

Характерно, что влияние процессов минерализации в слое между термо- и галоклином не обнаруживается в этот период для азотных соединений: заметное возрастание концентраций аммония и нитритов происходит позднее — в августе.

Концентрации силикатов в этом слое, как и над ним — на поверхности, начинают повышаться в конце августа—сентябре, возможно, в связи с более затрудненным высвобождением кремния из остатков водорослей [401]. В мелководной Арконской впадине, где их накопление происходит у дна, возрастание концентраций силикатов, а также нитритов и аммония в слое 20 м — дно происходит в июне—июле.

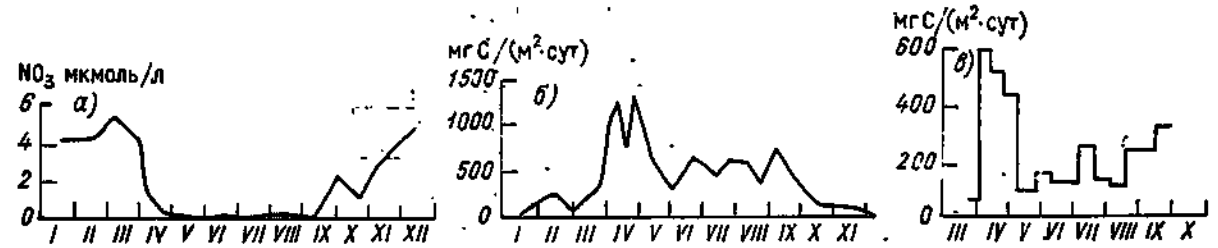


Рис. 10.17. Годовой ход содержания нитратов (*а*), первичной продукции (*б*) и седиментации органического вещества (*в*) в слое 0—20 м в 1986 г. вблизи Аске (Ларсон, цит. по [366]).

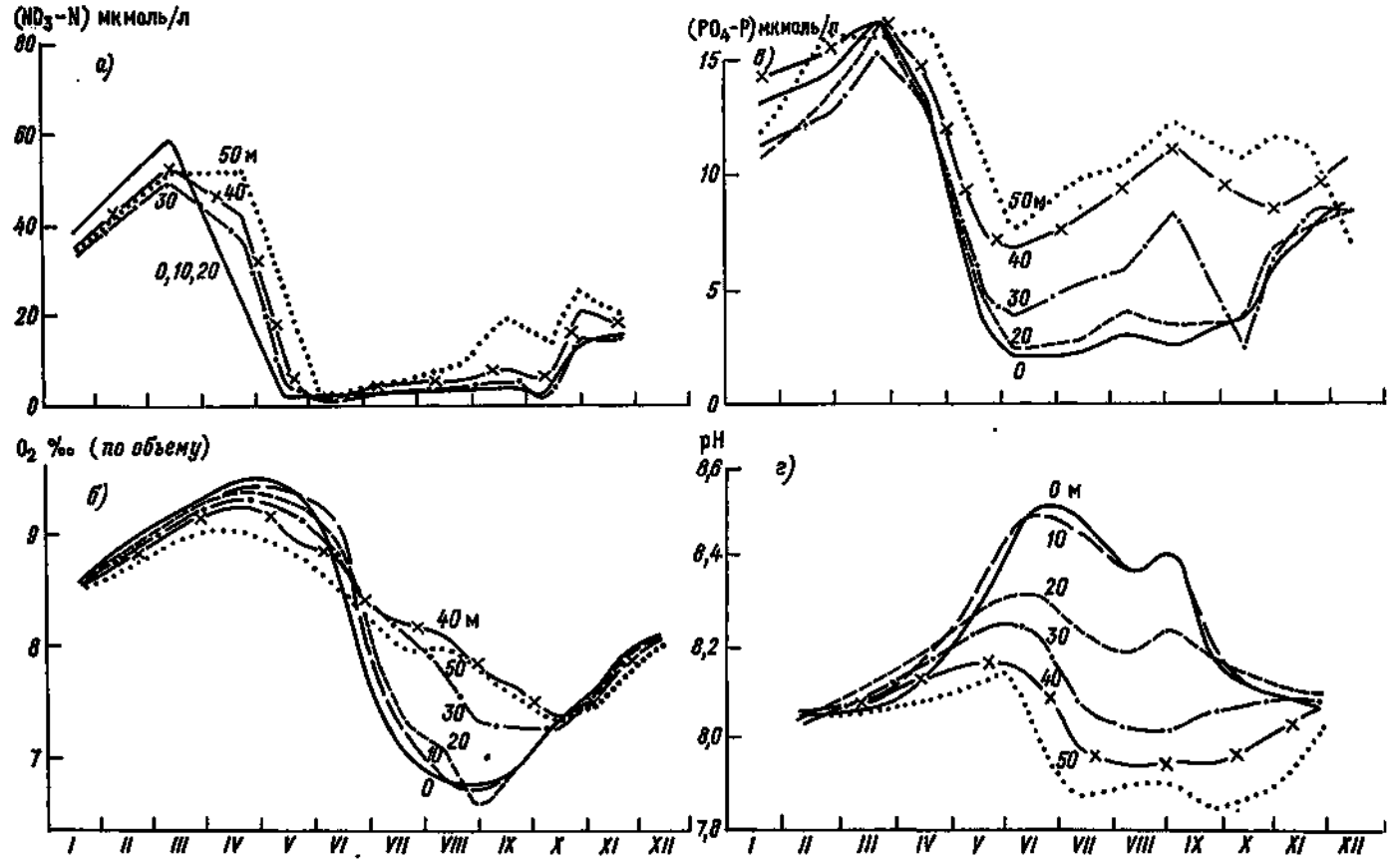


Рис. 10.18. Годовой ход содержания нитратов (*а*), кислорода (*б*), фосфатов (*в*) и pH (*г*) на стандартных горизонтах верхнего слоя Готландской впадины.

Продолжающееся продуцирование кислорода в фотическом слое сохраняет пересыщение им вод до 2-й декады сентября (в Арконском бассейне — до конца сентября), хотя процентное содержание и концентрации по-прежнему уменьшаются в связи с отдачей избытка кислорода в атмосферу и из-за затрат на биохимическое окисление лабильного органического вещества. Под термоклином также происходит уменьшение концентрации кислорода, хотя и менее интенсивное, поскольку вызвано оно лишь расходом кислорода на окисление органического вещества отмершего фитопланктона.

Изменения содержания двуокиси углерода и pH в большей степени различаются в фотическом слое и под ним. Как отмечалось, под термоклином минерализация вызывает снижение значений pH из-за выделения двуокиси углерода, а в фотическом слое сохраняется высокий их уровень, определяемый доминированием фотосинтеза над деструкционными процессами.

Во второй половине лета (в июле—августе) в составе фитопланктона Балтики начинают доминировать сине-зеленые водоросли, обладающие способностью фиксировать молекулярный азот, растворенный в воде. Массовое их цветение обусловливает летний максимум первичной продукции [76]. При значительных запасах молекулярного азота в морской воде, легко пополняемых при газообмене с атмосферой, лимитирующими факторами развития сине-зеленых являются наличие фосфатов при низком соотношении N : P в фотическом слое (см. п. 14.1), высокая температура воды, безветреная погода. Особенно благоприятны ситуации эффективного перемешивания водной толщи, предшествующего штилю, и апвеллинга из аноксических зон с низким соотношением N : P [449]. Массовое цветение сине-зеленых водорослей встречается повсеместно в Балтийском море и его заливах [440].

Большую роль в интенсификации биогеохимического круговорота биогенных элементов играет в этот период зоопланктонное сообщество, достигающее в июле—августе максимального развития как в количественном отношении, так и по видовому разнообразию (см. ч. 1). Интенсивное выедание растительных клеток зоопланктоном препятствует, в отличие от весенних условий, быстрой седиментации продуцированного органического вещества на дно. В то же время азотсодержащие и фосфорсодержащие продукты метаболизма выделяются в процессе экскреции в воду в виде лабильного органического вещества, аммония и фосфатов, способствуя быстрой оборачиваемости азота и фосфора и обеспечивая значительную долю потребностей фитопланктона в биогенных элементах.

Как показывают многолетние статистические характеристики, в августе в фотическом слое вновь увеличиваются значения pH (летний максимум после снижения в июле), возрастают концентрации фосфатов и органического фосфора, повышаются на поверхности концентрации аммония и нитритов. Эти изменения, по-видимому, определяются не только экскрецией продуктов метаболизма зоопланктоном, но и обогащением вод азотом, образующимся в период цветения сине-зеленых.

По сведениям, содержащимся в ч. 1 данного выпуска, максимум летнего цветения фитопланктона в Северной и Центральной Балтике наблюдается в августе — начале сентября, а в проливах Боль-

шой и Малый Бельт — в конце июля — начале августа. Возрастание концентраций фосфатов на поверхности Арконской впадины в июле—августе является, вероятно, причиной, благоприятствующей развитию азотфиксаторов в этом районе.

С цветением и отмиранием сине-зеленых связывают протекающие в августе—сентябре на границе верхний слой—галоклин и верхней части галоклина процессы аммонификации органического вещества и нитрификации. Эти процессы вызывают резкое возрастание концентраций аммония и нитритов, которое, как показал статистический анализ, начинается в августе. Максимальные концентрации нитритов на глубинах 50—70 м в Готландской котловине и в северной части моря и на глубинах 40—50 м в Борнхольмской впадине формируют вертикальные максимумы и характерны для последней декады августа — начала сентября. В Арконской впадине эти процессы протекают у дна и начинаются раньше — в июле, а максимального развития они достигают в течение первых двух декад августа. Менее интенсивное повышение концентраций аммония и нитритов наблюдается в этот период и в холодном промежуточном слое, но выше 30 м не обнаруживается. Предполагают, что причиной является фотоингибирование этого процесса и что протекание его в освещенном слое невозможно [210].

Причины, по которым эти процессы начинаются на относительно больших глубинах, включая зону галоклина, пока не ясны [269] и связаны, очевидно, с условиями, благоприятными для активности бактерий-нитрификаторов. В то же время минерализация органического вещества, которая в конце августа — начале сентября усиливается благодаря массовому летнему цветению и отмиранию сине-зеленых, протекает наиболее интенсивно в слое 30—40 м. Это подтверждается характерным для данного времени минимумом содержания и насыщения вод кислородом (рис. 10.18*б*), возрастанием концентраций двуокиси углерода, общего фосфора, фосфатов (рис. 10.18*в*) и силикатов на этих глубинах. В Арконской впадине повышение концентраций биогенов, связанное с данной причиной, наблюдается уже в июле — начале августа в слое 30 м — дно.

Конец августа — 1-я декада сентября (в Арконской впадине сентябрь) — последняя фаза летних гидрохимических условий, в течение которой сохраняется пересыщение кислородом вод фотического слоя, свидетельствующее о доминировании продуцирования фитопланктона по отношению к деструкционным процессам. Хотя интенсивность его снижается, значения показателей насыщения довольно резко уменьшаются, а толщина пересыщенного слоя сокращается до 10 м (в Борнхольмской впадине — до 15 м).

Однако концентрация утилизируемых при фотосинтезе биогенов сохраняются на уровне летнего минимума достаточно долго, по полученным статистическим данным в Центральной и Северной Балтике — до последней декады октября, а в юго-западной (Борнхольмская и Арконская впадины) — до начала октября (за исключением нитратов, содержание которых увеличивается лишь начиная с ноября) (см. рис. 10.15).

Если предпосылкой начала биологической осени является более существенное ослабление термической стратификации, тогда средним многолетним сроком начала этой фазы является сентябрь: в Борнхольмской впадине — начиная со 2-й декады в Готландской впадине и северной части моря — с последней декады. В этот период происходит более существенное охлаждение поверхностных вод, ослабление и заглубление термоклина до глубины 40 м (см. рис. 10.5 и 10.6). В Арконской впадине эта фаза приходится на октябрь.

В этот период ранней осени в глубоководной части моря в толще гомотермического слоя (0—20 м) насыщенность вод кислородом близка к 100 %, что свидетельствует о примерном равенстве притока кислорода и его убыли. Увеличение концентраций кислорода происходит и за счет абсорбции из атмосферы вследствие охлаждения воды.

Содержание биогенов в поверхностном слое сохраняется на уровне летнего минимума вплоть до октября, поскольку их вынос из нижних слоев и образование при регенерации расходуются на осеннее цветение фитопланктона. Концентрации и относительное содержание органического фосфора в составе общего также соответствует летним. Затраты двуокиси углерода, однако, снижаются, что отражается в уменьшении значений pH.

Под поверхностным слоем в глубоководной части моря наибольшие изменения начинаются на глубине 30 м, где воды, вовлекаясь в термоклин, смешиваются с обедненными кислородом и биогенами водами более верхних слоев.

На глубинах, включаемых в перемешиваемую толщу поверхностных вод, происходит некоторое уменьшение содержания биогенов и концентраций кислорода, хотя насыщение вод кислородом увеличивается. Перенос из поверхностных вод остатков отмирающих водорослей и накопление части их вблизи галоклина, задерживающего более легкие фракции, является причиной повышения концентраций общего фосфора, фосфатов, силикатов, нитратов, двуокиси углерода, уменьшения значений pH, концентраций кислорода и его насыщения в слое 50—60 м (для кислорода — это период внутригодового минимума).

Возрастание концентраций биогенов, хотя и очень небольшое, начинается в слое 0—20 м лишь в конце октября — начале ноября, хотя для силикатов относительно низкие летние значения уже с сентября встречаются все реже. В южной части моря — в Арконской и Борнхольмской впадинах — благодаря меньшей толщине верхнего слоя и более эффективному обогащению его биогенами за счет вертикального переноса, возрастание концентраций фосфатов отмечается с начала октября. Но увеличение содержания нитратов и общего фосфора в слое 0—20 м начинается лишь в ноябре, а в северной и центральной частях моря несколько раньше — в конце октября, одновременно с фосфатами (см. рис. 10.15).

Разрушение термоклина и увеличение глубины конвективного перемешивания до галоклина происходит в центральных и северных районах со 2-й декады ноября, обеспечивая обогащение верхнего слоя биогенами за счет вертикального переноса из галоклина, которое продолжается и в дальнейшем в течение зимы.

10.3. Общая характеристика гидрохимических условий глубинных вод моря и определяющих их факторов

В водах ниже постоянного галоклина, характеризуемого наибольшими градиентами изменений всех показателей, гидрохимические условия формируются процессами биохимического окисления органического вещества аллохтонного и автохтонного происхождения, физико-химическими процессами сорбции и осаждения, биохимическими и химическими процессами на поверхности и в толще донных отложений и обменными процессами на поверхности раздела вода—грунт. Изолированность глубинных вод, отделенных от верхнего слоя устойчивым галоклином, предопределяет низкие концентрации в них кислорода и накопление продуктов минерализации органического вещества — двуокиси углерода, фосфатов, силикатов, минерального азота, концентрации которых в несколько раз превышают характерные для верхнего слоя даже в период их зимнего максимума.

Ограниченный вертикальный обмен между слоями при исчерпании запасов кислорода приводит к возникновению в глубоководных впадинах центральной части моря анаэробных условий, длящихся годами, до поступления свежих вод за счет притоков через Датские проливы. Чередование аэробных и анаэробных условий определяет своеобразие биогеохимического круговорота вещества в глубоководной части моря.

10.3.1. Физико-химические, химические и биохимические процессы в глубинном слое моря

Одним из важнейших процессов, формирующих гидрохимические условия в океане, является биохимическое окисление органического вещества, осуществляемое с помощью бактерий. В соответствии с моделью Ричардса, основанной на стехиометрическом соотношении Флеминга — Редфилда

$$C : N : P = 106 : 16 : 1, \qquad (10.1)$$

окисление органического вещества планктона в обычных аэробных условиях может быть представлено в виде [96]

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}N_3PO_4 + 106\,O_2 = 106\,CO_2 + 106\,H_2O + 16\,NH_3 + H_3PO_4. \qquad (10.2)$$

В результате минерализации органического вещества, проходящей по данной схеме в окислительных условиях в толще вод и в верхнем слое донных отложений, потребляется растворенный в воде кислород и высвобождаются двуокись углерода, аммоний и фосфаты. При достаточном количестве кислорода и бактерий-нитрификаторов образующийся аммоний в ходе двуступенчатого процесса — нитрификации — окисляется далее до нитритов, а последние — до нитратов [96]:

$$16\,NH_3 + 24\,O_2 = 16\,HNO_2 + 16\,H_2O; \qquad (10.3)$$

$$16\,HNO_2 + 8\,O_2 = 16\,HNO_3. \qquad (10.4)$$

Если скорость потребления кислорода в этих процессах оказывается больше скорости аэрации, осуществляемой в глубинных водах в основном посредством вертикального переноса из верхних слоев, содержание кислорода уменьшается. При снижении его концентраций до десятых долей промилле окисление органического вещества осуществляется бактериями-денитрификаторами с использованием кислорода нитратов, термодинамически более доступного по сравнению с остальными соединениями, содержащими кислород и находящимися в составе морских вод. Химическая схема этого процесса, называемого денитрификацией, протекающего многоступенчато и с параллельными реакциями, окончательно не установлена. Общая схема процесса описывается в химической океанографии [432] следующим уравнением:

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4 + 84{,}8\,HNO_3 \rightarrow 106\,CO_2 + 16\,NH_3 + 42{,}4\,N_2 + H_3PO_4 + 148{,}4\,H_2O. \qquad (10.5)$$

При исчерпании находящихся в составе вод нитратов биохимическое окисление органического вещества происходит с участием сульфат-редуцирующих бактерий, утилизирующих кислород сульфатов (процесс сульфат-редукции) с образованием сероводорода и увеличением значений pH:

$$(CH_2O)_{106}(NH_3)_{16}H_3PO_4 + 53\,SO_4^{2-} = 106\,CO_2 + 106\,H_2O + 53\,S^{2-} + 16\,HN_3 + H_3PO_4; \qquad (10.6)$$

$$53\,S^{2-} + 53\,H_2O = 53\,HS^- + 53\,OH^-. \qquad (10.7)$$

Чередование этих процессов во времени и по вертикали и определяют специфику формирования гидрохимического режима глубинного слоя Балтийского моря.

Окислительные условия морской среды, выраженные подобно pH через показатель pE, принятый равным 12,5 при нормальных условиях [96], сохраняются при наличии даже следов растворенного в воде кислорода. В этих случаях на поверхности грунта происходит окисление сероводорода, хотя внутри него протекают восстановительные реакции, сопровождающиеся миграцией их продуктов к поверхности. С появлением сероводорода на поверхности донных отложений условия становятся восстановительными и значения pE составляют —3,8 [96, 225].

Практически неограниченные запасы сульфатов в морской воде обеспечивают беспрепятственное протекание сульфат-редукции, лимитируемой лишь наличием органического материала. Токсичность сероводорода для большинства микроорганизмов устраняет возможную конкуренцию в процессах биохимической деструкции. На активность сульфатредуцирующих бактерий оказывает влияние и температура воды [264].

Образование сероводорода начинается на поверхности донных отложений, но значительно лучшая растворимость в воде по сравнению с кислородом (437 ‰ по объему в дистиллированной воде при 0 °C) обеспечивает быстрое распространение сероводорода в водной толще [129].

При соприкосновении с кислородсодержащими водами происходит окисление сероводорода [432]

$$2O_2 + HS^- \rightarrow S_2O_3^- + H_2O. \qquad (10.8)$$

По этой причине сосуществование этих соединений в одном слое воды считалось невозможным. Однако многолетние наблюдения БалтНИИРХа позволили сделать вывод о возможности одновременного присутствия сероводорода и кислорода в глубинных

водах Балтийского моря — при низких концентрациях последнего [37]. В. В. Сапожников отмечает случаи их сосуществования в относительно больших количествах в обширном слое Готландской впадины, объясняя это низкой температурой вод и высокими скоростями вертикального переноса [80].

Специфические гидрохимические условия в глубинном слое Балтийского моря связаны также с процессами, формирующими циклы фосфора и азота.

В периоды анаэробных условий в глубоководных районах Балтики резко возрастают концентрации фосфатов. Это явление известно для подверженных стагнации районов Мирового океана [260, 432], а для Балтийского моря впервые было рассмотрено Фонселиусом [221, 224]. Он обнаружил, что содержание фосфатов в анаэробных условиях в Готландской впадине значительно превышает то количество, которое могло бы образоваться лишь за счет минерализации органического вещества в соответствии с известным соотношением Ричардса [432]: $AOU : PO_4 = 276 : 1$, где AOU — кажущееся потребление кислорода.

В Готландской впадине количество фосфатов было почти в 10 раз выше, а соотношение оказалось равным 22 : 1 [224]. При этом для значений pH меньше 7,1 наблюдалась корреляция pH и концентраций фосфатов, свидетельствующая об образовании углерода и фосфатов в одних и тех же процессах деструкции [256, 318, 493]. Но при значениях pH меньше 7,1 содержание фосфатов резко возрастает в результате включения иного механизма их поступления в водную толщу.

Первоначально Фонселиус предполагал [224], что это связано с выщелачиванием фосфатов из их соединений с кальцием, находящихся в составе донных отложений, из-за увеличения растворимости фосфата кальция при значениях pH около 7,0. Растворению фосфатов способствует также образование гидросульфид-ионов [495]. Однако в 1969 г. Фонселиус [225] привлек для объяснения аккумуляции фосфатов в стагнационных условиях Балтийского моря классическую работу Мортимера, в которой был предложен механизм аналогичных явлений в озерах [368]. Это объяснение было впоследствии расширено и дополнено и другими исследователями [108, 110, 272, 362, 395], подтверждено исторически и экспериментально [362, 395] и в настоящее время стало общепринятым.

В окислительных условиях в водной толще и на поверхности донных отложений Балтийского моря образуются малорастворимые соединения фосфатов с железом, которое переходит в трехвалентную форму. В результате формируется поток фосфатов на дно. При возникновении восстановительных условий трехвалентное железо восстанавливается до двухвалентного, что сопровождается растворением фосфатных комплексов (соединения двухвалентного железа с фосфатами хорошо растворимы). Железо при этом образует осадки с сульфид-ионами черного цвета, а фосфаты выделяются в водную толщу [113, 129, 225, 260, 264, 272, 362].

Слой донных отложений, подвергаемый ремобилизации фосфатов, в Балтийском море составляет около 5 см [283].

Эти представления о причинах накопления фосфатов на поверхности грунтов были дополнены А. К. Юрковским, предположившим, по аналогии с явлениями в пресноводных системах, существенную роль в этих процессах гуминовых кислот, содержание которых в водах Балтики весьма велико [108—110, 113].

Согласно предложенной гипотезе, соединения железа и гуминовых кислот, поставляемые речным стоком, при смешивании с солеными водами постепенно коагулируют, образуя малорастворимые комплексы, и включают в свой состав и фосфаты, сорбирующиеся на взвешенных веществах.

Таким образом, в механизм переноса фосфатов на дно моря и выделения их в водную толщу включаются еще и физико-химические процессы адсорбции в окислительных условиях и десорбции в восстановительных, которые происходят и в водной среде, и в донных отложениях. Автор гипотезы, опираясь на ряд своих данных по оценке переноса фосфатов в виде взвешенных веществ [109, 110], отмечает при этом необходимость подтверждения реальной роли данных процессов в кругообороте фосфора в Балтийском море [113]. Следует указать, однако, на данные, свидетельствующие о незначительном вкладе адсорбционных процессов в динамику фосфора в Балтийском море и наибольшем значении обычной седиментации органических взвешенных веществ, образующихся при отмирании фитопланктона [176].

Азотный цикл в глубинном слое Балтийского моря специфичен и сложен. Нитраты составляют наибольшую часть минерального азота в этом слое лишь при концентрациях кислорода свыше 0,2—0,5 ‰ [54, 378, 379, 438]. Доля аммонийного азота в этих условиях значительно меньше, а нитриты обнаруживаются в следовых количествах [269]. При уменьшении концентраций кислорода ниже указанных значений в результате денитрификации происходит исчезновение нитратов и резкое повышение концентраций аммония. При последующих анаэробных условиях по мере распространения сероводорода в более верхние слои глубинных вод нитраты в этих слоях не обнаруживаются, а содержание аммонийного азота возрастает.

Процессы денитрификации происходят как в водной толще, так и в донных отложениях. Как показывают оценки последних лет, около 80 % преобразований азота, вызываемых денитрификацией, протекает в грунтах, причем не столько в глубоководных районах, сколько в мелководной части моря [210, 269, 465, 469].

Механизм процессов денитрификации пока точно не установлен. Высказывалось предположение о восстановлении нитратов до молекулярного азота через промежуточную стадию образования аммония с их равными количествами в качестве продуктов реакции [432, 465]. По другой схеме происходит полное восстановление нитратов до газообразного азота с образованием в качестве промежуточных продуктов также газообразной окиси азота N_2O и нитритов [269, 437, 378, 382, 469]. Выяснение механизма процесса в природных условиях осложнено как химико-аналитическими трудностями, так и параллельно протекающими в море процессами. Так, образование аммония в анаэробных условиях рассматривается как не зависящий от денитрификации процесс бактериальной деструкции органических соединений азота [269, 382]. В последнее время преобладает использование термина «денитрифика-

ция» для обозначения восстановления нитратов до молекулярного азота.

Механизм восстановления нитратов имеет важное значение для оценки баланса азота в море, поскольку при полной трансформации нитратов в молекулярный азот он выводится из биогеохимического круговорота, а при переходе в аммонийную форму эта часть азота сохраняется в обороте. Потери азота в процессах денитрификации сказываются на суммарном содержании минерального азота ($NO_2^- + NO_3^- + NH_4^+$) в глубинных водах, подверженных чередованию аэробных и анаэробных условий. По нашим расчетам, статистические характеристики суммарного содержания минерального азота для объединенных выборок, относящихся к аноксическим и сероводородным условиям в Готландской впадине на глубине 200 м, в среднем на 25 % меньше соответствующих показателей для кислородных условий.

Специфические процессы циклов азота и фосфора в глубинных водах Балтийского моря формируют аномальное по сравнению с океаническим соотношение минеральных форм биогенных элементов, которое в океане определяется стехиометрическим соотношением элементов в планктоне (10.1). Глубинные воды характеризуются наименьшими отношениями $N : P^-_{неорг}$ от 4 : 1 в среднем до 1 : 1 и менее при аноксических условиях [129].

Состояние кислородных условий в глубинных водах определяет также колебания в содержании силикатов, хотя и не столь значительные, как фосфатов. При наличии кислорода концентрации кремния, в несколько раз большие, чем в верхнем слое, определяются процессами деструкции и коррелируют с содержанием фосфатов. В анаэробных условиях при увеличении количества обоих соединений корреляция нарушается, что предполагает другой механизм выделения силикатов из донных отложений, чем известный для фосфатов [112, 225].

Несмотря на важнейшую роль стагнационных явлений в глубоководных впадинах, они характеризуют условия в относительно небольшой части глубинных вод Балтики, составляющей всего 5 % общего объема вод открытой части моря, в то время как на объем вод, содержащихся между нижней границей галоклина и горизонтом 130 м приходится 25 % [479].

10.3.2. Притоки каттегатских вод и структура глубинного слоя

Поступление каттегатских вод регулируется колебаниями разности уровней моря в южной части прол. Каттегат и в Юго-Западной Балтике и усиливается осенью и зимой [479, 509]. Продолжительные западные ветры при низком положении уровня в юго-западной части моря ежегодно создают условия для поступления в Балтику достаточно больших объемов вод повышенной солености. Максимальное поступление таких вод наблюдается зимой, а минимальное — в мае [13, 97].

Притоки североморских вод высокой солености, эффективные для обновления глубинного слоя обширной части моря, происходят раз в 3—5 лет [37, 97, 129, 151, 196]. Наиболее мощные вторжения большого объема вод высокой плотности, эффективных для обновления всего глубинного слоя моря, происходят крайне редко.

Пути распространения притоков, поступающих через Датские проливы, зависят от их мощности (плотности и объема вод) и топографии дна. При этом большее значение имеют глубины над порогами у входа в глубоководные бассейны, нежели глубина самих впадин. Для эффективности притока первоначально более важна плотность поступающих вод, а не объем, но при слишком малом количестве даже высокосоленых вод эффективность притока ограничена [243].

Распространение поступающих через Датские проливы вод высокой плотности и большого объема осуществляется путем последовательного заполнения глубоководных впадин с вытеснением более легких старых вод в верхние слои. Именно такое продвижение входного потока обеспечивает эффективное обновление глубинного слоя североморскими (каттегатскими) водами. Следует учитывать при этом условность данного названия вод, поскольку по мере следования входной поток подвергается трансформации, вовлекая в движение воды, с которыми соприкасается. Соленость и плотность вод при этом уменьшается, а объем вод придонного течения увеличивается, по расчетам Стигебрандта, примерно в 6 раз по отношению к наблюдаемому на входе [479].

Однако достигающие северной части моря мощные вторжения каттегатских вод происходят относительно редко, в большинстве случаев обновление глубинного слоя заканчивается в Борнхольмской, а чаще всего — в Арконской впадине [85, 97]. В связи с этим Грассхофф предложил различать три основных типа распространения притоков (рис. 10.19) [129, 258].

Наиболее часто входные потоки, преодолев потоки в Датских проливах, заполняют Арконскую впадину и уже здесь теряют запас плотности для дальнейшего продвижения в виде придонного течения (тип *I*). В этих случаях трансформированные воды входного потока продвигаются далее в слое 60—80 м по галоклину (рис. 10.19, тип. *I*) [54, 221, 258].

В случаях большей мощности поступлений (тип *II*) обновление глубинного слоя за счет механизма вытеснения старых вод происходит и в Борнхольмской впадине: путь следования вод — через порог Борнхольмсгат (глубина 46 м) между шведским побережьем и о. Борнхольм [97, 129, 226]. Входной поток вытесняет старые воды в придонном слое Борнхольмской впадины и иногда они стекают в Слупский желоб.

Наиболее редкие вторжения (тип *III*) после заполнения поступившими водами довольно большой Борнхольмской котловины до глубины Слупского порога (60 м) обеспечивают дальнейший транзит вод в виде придонного течения. Трансформированный в этом относительно мелководном районе входной поток по Слупскому желобу поступает в Центральный бассейн. Воды, оказавшиеся в южной части Восточной Готландской котловины распространяются в зависимости от их плотности на различных глубинах.

Фонселиус показал, что если позволяет распределение плотности трансформированных по пути следования вод, то, загубляясь, они могут обновлять даже глубинный слой Ландсортской впадины [221]. Это является одной из причин сравнительно меньшей подверженности этой впадины стагнации,

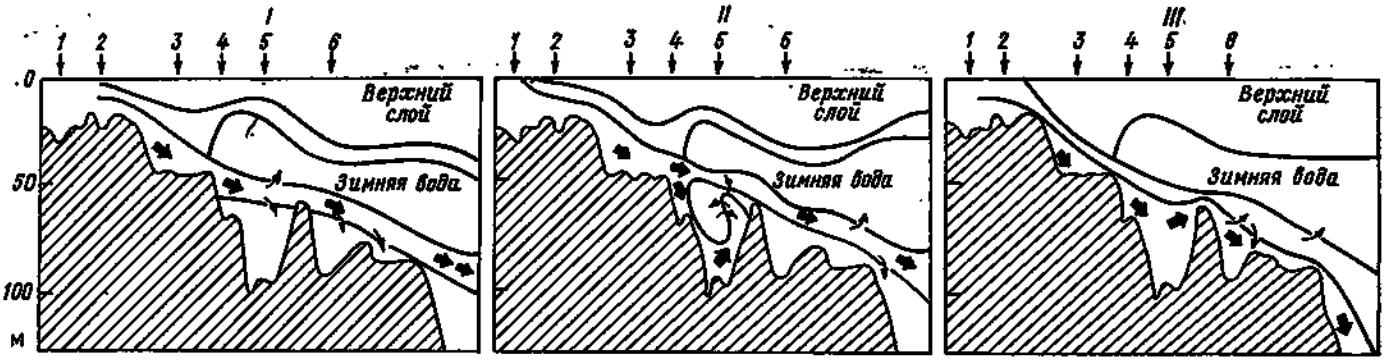


Рис. 10.19. Схемы распространения каттегатских вод от входной зоны до Готландской котловины при различных типах их поступлений.

Типы: *I* — регулярные поступления в слой ниже галоклина; *II* — эпизодические вторжения соленых вод, обновляющие глубинный слой Борнхольмской впадины; *III* — редкие эпизодические вторжения большого объема соленых вод, обновляющие глубинный слой Готландской впадины [259].

несмотря на ее глубину [459 м), максимальную в Балтийском море [221, 225, 258].

Из модельных расчетов процентного распределения входных потоков по интервалам глубин Балтийского моря, проведенных Стигебрандтом [479, 509], следует, что по галоклину происходит адвекция наибольшей части поступающих через проливы каттегатских вод, а около 80 % всех притоков распространяется на глубинах не более 130 м (рис. 10.20). Эти же данные показывают, что во всех прочих случаях наблюдается преимущественное поступление вод в придонный слой Восточной Готландской впадины [309] (см. рис. 10.20), которая заполняется первой из четырех котловин Центрального бассейна. Часть вод при этом поступает к югу, в отделенную от Готландской впадины порогом с глубиной 88 м и относительно не глубокую (116 м) Гданьскую впадину [129, 240].

После заполнения Готландской впадины до глубины порога, разделяющего ее с впадиной Форе (глубина 140 м), воды заполняют и эту впадину и, преодолев порог с глубиной 115 м, далее попадают в Северо-Балтийскую впадину, самая глубокая часть которой — Ландсортская впадина — с севера не отделена порогами и представляет собой узкую глубокую «щель», или колодец [225].

Дальнейшая судьба вод зависит от их плотности. Частично они могут смешиваться с водами

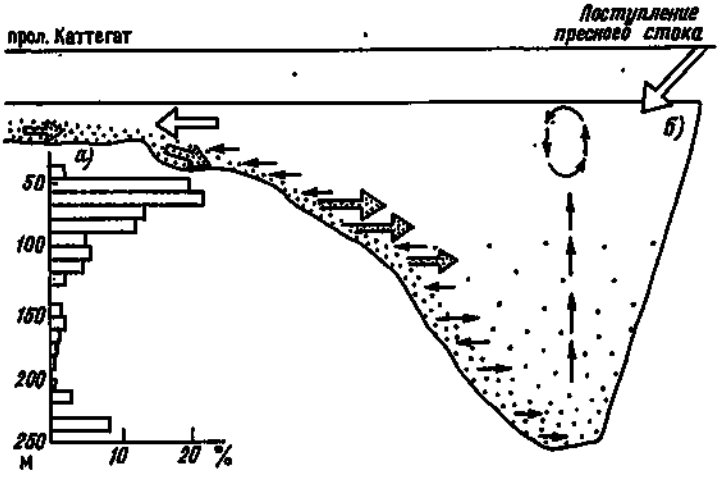


Рис. 10.20. Распределение поступления каттегатских вод в различные интервалы глубин (*а*) и схема крупномасштабной циркуляции вод в Балтийском море (*б*) [204].

Финского залива, но главная их часть посредством антициклонической циркуляции вокруг о. Готланд поступает сначала в Ландсортскую впадину, а оттуда — в Западную Готландскую котловину, во впадины Норчепинг и затем Карлсё, каждая из которых отделена порогами с глубиной над ними около 100 м [129]. Далее из-за малых глубин к югу от о. Готланд вытесненные воды смешиваются с поверхностными [129, 226].

Следует отметить, что если воды, вытесненные из Восточной Готландской котловины после ее заполнения, оказываются тяжелее вод глубинного слоя на севере и западе, то в придонный слой Северо-Балтийской и Западной Готландской котловин первоначально поступают старые воды, насыщенные сероводородом, и лишь затем они вытесняются свежими, как это происходило в 1969—1970 гг. Если вытесненные из Готландской впадины воды имеют меньшую соленость относительно глубинного слоя северных и западных впадин, то они поступают в верхние слои этих районов, принося в них биогены [224, 226].

В Ботнический залив глубинные воды не попадают, поскольку в южной части Аландского моря между побережьями Финляндии и Швеции их путь преграждают три порога с глубинами 70, 65 и 100 м [129].

Наличие порога (глубина 46 м) препятствует непосредственному поступлению вод из Борнхольмской впадины в Западную Готландскую котловину и поэтому «новые» воды могут поступать сюда лишь из восточных и северных глубоководных районов [129, 226].

Крупномасштабные изменения гидрохимических условий в глубинном слое моря, связанные с мощными вторжениями каттегатских вод, происходят с различным сдвигом во времени, зависящим от объема и солености притоков: в Борнхольмской впадине обновление вод происходит довольно быстро — в 1969 г., например, это произошло уже через месяц после поступления вод в проливы, в то время как для Готландской впадины требуется от 4 до 9 мес [37], а для Ландсортской — до двух лет [240].

Поступление свежих вод в придонный слой впадин иногда можно выявить более четко по изменениям гидрохимических показателей, чем по гидрологическим, поскольку к моменту наблюдений соленость может отличаться незначительно, а заметных различий температуры может и не быть [243].

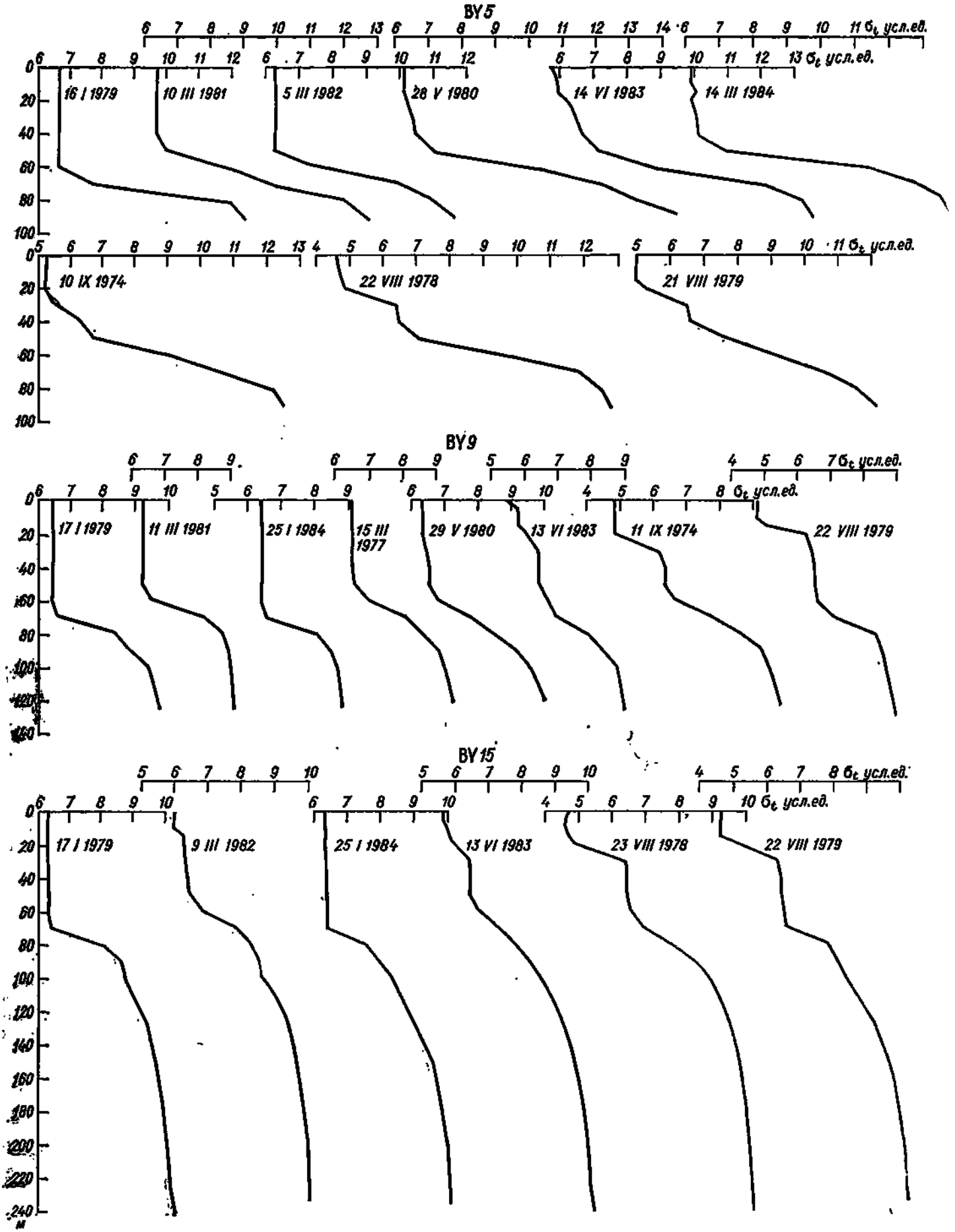


Рис. 10.21. Вертикальные профили плотности вод σ_t в Борнхольмской впадине (ст. BY 5), в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), в Готландской впадине (ст. BY 15) и в северной части моря (ст. BY 29) (по данным НИС «Аргос», Швеция) [285].

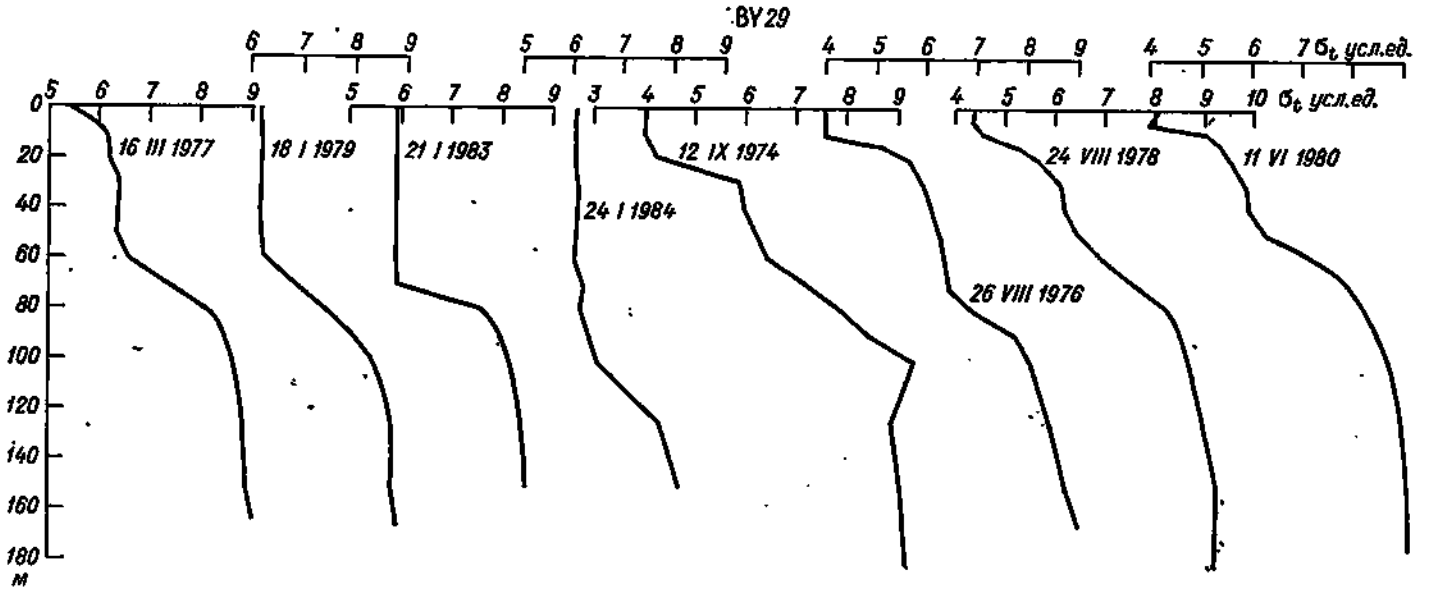


Рис. 10.21.

Влияние притоков зависит от сезона, в течение которого они поступают в проливы [37] и в конкретный район моря, из-за различной трансформации гидрохимических характеристик. При вторжениях в проливах образуется однослойный поток, в котором поверхностные воды перемешаны с глубинными. Например, как показывают данные для Арконской впадины, летом концентрации кислорода в таком потоке могут быть ниже, а зимой — выше, чем в слое, по которому происходит их адвекция в Балтике.

Преимущественное распространение каттегатских вод на глубинах до 130 м позволяет выделить в структуре водных масс так называемый глубинный активный слой, ограниченный снизу вторичным галоклином или простирающийся до дна [37, 239, 309, 479]. В отличие от инертного придонного слоя глубоководных впадин, обновляющегося лишь при сильных вторжениях каттегатских вод, в активный глубинный слой ежегодно поступают притоки различной интенсивности [37].

Активный глубинный слой расположен над всеми глубоководными впадинами и разделяющими их порогами, хотя не всегда отделяется достаточно четко от придонного по градиентам плотности. На рис. 10.21 показаны примеры вертикальных профилей условной плотности σ_t для станций, используемых в данной работе в качестве базовых, полученные по данным наблюдений в различных ситуациях — в зимние и летние месяцы, в течение стагнационных периодов и при обновлениях глубинных вод.

В Борнхольмской впадине активный глубинный слой, расположенный на глубинах 50—75 м, практически сливается с галоклином, а придонный слой на глубине от 80 м [309] выделяется не всегда.

В юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), в глубинные воды которой поступает меньшее количество каттегатских вод, глубинный слой от галоклина до дна почти однороден по плотности. При адвекции каттегатских вод в слое ниже галоклина активный глубинный слой выделяется довольно четко на глубине 80—100 м (январь 1979 г.), но чаще в этих случаях он является продолжением галоклина.

В Готландской впадине придонный слой выделяется практически постоянно на глубине от 150 м [239, 309, 494]. Активный глубинный слой здесь обычно расположен в диапазоне глубин 80—130 м, а вторичный галоклин — на глубине 110—130 м [309, 494].

В северной части моря придонный слой наблюдается от 125 м, но в распределении плотности вод выше этого горизонта наблюдаются значительные различия в связи с сезонными и межгодовыми изменениями залегания галоклина.

В то время как различия температуры и солености в активном глубинном и придонном слоях относительно невелики, гидрохимические характеристики их различаются в большей степени, а при развитии анаэробных условий эти слои представляют химически различные водные массы [239]. В отличие от разделения водной толщи постоянным галоклином, выделение этих двух водных масс в глубинном слое временное. Время жизни вод придонного слоя впадин зависит от района моря и колеблется в широких пределах, тогда как в активном глубинном слое для полного обновления вод требуется около трех лет [479].

Выравнивание гидрохимических показателей в активном глубинном и придонном слоях наблюдается редко — после мощных притоков каттегатских вод, обновляющих всю толщу глубинного слоя.

На фоне общепринятой оценки входных потоков в Датских проливах в качестве главного источника аэрации глубинного слоя (при мощных вторжениях — в результате его обновления, при более слабых — за счет адвекции) [37, 54, 129, 234, 264] существует гипотеза о равноценном значении вертикального обмена с верхним слоем, предложенная на основе модельных расчетов [203].

Роль мощных вторжений каттегатских вод для формирования гидрохимических условий в некоторых глубоководных впадинах Балтики также неоднозначна. В связи с тем что для радикальной аэра-

ции всей толщи глубинного слоя моря эффективны лишь наиболее мощные вторжения североморских вод высокой солености, происходящие относительно редко, увеличение их мощности и повторяемости может рассматриваться как внешний фактор поддержания благоприятного кислородного режима и экологического состояния бентали. Однако именно редкие притоки вод высокой солености являются причиной последующих стагнаций, поскольку усиливают стратификацию и ухудшают условия вертикального обмена [239]. Высокая соленость балтийских глубинных вод, кроме того, препятствует повторению мощных вторжений, распространяющихся в виде придонного течения. Более слабая адвекция, осуществляемая по слою с меньшей соленостью, преимущественно по галоклину, в этих условиях становится менее эффективной для аэрации глубинных вод. Этот комплекс гидрологических условий создает базу для быстрого развития стагнационных явлений.

В этой связи представляют интерес расчеты Рама [509], который показал, что причиной дефицита кислорода в обширной части глубоководной зоны Балтики является неоднородное распределение по глубинам соленых вод, постоянно поступающих через Датские проливы. По его данным, общее количество кислорода, которое поступает в море с этими притоками, могло бы быть вполне достаточным для аэрации всех глубоководных бассейнов Балтики, если бы было однородно распределено по всей толще глубинных вод. Полученное при этом среднее потребление кислорода в процессах биохимической деструкции соответствует оценкам седиментации органического вещества, полученным Эльмгреном [205]. Но в реальных условиях неоднократной аэрации количество лабильного органического вещества в глубинном слое избыточно по отношению к содержанию кислорода и скорость убыли кислорода в процессах биохимического окисления лимитируется его концентрациями, а не поставками органического материала [234].

10.3.3. Циклический характер межгодовой изменчивости гидрохимических условий в глубинном слое моря

Рассмотренные в пп. 10.3.1 и 10.3.2 процессы формируют специфический циклический характер изменчивости гидрохимических условий в слое ниже галоклина, определяемый повторяемостью его обновления притоками каттегатских вод. Длительность циклов в связи с апериодическим характером мощных вторжений, имеющих различную частоту и эффективность для отдельных районов, колеблется в весьма широком диапазоне — от годичного цикла в Арконской впадине до максимального из известных (15 лет) последнего цикла в Готландской впадине, продолжающегося и в 1992 г.

Тщательное исследование изменений гидрохимического состояния вод, связанных с чередованием стагнаций и обновлением глубинного слоя Балтики, проведено Фонселиусом на основе анализа натурных данных, а для довоенного этапа также и на основании литературных источников [225, 226, 235, 240, 243]. Обзор наиболее мощных поступлений каттегатских вод в Балтику в течение текущего столетия сделан Франком и Маттеусом [245].

Предложенные графики оказались весьма полезными для представления о многолетних изменениях в глубоководных впадинах моря, а для Готландской впадины стали классическими, поскольку приводятся практически во всех обзорах (рис. 10.22). Особенно наглядным и удобным для статистического анализа оказался способ представления кислородных и сероводородных условий как частей одной системы: концентрации сероводорода, выраженные в промиллях по объему, при удвоении соответствуют отрицательным значениям концентраций кислорода, исходя из эквивалента сероводорода в реакции окисления [225] (см. п. 10.3.1).

Для выделения поступлений «новых» вод в придонный слой впадин необходим комплексный анализ изменений солености и содержания кислорода, поскольку при рассмотрении данных эпизодических наблюдений «опознать» приток только по гидрологическим показателям иногда затруднительно. Это связано с разбавлением вод к моменту наблюдений, особенно при небольших различиях плотности «старых» и поступающих вод, влиянием других гидродинамических процессов, которые могут быть причиной изменений, а в северной и западной частях моря — из-за особенностей распространения притоков, поступлению которых предшествуют затоки «старых» вод, вытесненных из Восточной Готландской впадины (см. п. 10.3.1).

Как показывают графики (см. рис. 10.22), при смене циклов в придонном слое Борнхольмской и Готландской впадин происходит скачкообразное возрастание солености и концентраций кислорода с последующим их постепенным уменьшением, темпы которого в самом начале высоки, а затем несколько замедляются. В Готландской впадине в каждом цикле имеются фазы кислородных (аэробных) и сероводородных (анаэробных) условий, при смене которых гидрохимические характеристики, как отмечено в п. 10.3.2, резко меняются. В Северной котловине и Западной Готландской впадине фазы анаэробных условий наблюдались реже и были более кратковременными, а в Борнхольмской впадине отмечались лишь эпизодически в конце циклов.

Следует отметить, что хотя определяющая роль характера вторжений в межгодовой изменчивости условий в глубинном слое общепризнана, не выработано общих критериев, позволяющих выделить межгодовые циклы по всему морю. Первоначально, анализируя изменения солености и кислородных условий у дна Готландской впадины с 1952 по 1970 г., Фонселиус и Раттаназен выделили и описали 13 различных по эффективности (в отношении аэрации) поступлений «новых» вод [243], а к началу 1980 г. их насчитывалось уже 21 [235]. В этот перечень включались любые притоки, в том числе и те, что лишь уменьшали содержание сероводорода на данной глубине или замедляли уменьшение концентраций кислорода. Эти сведения чрезвычайно важны, поскольку показывают относительность понятия инертности придонного слоя в Готландской впадине и значимость даже слабых притоков, замедляющих темпы ухудшения кислородных условий. Эти данные важны также для их учета при оценке скорости «срабатывания» кислорода в течение периодов между эффективными поступлениями каттегатских вод и тенденций в ее изменении, что, к сожалению, не было сделано в работе [344].

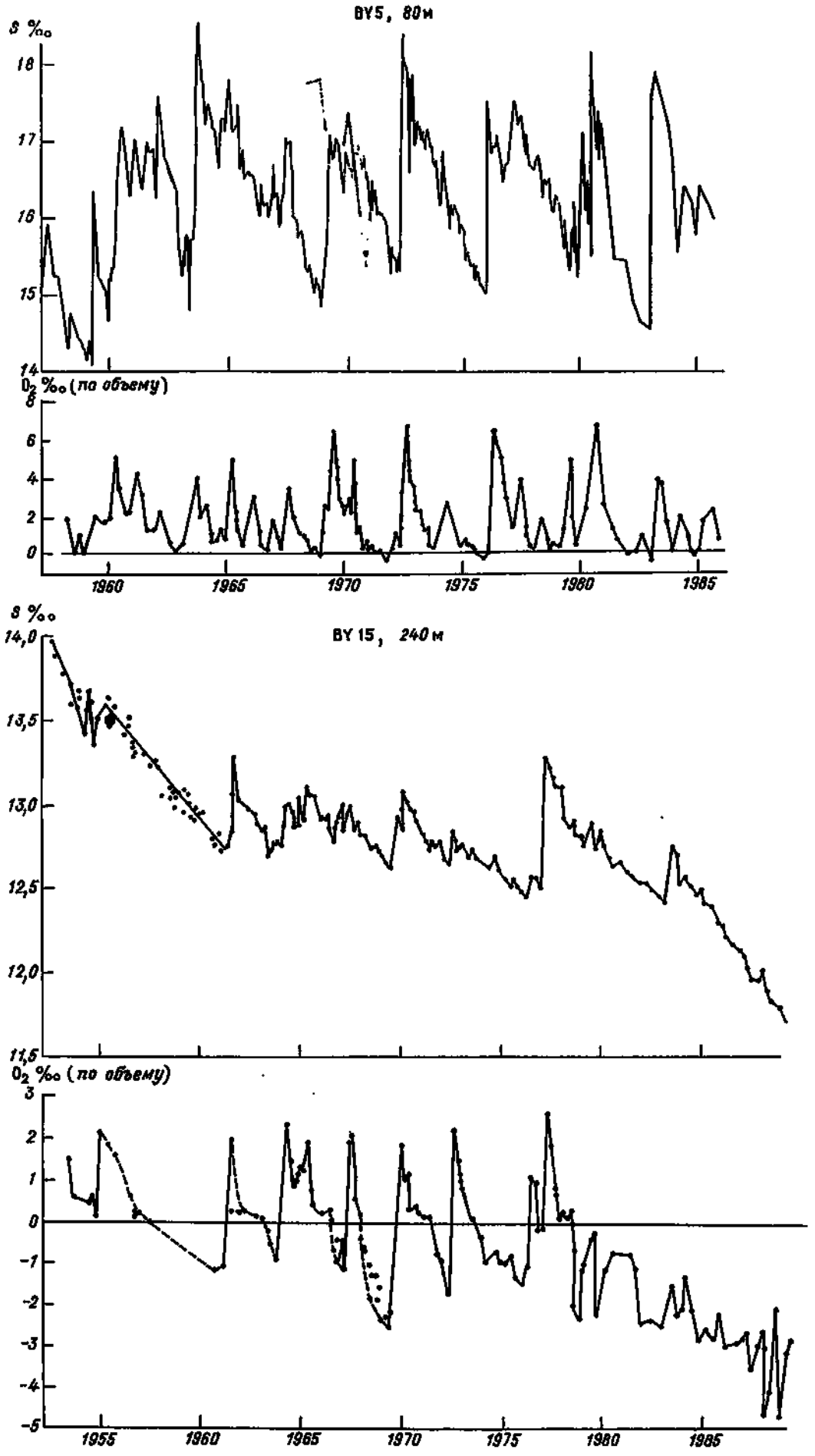
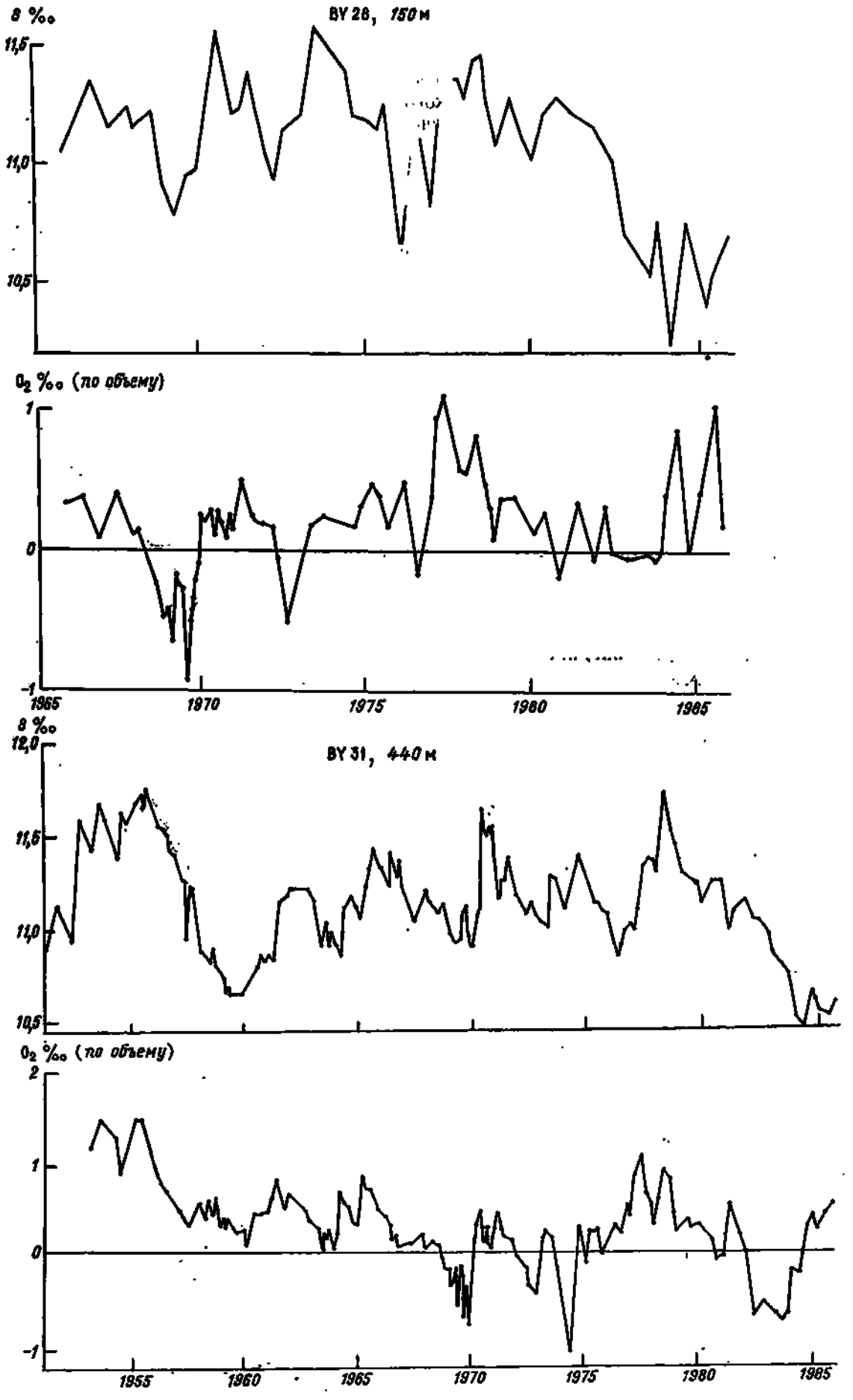


Рис. 10.22. Соленость, содержание кислорода и сероводорода (отрицательные значения) в (ст. BY 15) (Фонселиус, цит. по [410]), в северной части моря (ст. BY 28) [240] и



1957—1986 гг. в придонном слое Борнхольмской впадины (ст. BY 5) [240], Готландской впадины в Ландсортской впадине (ст. BY 31) [240].

При выделении наиболее значительных притоков с точки зрения их влияния на гидрохимическое состояние в придонном слое Готландской впадины целесообразно принимать во внимание лишь те из них, что сопровождаются сменой анаэробных условий на аэробные. Из 21 поступления в течение 1952—1980 гг. к этой категории можно отнести лишь 7, что справедливо и для продления этого интервала до 1992 г. Как показывает сопоставление с изменениями солености, каждому кислородному максимуму, открывающему новый цикл, соответствует максимум солености, хотя без данных по кислороду выделение притоков, обновляющих придонный слой впадин, было бы затруднительным [239, 243].

В ноябре—декабре 1951 г. произошло наибольшее по мощности из известных вторжение каттегатских вод, в результате которого в море поступило более 200 км^3 вод высокой солености. В глубинных водах Готландской впадины соленость в 1952 г. повысилась в 1—2 ‰, а температура — на 1 °С [221, 264]. Последующее уменьшение солености и содержания кислорода было прервано притоком, зарегистрированным у дна Готландской впадины в конце 1954 г., которым был начат первый из циклов, рассмотренных по данным систематических наблюдений в этом районе (рис. 10.22). Длительное снижение солености после этих притоков до уровня, характерного для 60—80-х годов, продолжалось почти 8 лет.

Из циклов, сформированных изменениями солености у дна Борнхольмской и Готландской впадин, большую часть можно опознать и в изменениях этих показателей в северной части моря (ст. BY 28, рис. 10.22, *в*), где систематические ряды данных имеют более позднее начало. Для Ландсортской впадины среди максимумов солености можно найти почти все максимумы, соответствующие наибольшим вторжениям в Борнхольмскую впадину, но со сдвигом во времени почти в 2 года [240] (рис. 10.22). Однако вид циклов межгодовой изменчивости солености и содержания кислорода в северной части моря и особенно в Ландсортской впадине отличается от характерного для Борнхольмской и Готландской впадин из-за особенностей распространения притоков, рассмотренных ранее (см. п. 10.3.2): возрастание этих показателей происходит, как правило, постепенно и не совпадает по времени для кислорода и солености.

Специфический характер изменения показателей в глубинном слое Балтийского моря, представленный графически на рис. 10.22, предопределяет известные трудности для статистического анализа изменчивости. При использовании средних многолетних годовых оценок «размывается» размах изменений, поскольку эффекты единовременных притоков распределяются на весь год и специфика процессов при этом нивелируется. Средние многолетние месячные оценки неприемлемы в качестве универсальных для представления динамики гидрохимических показателей в глубинном слое, так как годовая ритмика влияния притоков наблюдается лишь в некоторых районах и в определенной части глубинных вод (см. п. 10.3.4). Использование этих показателей в качестве основных оценок для придонного слоя впадин может лишь исказить представление о характере изменчивости гидрохимических условий. (Исключение составляет Арконская впадина, для которой годовой ход является доминирующим в глубинном слое и рассматривается в данном выпуске в комплексе с верхним слоем.)

В связи с этим для отражения динамики гидрохимических характеристик в глубинном слое Балтийского моря в литературе принято представлять графически либо непосредственно натурные данные в виде их временны́х рядов на стандартных горизонтах (рис. 10.22), либо временной ход изолиний в толще вод [479] (см., например, рис. 12.36 для кислорода). Оба типа графиков иллюстрируют смену условий в результате значительных притоков каттегатских вод и фактически отражают условное время жизни вод в данном районе моря от одного их обновления до другого.

В данной работе предложено статистическое описание изменчивости гидрохимических характеристик в глубинном слое на основе циклов, сформированных наиболее значительными вторжениями каттегатских вод, достигшими не только Борнхольмской впадины, но и Готландской, даже если они проявились в относительно кратковременных изменениях показателей у дна в районе ст. BY 15. Практически к ним относятся интервалы между максимумами солености у дна Борнхольмской впадины (ст. BY 5, рис. 10.22 и 10.23). Однако определение в массивах натурных данных Борнхольмской впадины конкретных дат наблюдений в качестве временны́х границ циклов оказалось затруднительным в связи с наложением влияния меньших притоков, имеющих лишь локальное значение, что иллюстрирует рис. 10.23. Поэтому общие для всех глубоководных базовых станций циклы были выделены на основании анализа изменений солености и содержания кислорода в придонном слое всех этих районов, а их временны́е границы (по имеющимся в массиве наблюдениям) представлены в табл. 10.1.

При этом необходимо дать несколько пояснений. Все циклы, признанные общими для анализа изменчивости гидрохимических характеристик в глубинном слое моря, обнаружены по аэрации придонного слоя в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и, следовательно, сформированы вторжениями типа III по классификации Грассхоффа [258]. Однако не все они проявились в смене кислородных условий у дна Готландской впадины. Это относится к кратковременному изменению гидрохимических показателей в результате притока в 1967 г., но особенно к притокам в 1980 и 1983 гг. (см. рис. 10.22). Тем не менее они нашли отражение в выделении межгодовых циклов, поскольку их воздействие оказалось достаточно крупномасштабным, проявившись в изменении гидрохимических характеристик активного глубинного слоя Готландской впадины и глубинного слоя северной части моря (ст. BY 29). В итоге выделенные циклы, по которым проведен статистический анализ изменчивости гидрохимических показателей в глубинном слое моря (см. табл. 10.1), соответствуют циклам межгодовых колебаний солености у дна Борнхольмской впадины (см. рис. 10.22). Следует отметить, что приведенные в табл. 10.1 сдвиги дат начала циклов для базовых станций не всегда адекватно отражают пространственные различия времени, необходимого для поступления притока в этот район моря, а иногда обусловлены отсутствием наблюдений (чаще всего для ст. BY 29).

Изменения гидрохимических показателей в выделенных циклах, вызванные физическими, биохи-

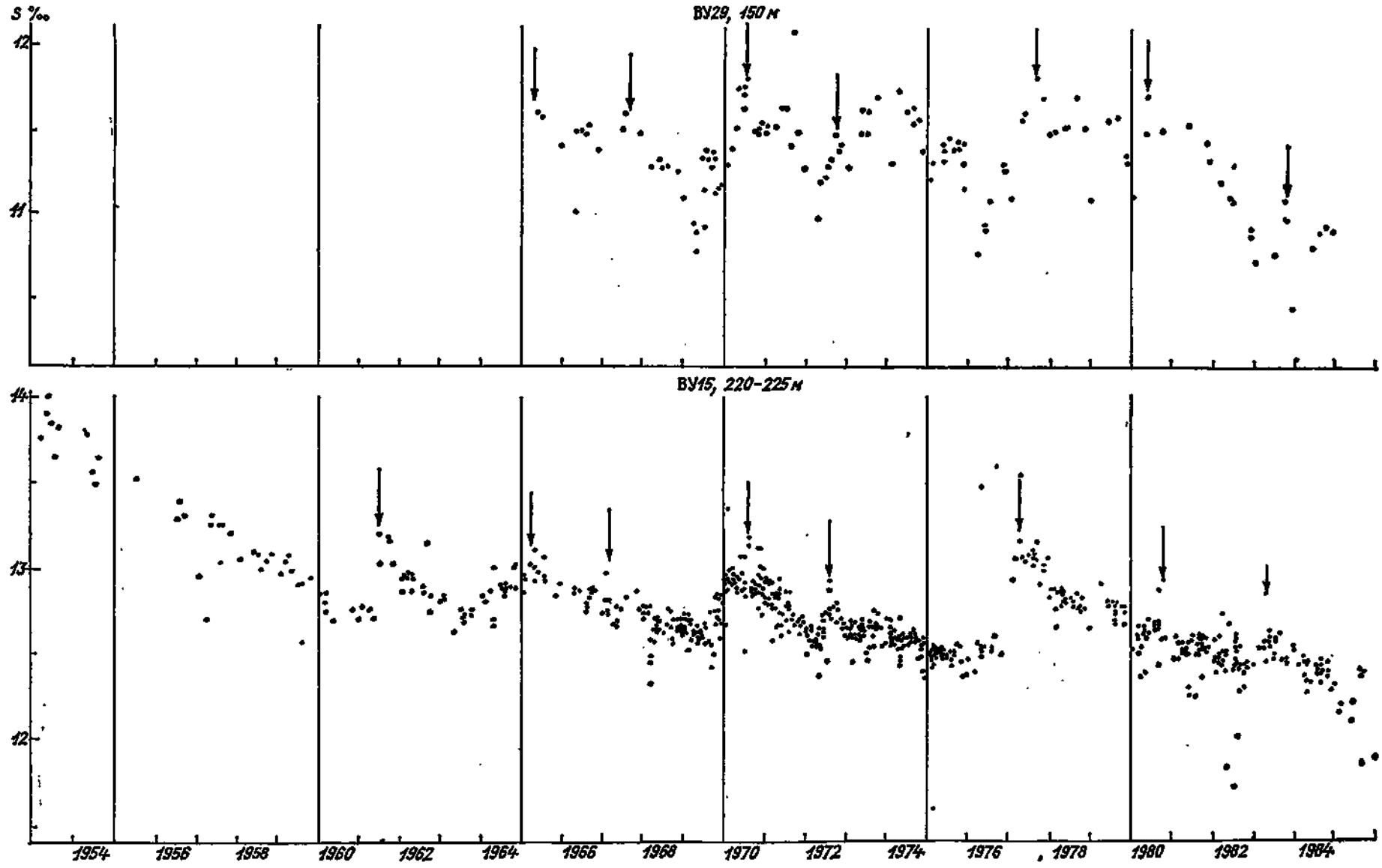


Рис. 10.23. Соленость у дна базовых станций по данным справочного массива с выделением притоков каттегатских вод (обозначены стрелками).

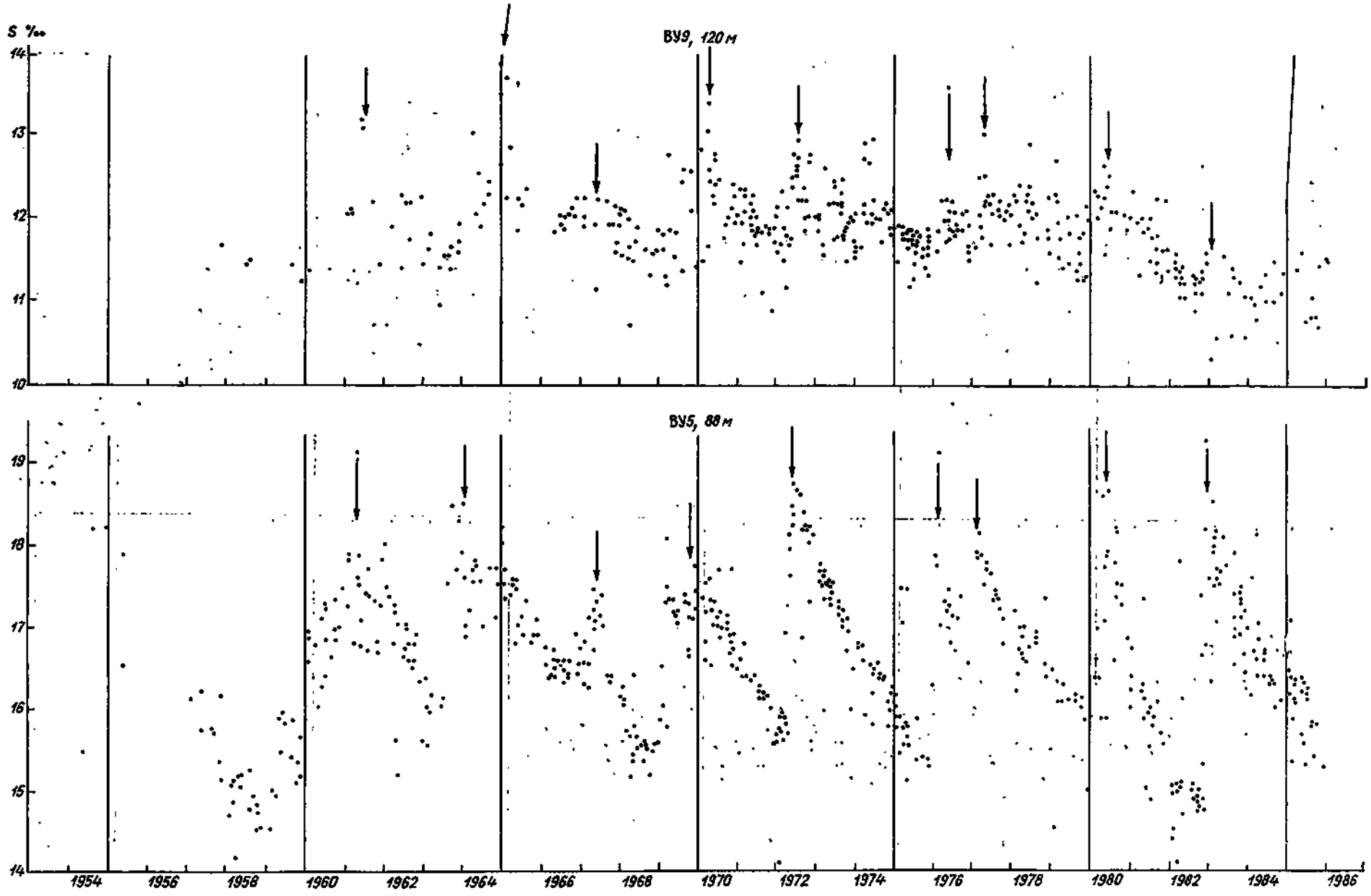

S ‰
ВУ9, 120 м
ВУ5, 88 м
14
13
12
11
10
19
18
17
16
15
14
1954
1956
1958
1960
1962
1964
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1984
1986

Рис. 10.23.

Таблица 10.1

Даты начала циклов межгодовой изменчивости гидрохимических условий в глубинном слое по данным базовых станций (1959—1986 гг.)

Станция	1959—1963 гг.	1963—1967 гг.	1967—1969 гг.	1969—1972 гг.	1972—1976 гг.	1976—1979 гг.	1980—1983 гг.	1983—1986 гг.
BY 5	3 II 1959	22 VII 1963	1 V 1967	22 I 1969	15 III 1972	1 I 1976	15 I 1980	22 XI 1982
BY 9	1 XI 1960	9 I 1964	23 IV 1967	18 III 1969	12 V 1972	3 III 1976	13 IV 1980	25 III 1983
BY 15	18 V 1961	28 II 1964	21 V 1967	20 X 1969	13 VI 1972	25 XI 1976	25 VII 1980	28 III 1983
BY 29	—	28 V 1965	3 VI 1967	20 I 1970	1 II 1973	8 XI 1976	29 X 1980	14 XI 1983

мическими и химическими процессами, происходят в условно одной, хотя и трансформирующейся, водной массе до момента замены ее другой в результате мощного вторжения. В случаях, когда такой замены не происходит, как наблюдалось для некоторых притоков в придонном слое Готландской впадины, их влияние может проявиться в состоянии условий в активном глубинном слое или галоклина.

Для статистического анализа изменений, которые происходят в течение межгодовых циклов и однонаправленных для большинства гидрохимических показателей, как нельзя более подходит расчет квартилей распределения данных. Для кислорода, например, максимальные и верхнеквартильные значения характеризуют соответственно поступившие воды и начальную фазу цикла, когда наблюдаются наибольшие скорости снижения концентраций, тогда как значения от нижнеквартильных до минимальных относятся к фазе окончания цикла, когда скорость изменений концентраций уменьшается. Размах изменений ($x_{0,25}$—$x_{0,75}$) отражает средние условия в течение большей части цикла. При смене аэробных условий на анаэробные и устойчивом сохранении последних расчет характеристик, анализируемых в последующих главах, проводился отдельно для этих фаз каждого цикла, что дает возможность оценить количественно резко различающийся для ряда гидрохимических показателей диапазон значений в тех и других условиях.

Сопоставление статистических характеристик для выборок данных для различных глубин, полученных в периоды аэробных и анаэробных условий у дна, дает возможность определить, в какой толще вод происходят изменения, вызванные сменой окислительно-восстановительных условий в течение данного цикла. Имеется возможность количественного сопоставления эффектов, сопровождающих возникновение аэробных условий в течение сменяющих друг друга циклов.

Статистические оценки для циклов в целом, характеризующие изменения показателей на стандартных горизонтах, дают возможность определить, в каком слое произошло обновление вод или отразилось его влияние. Сопоставление характеристик для определенных глубин разных районов позволяет оценить средние многолетние пространственные различия для тех или иных условий. И наконец, что особенно важно, рассчитанные для циклов характеристики дают основу для более объективного и детального анализа многолетней изменчивости гидрохимических показателей по сравнению с распространенным способом линейной аппроксимации тенденций для произвольно выбранных многолетних периодов.

10.3.4. Факторы, формирующие сезонные изменения гидрохимических показателей в глубинном слое моря

Статистический анализ, проведенный в данной работе, показал наличие в глубинном слое моря внутригодовой изменчивости некоторых гидрохимических показателей — концентраций кислорода, двуокиси углерода, фосфатов, нитратов и значений pH, обусловленной, с одной стороны, гидродинамическими факторами (адвекция каттегатских вод, апвеллинг, вертикальное перемешивание), а с другой — биохимическими, например интенсификацией аммонификации и нитрификации в галоклине.

Сезонная динамика образования и оседания взвешенного органического вещества может быть фактором сезонной изменчивости и других соединений, образующихся при его минерализации. Влияние этого фактора может проявляться в зонах накопления органических взвешенных веществ, к которым в толще вод под верхним квазиоднородным слоем относятся галоклин и придонный слой [13, 57].

Ю. В. Суставов в исследованиях характера влияния водообмена через Датские проливы на состояние гидролого-гидрохимических условий Балтийского моря важное значение придает сезонным колебаниям показателей в глубинном слое [85]. У дна Борнхольмской впадины на фоне 30-месячной цикличности колебаний им был обнаружен годовой ход солености с максимумом в летнее время, в Готландской впадине максимум наблюдается в весенне-летний период и обусловлен адвекцией более соленых глубинных вод из Южной Балтики.

В исследованиях Калейса [37, 309] показано влияние адвекции каттегатских вод на годовой ход температуры в активном глубинном слое юго-восточной части Готландской котловины через 5—7 мес после их прохождения через Датские проливы [309]. Практически ежегодное повышение температуры в летнее время можно обнаружить также на глубине 100 м в Готландской впадине (рис. 10.24).

Влияние адвекции ежегодных притоков каттегатских вод отмечалось Калейсом при рассмотрении кислородного режима — усиление ее приводит к повышению концентраций кислорода в активном глубинном слое моря [37].

Влияние адвекции каттегатских вод на режим фосфора в толще глубинных вод моря отмечается в работе [113].

Сезонные эффекты в изменениях гидрохимических условий в глубинном слое в некоторых районах моря могут быть вызваны усилением вертикального перемешивания, которое в осенне-зимний период

BY15, 100 м
T °C
6
5
4
1952
1954
1956
1958
1960
1962
1964
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1984

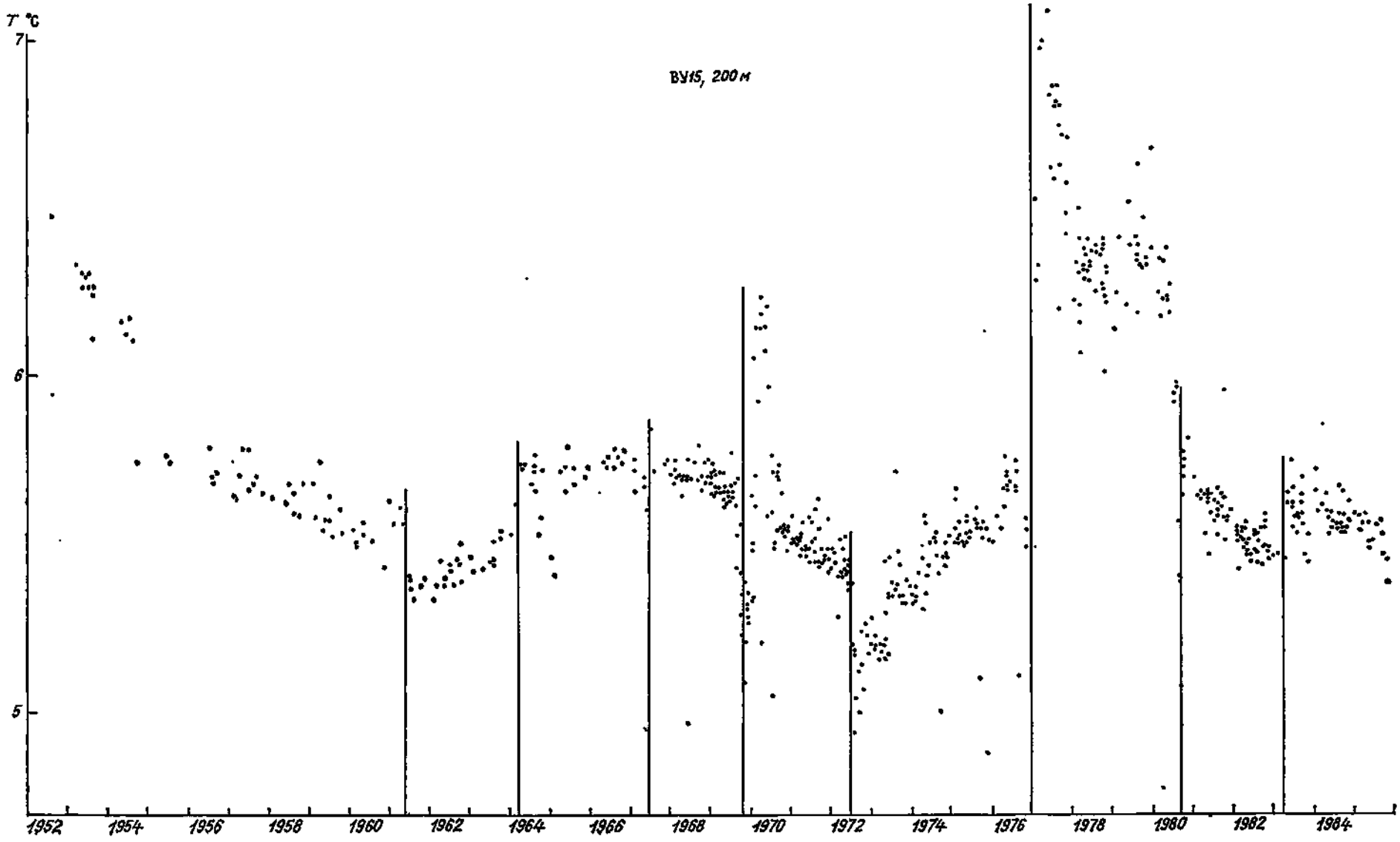


Рис. 10.24. Температура в глубинном слое (горизонты 100 и 200 м) Готландской впадины по данным справочного массива с выделением притоков каттегатских вод (обозначены стрелками).

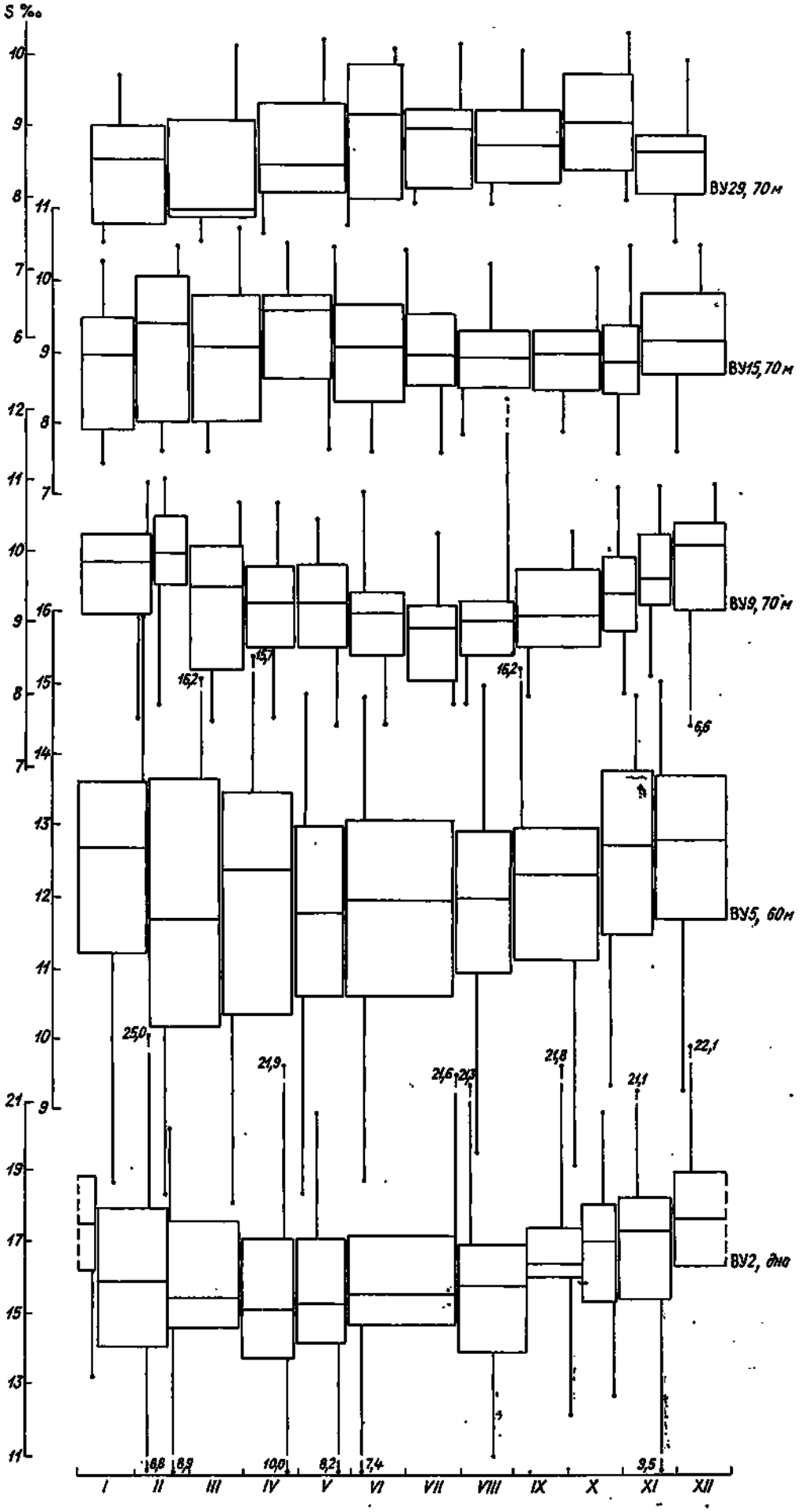


Рис. 10.25. Годовой ход солености в галоклине глубоководной части моря (станции BY 5, BY 9, BY 15 и BY 29) и у дна Аркон-ской впадины (ст. BY 2) по данным квартильного анализа.

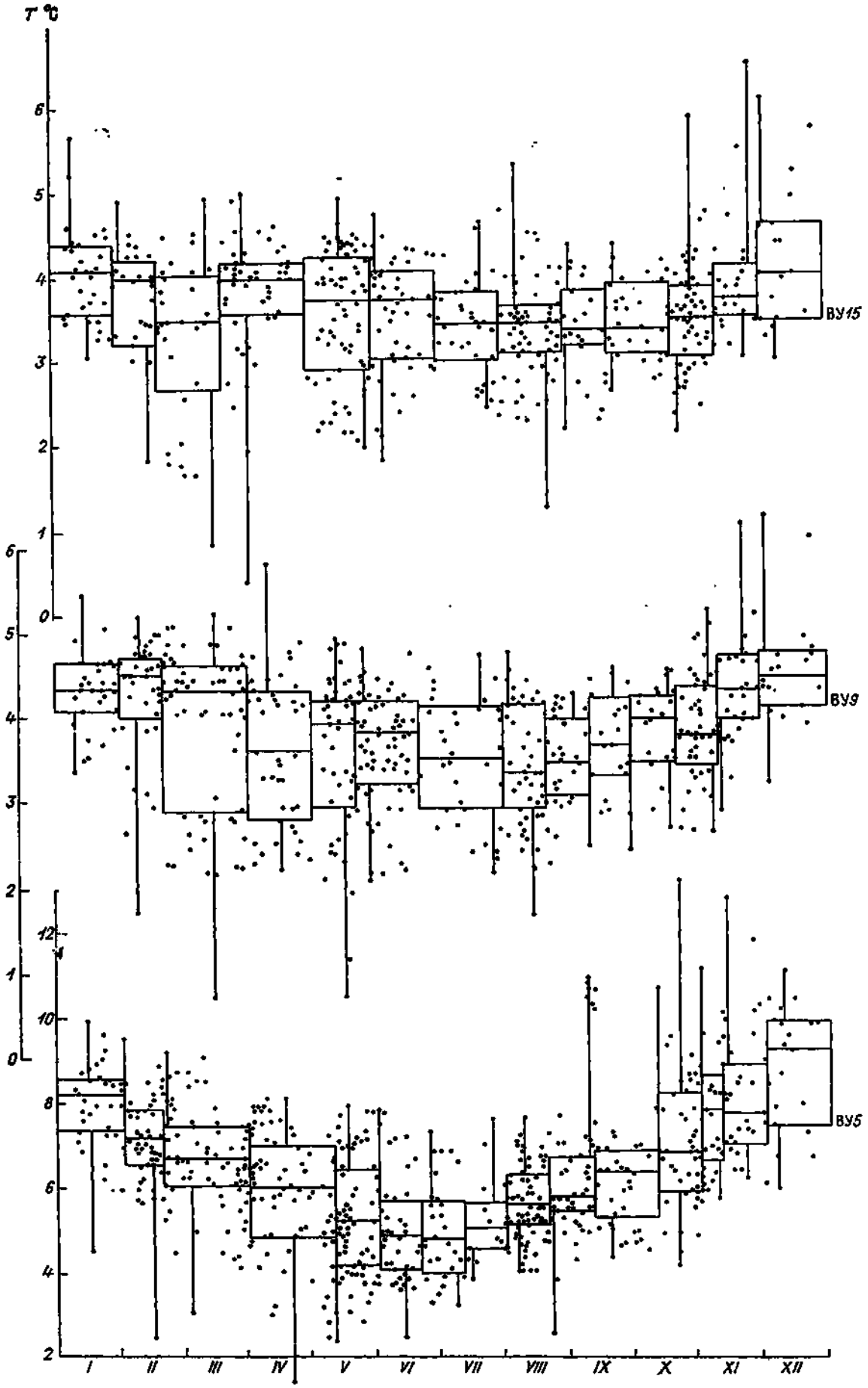


Рис. 10.26. Годовой ход температуры в галоклине (глубина 70 м) Восточной Готландской котловины (станции ВУ 15 и ВУ 9) и Борнхольмской впадины (ст. ВУ 5) по данным квартильного анализа.

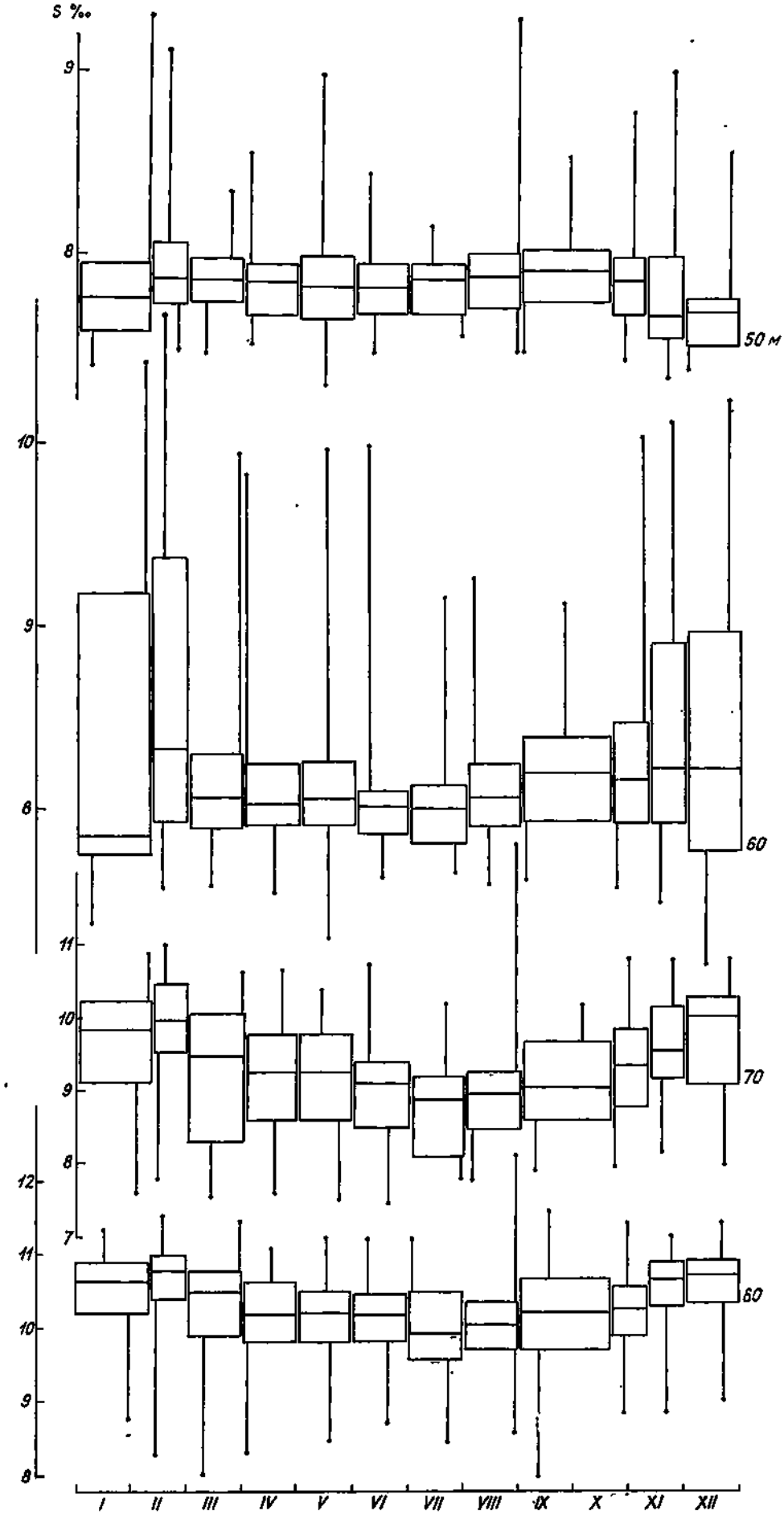


Рис. 10.27. Годовой ход солености в галоклине и на его границах с верхним и глубинным слоями в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) по данным квартильного анализа.

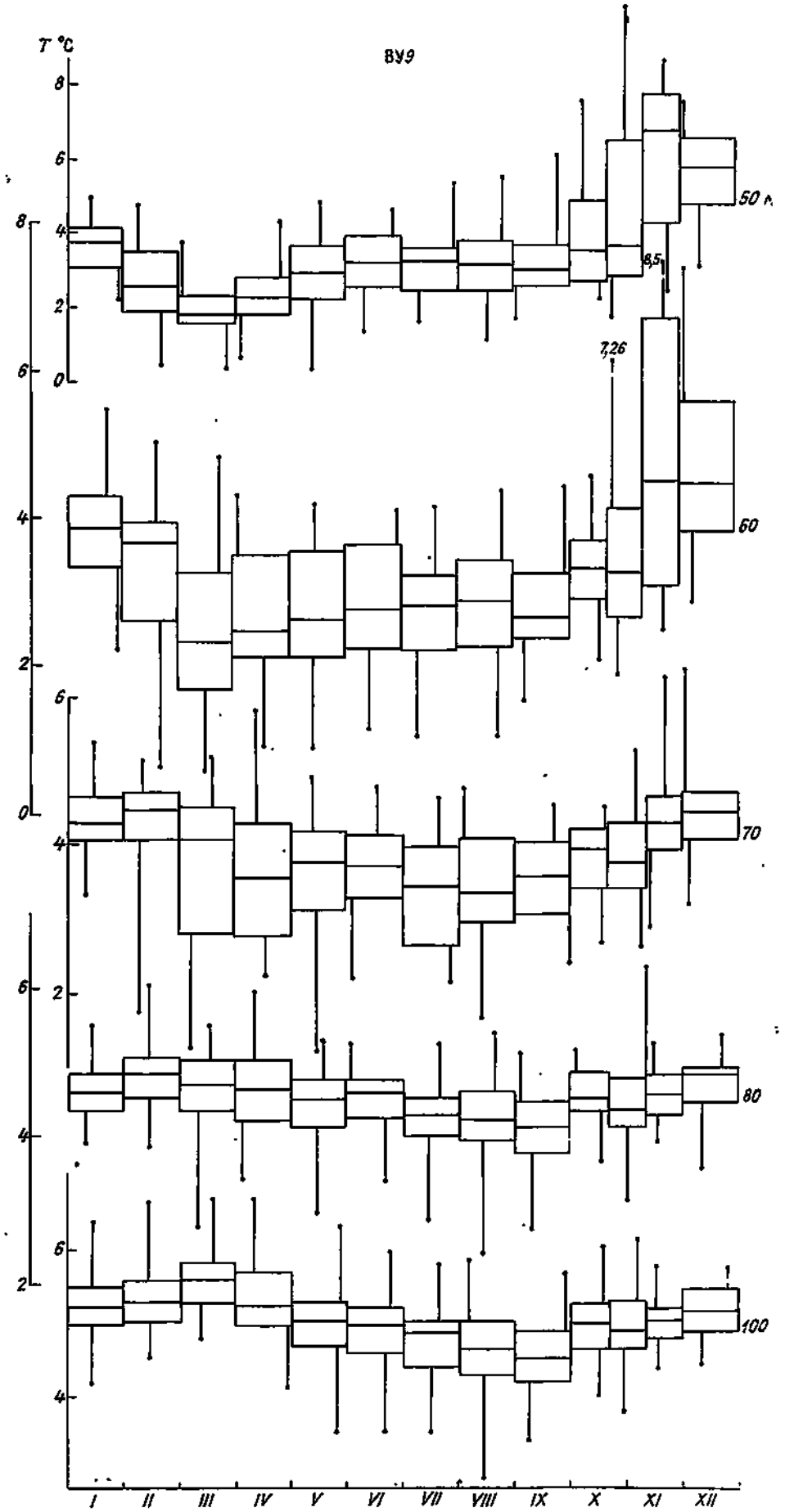


Рис. 10.28. Годовой ход температуры на различных глубинах в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и в Готландской впадине (ст. BY 15) по данным квартильного анализа.

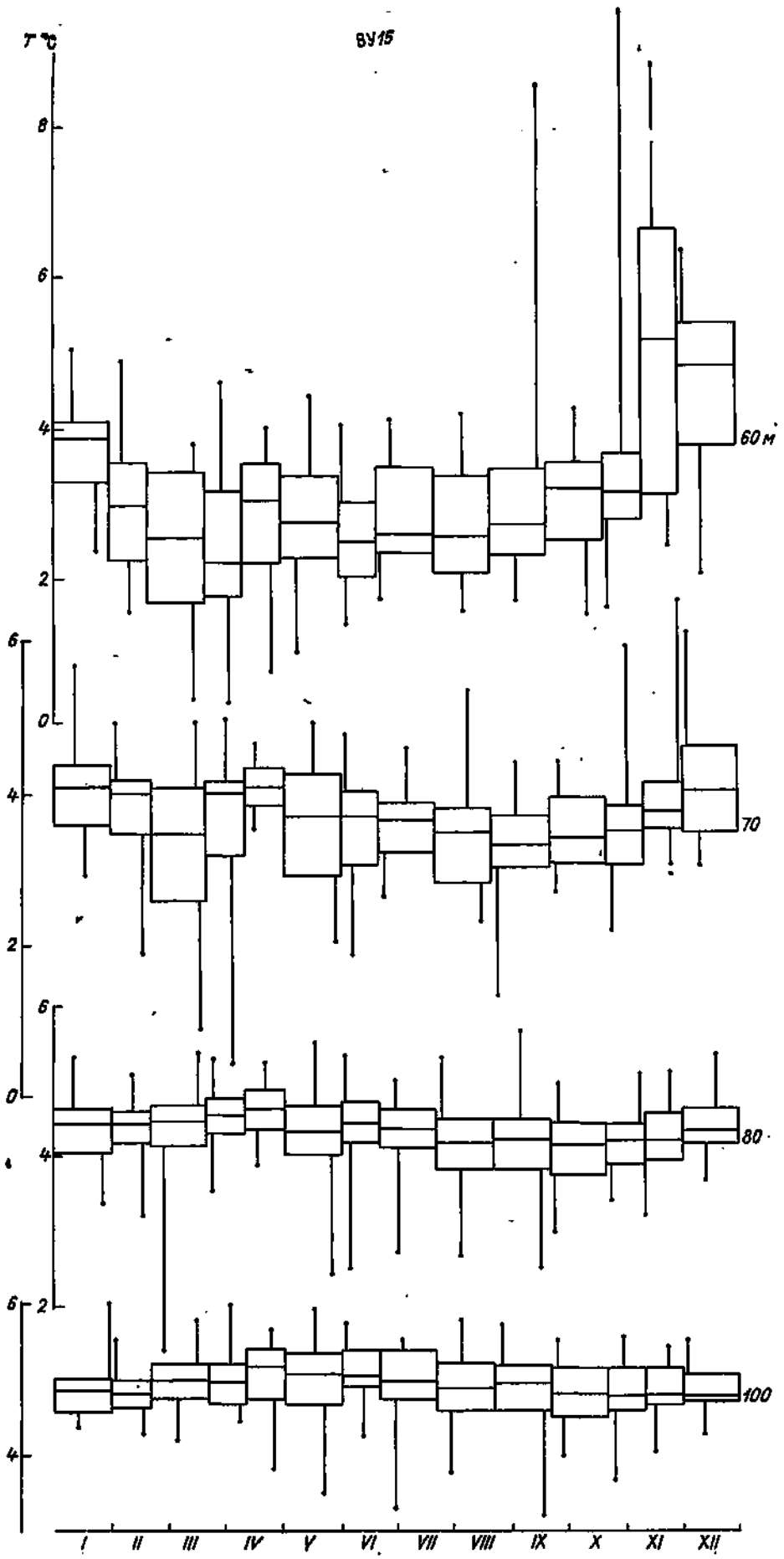

T °C
8У15
8
6
4
2
0
60 м
6
4
2
0
70
6
4
2
0
80
6
4
2
100
I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
IX
X
XI
XII

Рис. 10.28.

проникает здесь до значительных глубин в северо-восточной части моря [221]. Иногда в этих районах в конце осени — начале зимы наблюдается перемешивание до глубин 100—120 м, что вызывает уменьшение солености в этом слое на 4‰ (от 10,5 до 6,5‰) и улучшение кислородных условий [39]. У дна впадины Карлсё влияние зимней конвекции проявляется в аэрации вод даже у дна [37, 39, 54].

Сезонные эффекты изменения гидрохимических условий в глубинных водах характерны для относительно мелководных районов, включая Арконскую впадину [248, 346], первую на пути следования каттегатских вод в море.

Учитывая перечисленные факторы, определяющие сезонное изменение гидрохимических показателей в глубинном слое Балтийского моря, и принимая температуру и соленость вод за основные индикаторы водных масс, проанализируем их сезонный ход на глубоководных горизонтах базовых станций (см. рис. 10.8, рис. 10.25—10.28).

Повышенная соленость, наблюдаемая у дна Арконской впадины (ст. BY 2) с сентября по февраль (с максимумом в декабре — начале января) и обусловленная усилением входных потоков в Датских проливах, обнаруживается в галоклине глубоководных районов восточной части моря с закономерными сдвигами сроков: в Борнхольмской впадине (ст. BY 5) — с конца октября по апрель, в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) — с конца октября по май, в Готландской впадине (ст. BY 15)) — с декабря и далее почти всю первую половину года (см. рис. 10.26).

Пониженная соленость у дна Арконской впадины наблюдается с апреля по август и также со сдвигом во времени (с мая по октябрь) в Борнхольмской впадине. В галоклине центральной части моря довольно четко выражен годовой минимум солености: в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) — с мая по август, а в Готландской впадине (ст. BY 15) — с августа по октябрь.

В северной части моря (ст. BY 29) годовой ход солености в галоклине определяется, по-видимому, в большей степени, чем адвекцией, сезонной динамикой вертикального перемешивания: наименьшая соленость наблюдается здесь с декабря по март в условиях особенно глубокого и интенсивного в этом районе моря перемешивания вод верхнего и глубинного слоев.

Годовой ход температуры в галоклине довольно четко выражен в Борнхольмской впадине на глубине 70 м (размах около 4 °С) (см. рис. 10.28). Однако в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) размах уменьшается до 1,1 °С, а в Готландской впадине (ст. BY 15) — до 0,6 °С.

Противофазность по отношению к годовому ходу температуры в верхнем слое моря является общей закономерностью ее колебаний в галоклине, несмотря на некоторые пространственные различия: максимум характерен для декабря — января (в юго-восточной части Готландской котловины — со 2-й декады ноября по февраль), а минимум наблюдается в летние месяцы с некоторым сдвигом к осени в Готландской впадине и в северной части моря.

Проведенный анализ сезонных изменений температуры и солености показывает, что от Арконского бассейна до Готландской впадины в многолетних статистических характеристиках проявляются с закономерным пространственным сдвигом во времени зимние и летние притоки, генерируемые входными потоками в Датских проливах, а также ослабление последних весной и в начале лета, когда адвекция вод осуществляется преимущественно по границе галоклина с верхним слоем или выше галоклина.

11. ИОННЫЙ СОСТАВ И СОЛЕВОЙ БАЛАНС

11.1. Состояние исследований

В водах Мирового океана в целом существует практическое постоянство соотношений между концентрациями так называемых элементов основного солевого состава — ионов Cl^-, Na^+, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, K^+, Br^-, HCO_3^- и других, а также между каждым из них и их суммой [96]. Несмотря на относительно низкую соленость вод Балтийского моря, их солевой состав весьма близок к океаническому из-за слабой минерализации впадающих речных вод.

Впервые солевой состав балтийских вод был достаточно подробно рассмотрен в работе Заринса и Озолинса [19], основанной на результатах наблюдений, выполненных в 1932—1934 гг. в Рижском заливе, центральной части моря (Готландская впадина) и в районах восточного побережья Балтики. Установленные авторами соотношения $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ и $Na^+ + K^+ > Mg^{2+} + Ca^{2+}$ свидетельствуют о большой близости ионного состава балтийских вод и океанических. Однако в водах Балтийского моря процентное содержание ионов хлора и натрия ниже за счет увеличения процентного содержания ионов гидрокарбонатов и кальция. Наиболее отчетливо это различие выражено в поверхностных водах и водах заливов, где сильнее сказывается влияние речного стока (табл. 11.1). С глубиной значения хлорного коэффициента для кальция уменьшаются, приближаясь к океаническому. В работе Квецинского [333] также показано, что с глубиной содержание Са уменьшается, а в поверхностном слое — увеличивается по мере удаления от Датских проливов в направлении с юго-запада на север, что обусловлено влиянием материкового стока.

Более поздние исследования солевого состава вод Балтийского моря [1, 28—30 и др.] были направлены как на изучение взаимодействия речных, распресненных и океанических вод, так и на уточнение электролитического состава балтийских вод в связи с применением кондуктометрического метода определения солености.

Результаты подробных исследований солевого состава балтийских вод на стандартной сети станций в 1966—1968 гг. представлены в работах Кремлинга [326, 327] (табл. 11.2).

Хлорный коэффициент для натрия, рассчитанный по данным 40 проб воды, взятых в различных районах моря и в разных слоях, составляет $0{,}5547 \pm 0{,}0021$. Таким образом, воды Балтики даже с такой низкой хлорностью, как 1,213‰ (Ботниче-

Таблица 11.1

Хлорные коэффициенты для основных ионов вод Балтийского моря (1932—1934 гг.) [19]

Ион	Мировой океан	Готландская впадина		Рижский залив
		поверхность	220 м	поверхность
SO_4^{2-}	0,1394	0,141	0,1410	0,1420
Na^+	0,5556	0,5529	0,5529	0,5543
K^+	0,0200	0,0200	0,0200	0,0200
Ca^{2+}	0,0211	0,0265	0,0242	0,0294
Mg^{2+}	0,0669	0,0695	0,0695	0,0702

Примечание. Хлорные коэффициенты определяются как отношение концентраций основных ионов к хлорности.

ский залив) и 0,434‰ (Невская губа), по значениям отношения Na^+/Cl^- отличаются от океанических очень несущественно.

Хлорный коэффициент для кальция, рассчитанный Кремлингом, превышает соответствующее значение для океанических вод. Отношение Ca^{2+}/Cl в поверхностных водах Балтики уменьшается по мере ослабления влияния речного стока, т. е. в направлении с северо-востока на юго-запад. В то же время абсолютное содержание ионов кальция возрастает в обратном направлении (концентрация Ca изменяется от 38,0 мг/л в Ботническом заливе до 112,2 мг/л в Центральной Балтике).

Для отношения K^+/Cl^- Кремлинг [326, 327] определил диапазон изменений 0,019—0,0213. Хлорные коэффициенты для калия в Балтийском море мало чем отличаются от океанических, однако в глубинных водах прол. Фемари-Бельт и в поверхностных водах Борнхольмской впадины отмечается дефицит ионов калия.

Таблица 11.2

Хлорные коэффициенты и формулы их расчета для Балтийского моря за период 1966—1968 гг. [326]

Ион	Балтийское море	Мировой океан	Избыток (+) или дефицит (—)
Na^+	0,5547	0,5555	0
K^+	0,0203—0,0209	0,0206	0 (но есть локальные аномалии)
Ca^{2+}	<4,5 ‰Cl: =0,0201Cl+0,0234 (1967) =0,0216Cl+0,0174 (1968) >4,5 ‰Cl: =0,0200Cl+0,0247 (1967) =0,0204Cl+0,0218 (1968) ≈4,5 ‰Cl: 0,0252—0,0256	0,02166	+
Mg^{2+}	0,0671—0,0672	0,0669	+
SO_4^{2-}	<4,5 ‰Cl: 0,1405—0,1410 >4,5 ‰Cl: 0,1400—0,1403	0,1400	0
Br^-	=0,00328Cl+0,0005 (1967) =0,00348Cl+0,0004 (1968)	0,00347	—
B^-	=0,220Cl+0,15 ≈0,264	0,230	+
F^-	$(7,12—8,45)10^{-5}$	$6,70 \cdot 10^{-5}$	+
Alkal	0,303—0,342	0,123	+

Из анализа отношения Mg^{2+}/Cl^-, полученного Грассхофом [260] по результатам [326, 327], в Балтийском море отмечается избыток ионов магния по сравнению с океаническими водами (см. табл. 11.2).

В значениях хлорного коэффициента для сульфатов Кремлингом [326] отмечались лишь локальные аномалии. Так, в Борнхольмском и Западном Готландском бассейнах отмечена отрицательная аномалия в значениях отношения SO_4^{2-}/Cl^-, что связано с образованием сероводородных зон в глубинных слоях. В более ранних работах [19] для поверхностных вод Ботнического залива и Восточного Готландского бассейна приводится отношение SO_4^{2-}/Cl^-, равное 0,1412—0,1419, а для глубинных — 0,1404. Отношение SO_4^{2-}/Cl^-, полученное Трзосинской [489] по данным 26 проб воды, взятых в Борнхольмской и Арконской впадинах и Гданьском заливе, составляет 0,1436. В большинстве случаев избыток ионов сульфатов в поверхностных водах Балтийского моря связан с определенным влиянием речных вод, для которых хлорный коэффициент составляет 0,3—0,6 [19].

Содержание ионов фтора в водах Балтийского моря подвержено значительно бо́льшим пространственным изменениям и почти повсеместно превышает океаническое (см. табл. 11.2), что является следствием его высокого содержания в речных и талых водах. Очевидно, что колебания речного стока в течение года вызывают сезонную изменчивость содержания ионов фтора в море, но отсутствие необходимых наблюдений на реках и других источниках пресной воды еще не дает возможности в полной мере количественно оценить это влияние [326].

Бор в водах Балтийского моря практически не исследован. Средний хлорный коэффициент для бора в водах Ботнического залива и Центральной Балтики, по данным Гриппенберг [29], составляет 0,264, что несколько выше, чем в океанических водах (см. табл. 11.2).

Однозначной функциональной зависимости содержания ионов брома в морской воде от хлорности Кремлингом [326] не было получено, однако считается, что безусловно существует дефицит ионов брома в балтийских водах относительно океанических вод (см. табл. 11.2). При средней хлорности, равной 5‰, недостаток ионов брома оценивается в 0,4—0,6 $млн^{-1}$, что объясняется их низким содержанием в пресном мало минерализованном стоке рек побережья Ботнического и Финского заливов. В более минерализованных водах рек южного побережья и соответственно в водах Южной Балтики хлорный коэффициент для брома несколько выше, например для Вислы он составляет 0,00336.

Наиболее существенны различия между щелочностью балтийских и океанических вод, определяемой главным образом содержанием гидрокарбонатных и карбонатных ионов (см. табл. 11.2). Для Балтики значение отношения щелочности к хлорности выше в 2 раза и более, чем для океана, что характерно для морей, подверженных сильному влиянию материкового стока. Подробнее щелочные коэффициенты рассмотрены в гл. 13.

Сопоставляя данные по содержанию основных ионов в балтийских водах, полученные Заринсом, Озолинсом [19] и Кремлингом [325—327], можно предположить, что изменения в ионном составе связаны с многолетними тенденциями океанизации и распреснения вод Балтики.

Таблица 11.3

Солевой состав вод (мг/л) некоторых крупных рек бассейна Балтийского моря

Река	Сток, км³/год	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$K^+ + Na^+$	HCO_3^-	SO_4^-	Cl^-	Сумма ионов	Сток солей, тыс. т в год
				1946—1953 гг. (отдельные годы)					
Нева	79,9	7,81	2,52	2,79	13,89	5,04	4,56	36,61	2 925,14
Нарва	13,4	30,52	7,30	4,61	60,07	7,91	4,69	115,10	1 542,34
Западная Двина	19,76	34,06	8,45	1,86	68,32	6,02	2,28	120,99	2 390,76
Неман	8,78	45,56	10,02	5,62	87,47	9,18	7,70	165,55	1 453,53
Общий сток	121,84	117,95	28,29	14,88	229,75	28,15	19,23	—	58 311,77
				1955—1970 гг.					
Нева	80,3	9,13	1,89	3,86	27,65	7,60	5,14	55,27	4 438,18
Нарва	13,0	32,54	7,25	4,68	123,85	11,92	4,44	184,68	2 400,84
Западная Двина	19,9	33,22	7,74	5,28	123,12	11,21	7,39	187,96	3 740,40
Неман	17,0	48,00	10,94	6,76	183,53	19,88	7,41	276,52	4 700,84
Общий сток	130,2	122,89	27,82	20,58	458,15	50,61	24,38	—	15 260,26
				1971—1980 гг.					
Нева	66,9	9,10	1,56	5,69	27,77	8,44	6,09	58,65	3 923 68
Нарва	8,8	40,45	9,73	7,08	159,46	15,68	8,54	240,94	2 120,27
Западная Двина	13,6	44,53	11,41	8,59	164,71	19,65	11,53	260,42	3 541,71
Неман	15,2	58,69	13,48	7,21	199,88	40,35	15,23	334,84	5 089,57
Общий сток	104,5	152,77	36,18	28,57	551,82	84,12	41,39	—	14 675,23

11.2. Солевой баланс

Солевой состав вод Балтийского моря формируется в результате смешения соленых вод, поступающих из Северного моря через Датские проливы, и вод рек, различающихся своей минерализацией в соответствии с подстилающими породами на их водосборе.

В целом по химическому составу воды рек, впадающих в Балтийское море, относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы [33]. Два главных иона HCO_3^- и Ca^{2+} составляют 80 % всего солевого стока, а для рек скандинавского побережья — 50—60 % при одновременном относительно высоком содержании ионов натрия и калия. Наиболее крупными реками, впадающими в Балтийское море на территории России и прибалтийских государств, являются Нева, Нарва, Западная Двина (Даугава), Неман. Они имеют различные количественные показатели стока и минерализации (табл. 11.3), что объясняется не только географическим положением рек, но и геологией их бассейнов. В последние 20—30 лет в результате антропогенной деятельности количество речного стока и его минерализация претерпели довольно существенные изменения. Если сравнить солевой сток крупных рек в Балтийское море (см. табл. 11.3), то можно заметить, что к 1971—1980 гг. минерализация почти всех отмеченных выше рек возросла по сравнению с периодом 1946—1953 гг. при общем уменьшении водного стока в среднем на 20 %. В результате солевой сток возрос более чем в 2 раза [33].

Балтийское море характеризуется рассредоточенной нагрузкой подземных вод, осуществляемой главным образом в результате фильтрации через слабопроницаемые донные отложения. Общий сток пресных и слабосолоноватых подземных вод в Балтийское море составляет 10,3 км³ в год, а солевой сток — 4,12 млн т в год [32] (табл. 11.4).

Таблица 11.4

Водный и солевой баланс Балтийского моря в 1971—1980 гг.

Источник	Сток, км³/год	Солевой сток	
		млн т	%
	Приходная часть		
Материковый сток			
Ботнический залив	181,5	6,15	0,76
Нева	66,9	3,92	0,49
Нарва	8,8	2,12	0,26
Даугава	13,6	3,54	0,44
Неман	15,2	5,18	0,64
Висла	29,3	—	—
Одер	15,2	12,57	1,56
Скандинавские реки	18,0	—	—
Малые реки	49,4	2,70	0,34
Всего	397,9	36,18	4,50
Осадки			
Ботнический залив	55,0	0,39	0,05
Финский залив	17,45	0,15	0,02
Рижский залив	9,05	0,10	0,01
Открытое море	114,10	1,27	0,16
Всего	196,0	1,91	0,24
Подземный сток	10,3	4,12	0,51
Приток из Северного моря	433,0	761,90	94,75
Итого	1037,2	804,11	100,0
	Расходная часть		
Испарение			
Ботнический залив	43,60	—	—
Финский залив	19,75	—	—
Рижский залив	9,45	—	—
Открытое море	137,55	—	—
Всего	246,00	—	—
Северное море	866,0	756,88	96,32
Осаждение	—	28,94	3,68
Итого	1112,0	785,82	100,00
Баланс	—74,8	18,29	—

Таблица 11.5

Современный солевой состав вод Балтийского моря при различных диапазонах изменения хлорности (‰)

Характеристика	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Mg^{2+}	Ca^{2+}	$Na^+ + K$	Σ ‰	S ‰
				2,63—6,22 ‰				
Концентрация, ‰ по объему	4,095	0,579	0,099	0,285	0,107	2,36	7,525	7,439
Процентное содержание	44,7	4,67	0,63	9,09	2,07	38,84	100	—
Ион/Cl	—	0,1410	0,0242	0,0696	0,0261	0,5763	1,8376	1,817
				4,06—9,00 ‰				
Концентрация, ‰ по объему	5,386	0,746	0,096	0,360	0,136	3,125	9,849	9,766
Процентное содержание	44,93	4,60	0,46	9,78	2,01	39,21	100	—
Ион/Cl	—	0,1385	0,0178	0,0668	0,0252	0,5802	1,8286	1,813
				1,17—12,11 ‰				
Концентрация, ‰ по объему	5,454	0,769	0,106	0,366	0,133	3,17	9,998	9,906
Процентное содержание	44,82	4,67	0,51	8,79	1,94	32,27	100	—
Ион/Cl	—	0,1410	0,0194	0,0671	0,0244	0,5812	1,8331	1,816
				2,71—4,14 ‰				
Концентрация *, ‰ по объему	3,184	0,463	0,112	0,213	0,099	1,83	5,901	5,804
Процентное содержание	44,33	4,76	0,91	8,66	2,44	38,89	100	—
Ион/Cl	—	0,1454	0,0352	0,0660	0,0311	0,5747	1,8533	1,823
				2,00—5,38 ‰				
Концентрация **, ‰ по объему	3,654	0,519	0,108	0,262	0,110	2,09	6,743	6,649
Процентное содержание	44,55	4,68	0,77	9,33	2,38	38,29	100	—
Ион/Cl	—	0,1420	0,0296	0,0717	0,0301	0,5720	1,8454	1,820
				0,03—5,38 ‰				
Концентрация **, ‰ по объему	2,89	0,415	0,108	0,210	0,098	1,650	5,390	5,296
Процентное содержание	44,17	4,69	1,14	9,38	2,65	37,97	100	—
Ион/Cl	—	0,144	0,0370	0,0727	0,0339	0,5710	1,8650	1,832
				12,11 ‰				
Концентрация **, ‰ по объему	12,108	1,6639	0,131	0,8087	0,2671	6,9485	21,9272	21,8132
Процентное содержание	45,13	4,59	0,28	8,81	1,76	39,42	100	—
Ион/Cl	—	0,1374	0,0108	0,0668	0,02206	0,5739	1,8110	1,802
				0,03 ‰				
Концентрация **, ‰ по объему	0,03	0,028	0,196	0,015	0,060	0,02	0,349	0,179
Процентное содержание	9,06	6,26	34,66	13,29	32,29	4,43	100	—
Ион/Cl	—	0,9333	6,5333	0,500	2,00	0,6667	11,6333	5,9667
				р. Нева				
Концентрация, ‰ по объему	0,0061	0,0084	0,0278	0,0016	0,0091	0,0064	0,594	—
Процентное содержание	10,71	10,96	28,33	9,71	28,27	13,76	100	—
Ион/Cl	—	1,3770	4,5574	0,2622	1,4918	1,0492	97,377	—
				Мировой океан				
Концентрация, ‰ по объему	19,385	2,712	0,166	1,299	0,412	11,159	35,135	35,01
Процентное содержание	45,29	4,69	0,22	8,87	1,71	39,22	100	—
Ион/Cl	—	0,1399	0,0086	0,0670	0,0212	0,5756	1,8124	1,8060

Примечания. 1. Данные в % соответствуют процентному отношению эквивалентов (% — экв).
2. «*» — данные Латвийского УГМС; «**» — данные ГОИНа.

Средняя годовая сумма атмосферных осадков для моря в целом составляет 196 км³ [34]. Приход солей с осадками составляет 1,91 млн т в год (см. табл. 11.4), причем в последние годы отмечается повышение минерализации атмосферных осадков [184].

Большую роль в формировании солевого состава водных масс Балтики играет водообмен с Северным морем через Датские проливы. Объем вод, поступающих из Северного моря с соленостью 17,4 ‰, равен 433 км³ в год, что составляет более 60 % статьи прихода в водном балансе моря, а объем балтийских вод с соленостью 8,7 ‰, вытекающих из Балтийского моря, равен 866 км³ в год. Солеобмен же через проливы практически равноценен (см. табл. 11.4).

В целом для всего Балтийского моря разность суммы солей в приходной и расходной частях солевого баланса равна 18,29 млн т в год, что составляет всего 2,3 % прихода солей в море. Поэтому можно считать, что современный солевой баланс Балтийского моря довольно стабилен.

11.3. Современный солевой состав

Для характеристики современного солевого состава вод Балтийского моря использованы результаты исследований всех авторов, занимавшихся этим вопросом [19, 33, 326, 327, 333]. Кроме того, в 1982—1986 гг. в ГОИНе выполнены анализы проб воды на концентрации ионов солевого состава по всему Балтийскому морю, включая и распресненные районы заливов. Осредненные значения концентраций солеобразующих ионов представлены в табл. 11.5. Взаимосвязи между концентрациями хлора и большинством ионов линейны (рис. 11.1).

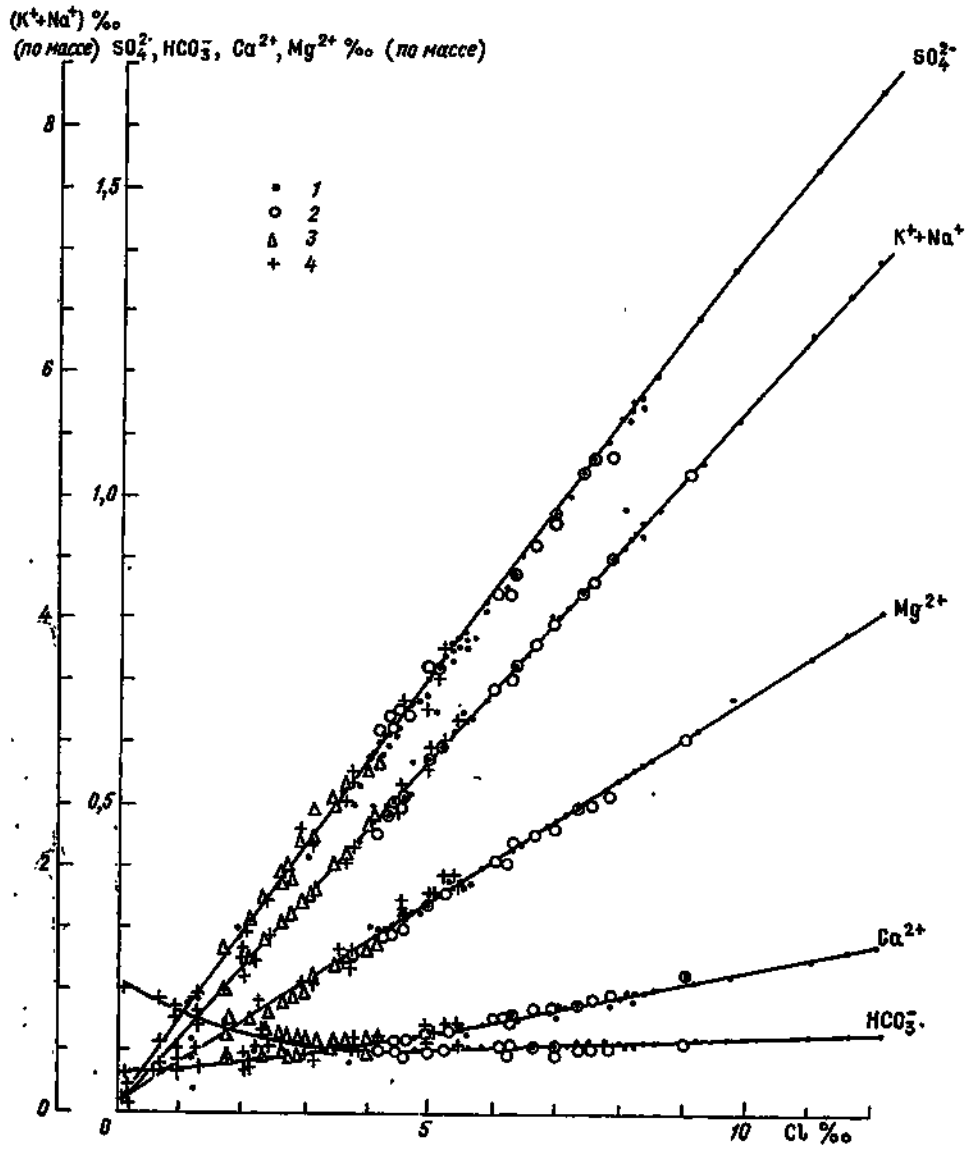


Рис. 11.1. Взаимосвязь хлорности с концентрацией основных ионов солевого состава вод Балтийского моря.

По данным: *1* — Кремлинга [326]; *2* — Трэсинской [489]; *3* — Латвийского УГМС; *4* — ГОИНа.

Исключение составляют соотношения хлорности с гидрокарбонатами и ионами кальция, претерпевающие наибольшие изменения при смешении карбонаткальциевого материкового стока с хлоридонатриевыми морскими водами, при котором в процессе метаморфизации вод в осадок в первую очередь выпадает карбонат кальция.

Сравнительный анализ данных, приведенных в табл. 11.5, свидетельствует, что имеющиеся результаты исследований солевого состава вод Балтийского моря достаточно различаются не только по абсолютным значениям концентраций главных солеобразующих ионов, но и по относительному их содержанию. И это вполне естественно, так как результаты исследований охватывают различные диапазоны изменений солености вод Балтийского моря, от пресных до океанических. Изменения в отношении ион/Cl^- носят закономерный характер: с увеличением степени распреснения увеличиваются значения хлорных коэффициентов для тех ионов, относительное содержание которых в пресной воде выше, чем в морской (Ca/Cl, HCO_3/Cl), и уменьшаются для ионов с более низкой концентрацией в пресной воде, чем в морской.

12. КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ

Снабжение кислородом двух главных водных масс Балтийского моря осуществляется различными источниками. Абсорбция из атмосферы (преимущественно в холодные месяцы) и фотосинтез в течение вегетационного периода восполняют расход кислорода на биохимическое окисление органического вещества лишь в верхнем слое. В соответствии с общими закономерностями динамики кислородных условий в этом слое доминирует внутригодовая изменчивость. Факторы, определяющие специфику годового хода показателей, в том числе и кислородных, в толще вод над галоклином Балтийского моря, рассмотрены в пп. 10.2.1—10.2.4.

В глубинном слое из-за затрудненности вертикального переноса кислорода из верхнего слоя главным источником аэрации является адвекция

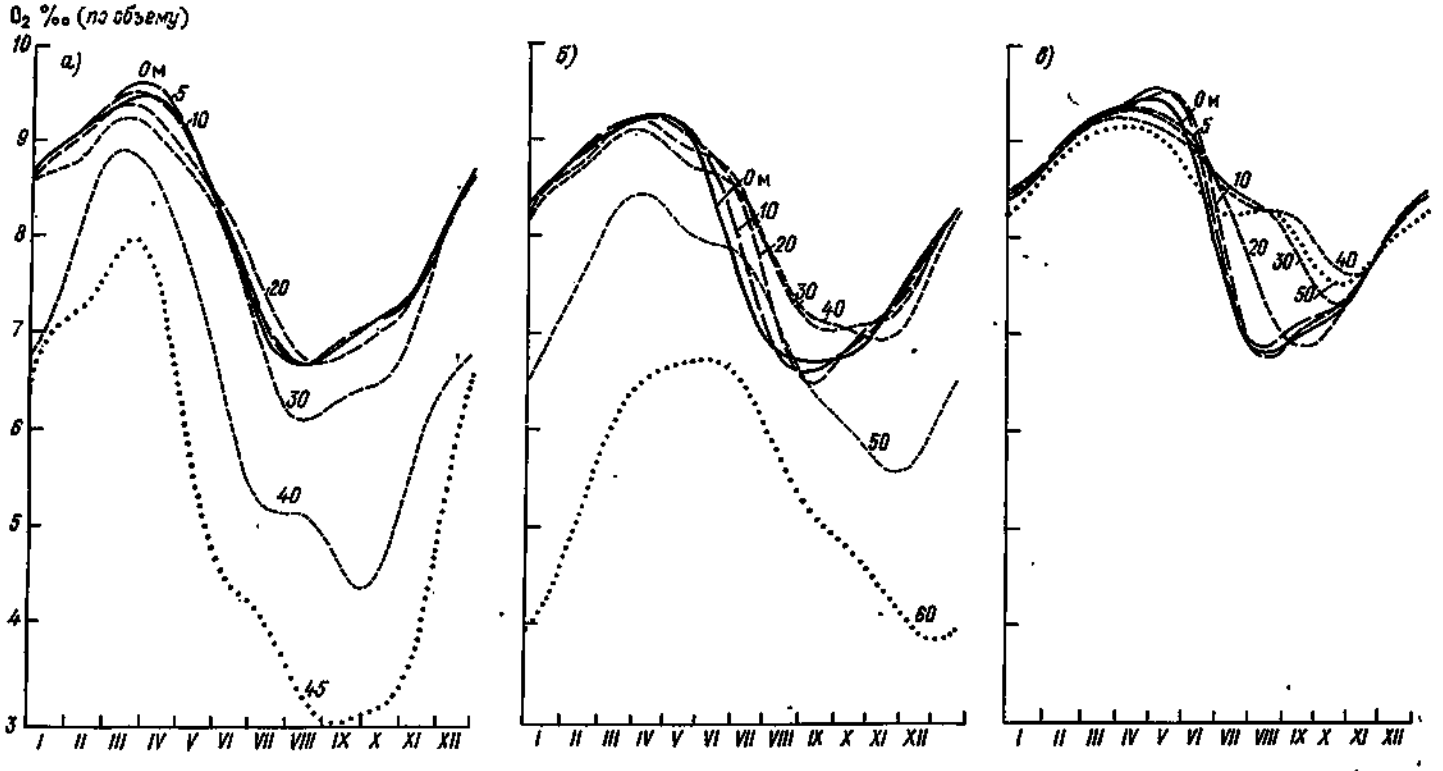


Рис. 12.1. Годовой ход концентраций кислорода на стандартных горизонтах Арконской (*а*), Борнхольмской (*б*) и Готландской (*в*) впадин [129].

каттегатских вод, поступающих через Датские проливы. Этот источник функционирует постоянно, но неравномерно во времени. Мощность поступлений и степень аэрации ими различных зон глубинного слоя также неравномерны. Причины и особенности обновлений глубинного слоя за счет продвижения в море этих притоков рассмотрены в пп. 10.3.1 и 10.3.3.

При полном исчезновении кислорода у дна и смене окислительно-восстановительных условий весь комплекс физико-химических, биохимических и химических процессов в придонном слое резко меняется и оказывает влияние на состояние гидрохимических условий во всей толще вод ниже галоклина (см. п. 10.3.2).

Наблюдения за кислородом, начатые еще в первом десятилетии текущего столетия, и ранние их обобщения обеспечили большой массив данных (см. гл. 9) и послужили основой богатой истории исследований кислородного режима (см. гл. 8), в отличие от остальных гидрохимических показателей. Режим кислорода считался достаточно хорошо изученным уже в начале 60-х годов [19], когда были описаны его главные особенности, выявлены зависимость кислородных условий в глубинном слое от вторжений североморских вод через Датские проливы и роль крупномасштабных процессов атмосферной циркуляции в их изменениях. Дальнейшие исследования, перечень которых содержится в гл. 8, значительно расширили и обогатили эти представления. Исходя из них, был проведен статистический анализ справочного массива данных (см. пп. 10.2—10.4) и на этой общей основе составлено приведенное ниже описание режима.

12.1. Кислородный режим верхнего слоя

Содержание растворенного кислорода в верхнем слое моря определяется интенсивностью одновременно протекающих процессов поступления кислорода в водную среду и уменьшения его содержания. К первым относятся абсорбция кислорода из атмосферы при относительном содержании его в воде менее 100 % (инвазия) и продуцирование при фотосинтезе в результате расщепления молекул воды, ко вторым — биохимическая деструкция органических веществ автохтонного и аллохтонного происхождения, дыхание гидробионтов, выделение в атмосферу с поверхности при относительном содержании кислорода более 100 % [1].

12.1.1. Внутригодовая изменчивость

Годовой ход содержания кислорода в Балтийском море достаточно хорошо изучен и представлен Маттеусом в виде кривых, рассчитанных с помощью метода Фурье на базе наблюдений 1902—1973 гг. (рис. 12.1).

В настоящем исследовании годовой ход содержания кислорода представлен в виде ансамбля квартилей распределения (для временных интервалов преимущественно в две декады), полученных на основе статистического анализа справочного массива данных 1958—1985 гг. (см. п. 9.2.3).

Пространственные различия годового хода концентраций кислорода на поверхности моря показаны на рис. 12.2 и 12.3, изменения годового хода с глубиной — на рис. 12.4 и 12.5, а годовой ход вертикального распределения статистических оценок — на рис. 12.6—12.11.

В зимний период содержание кислорода в верхнем слое регулируется обменом с атмосферой. Верхний квазиоднородный слой недонасыщен кислородом, а поэтому основным фактором, определяющим его содержание, является абсорбция из атмосферы, зависящая от температуры воды и интенсивности ветро-волнового перемешивания. Вертикальное распределение кислорода характери-

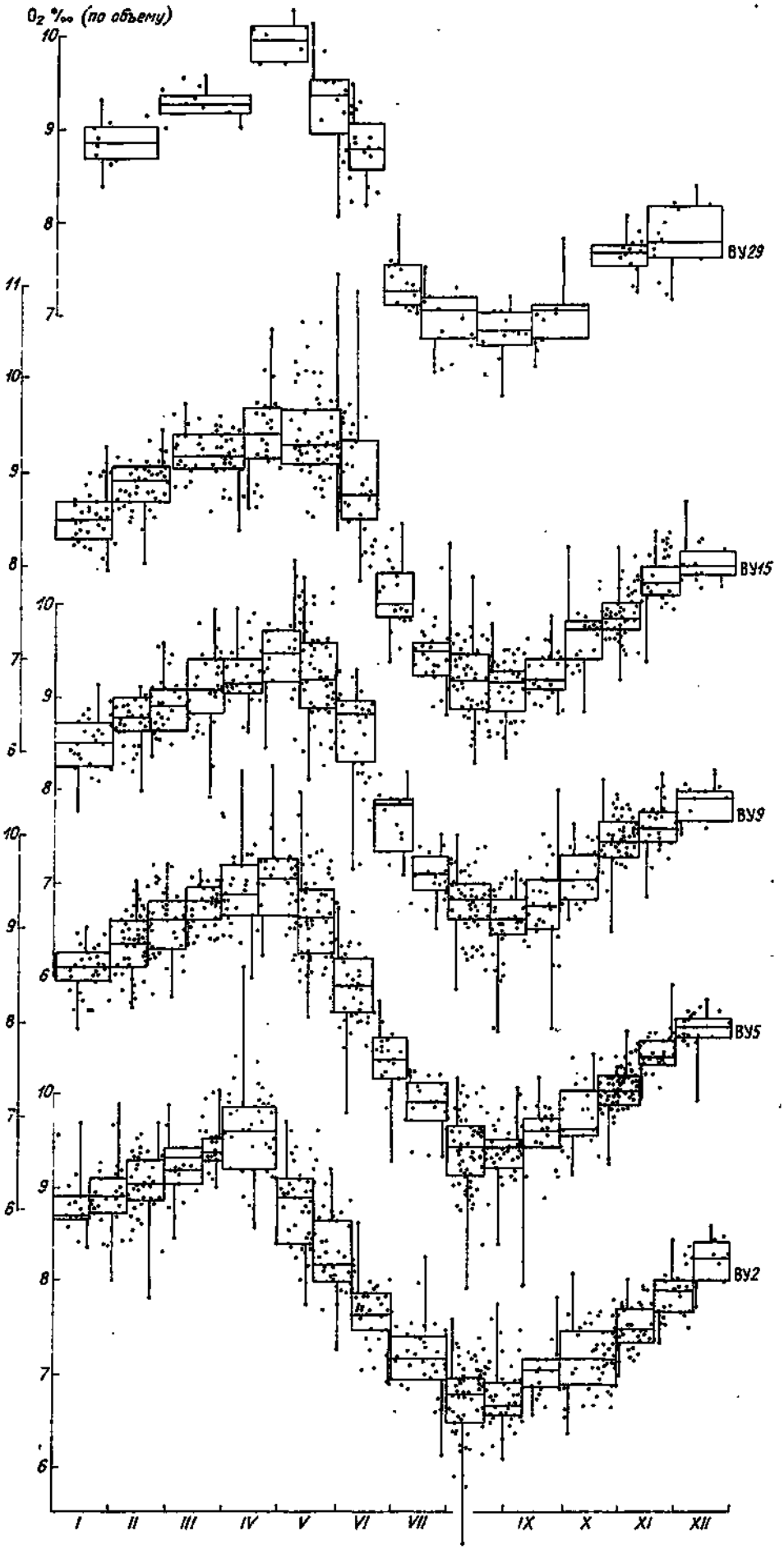


Рис. 12.2. Годовой ход концентраций кислорода на поверхности моря по данным квартильного анализа для базовых станций.

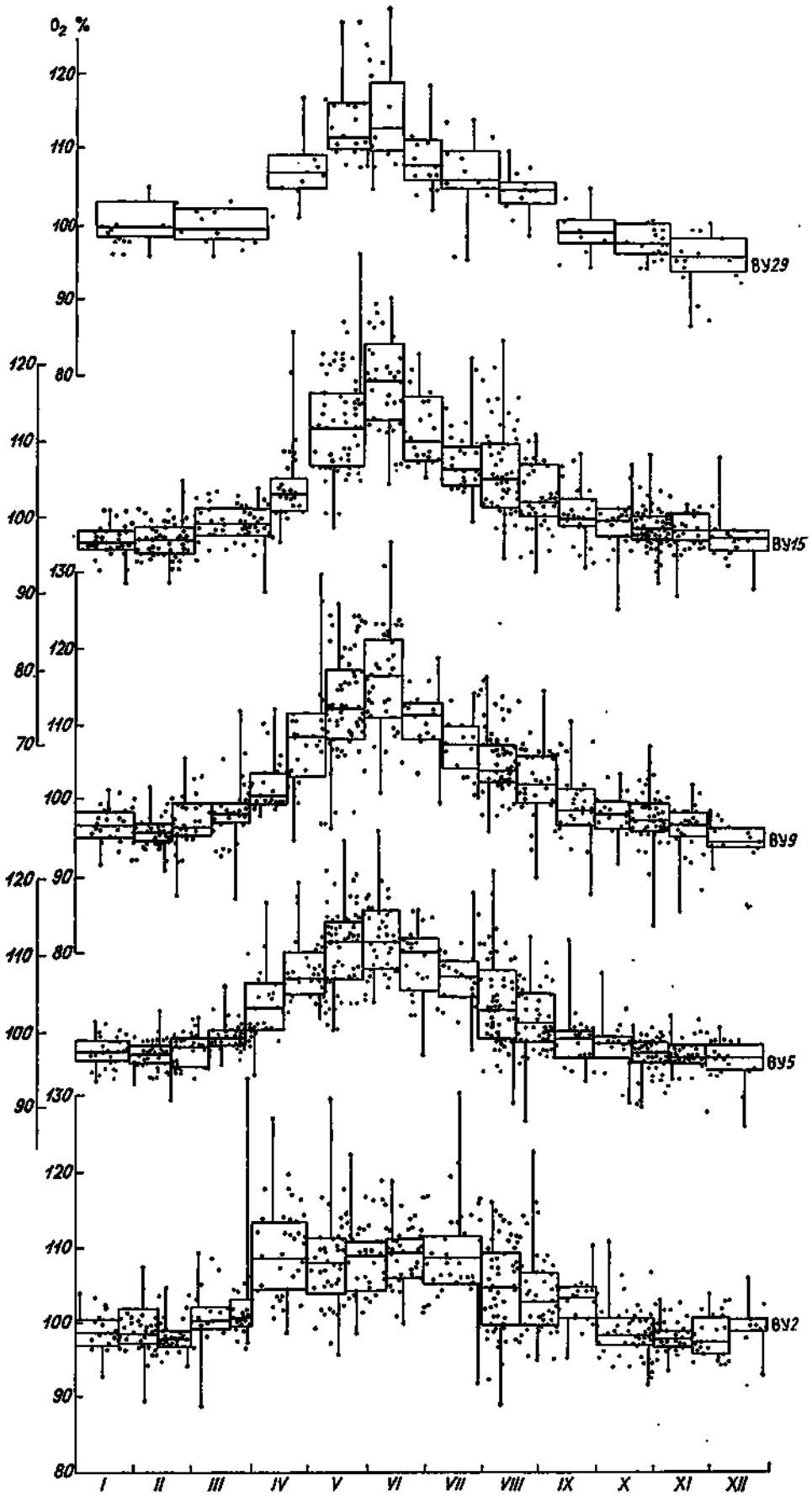


Рис. 12.3. Годовой ход насыщения кислородом поверхностных вод по данным квартильного анализа для базовых станций.

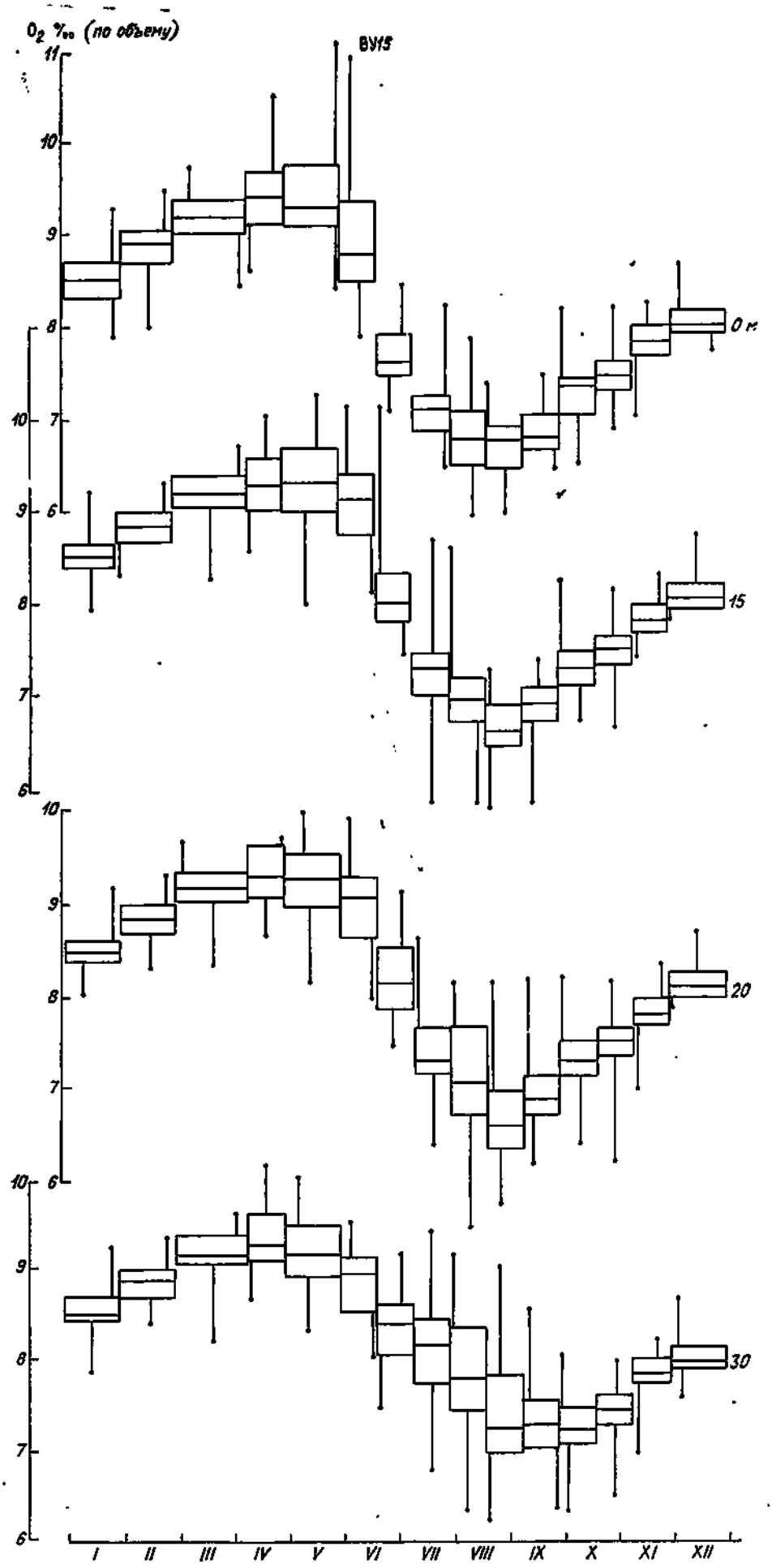


Рис. 12.4. Годовой ход концентраций кислорода на стандартных горизонтах Готландской (ст. BY 15) и Арконской (ст. BY 2) впадин по данным квартильного анализа.

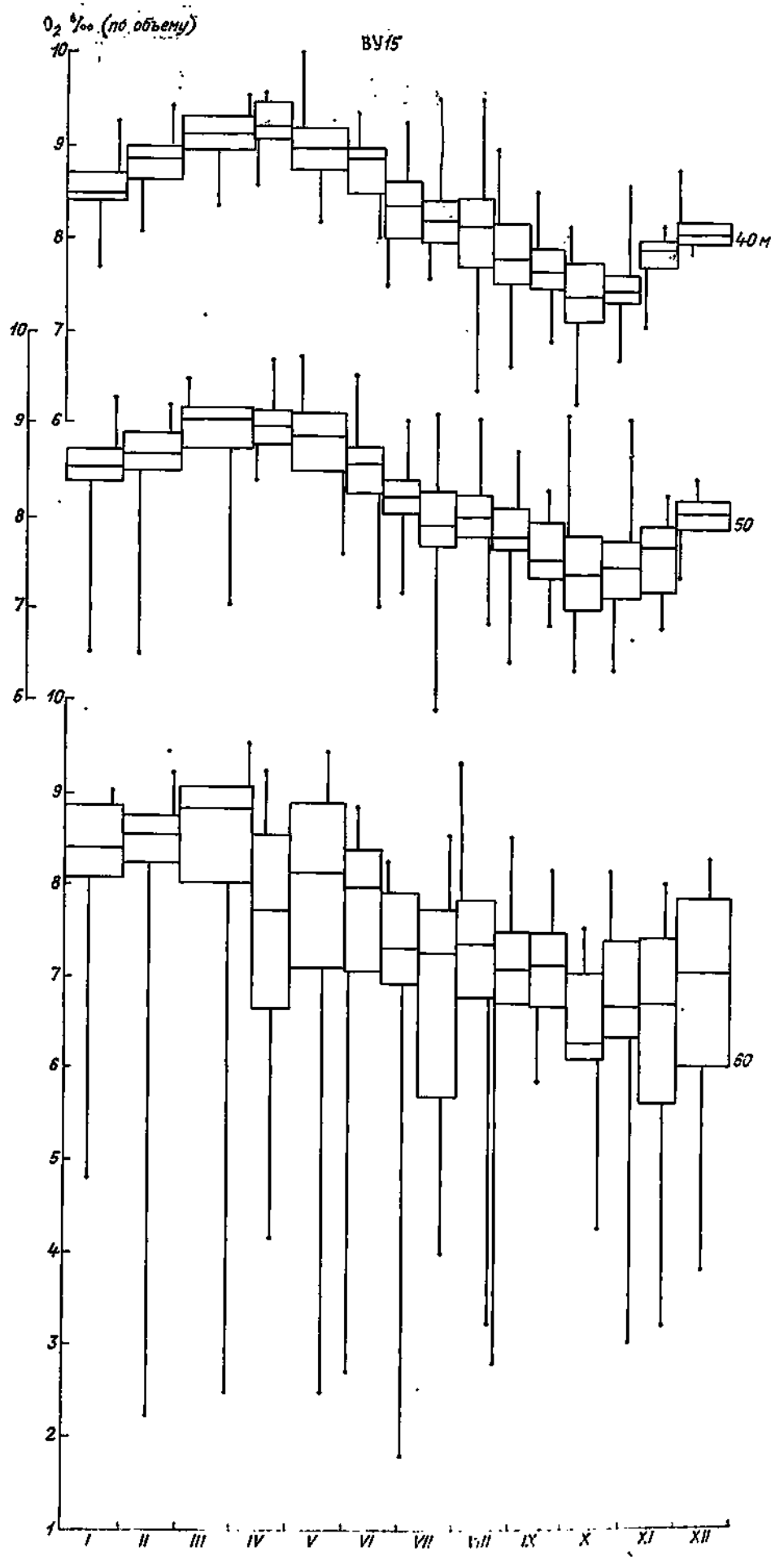


Рис. 12.4.

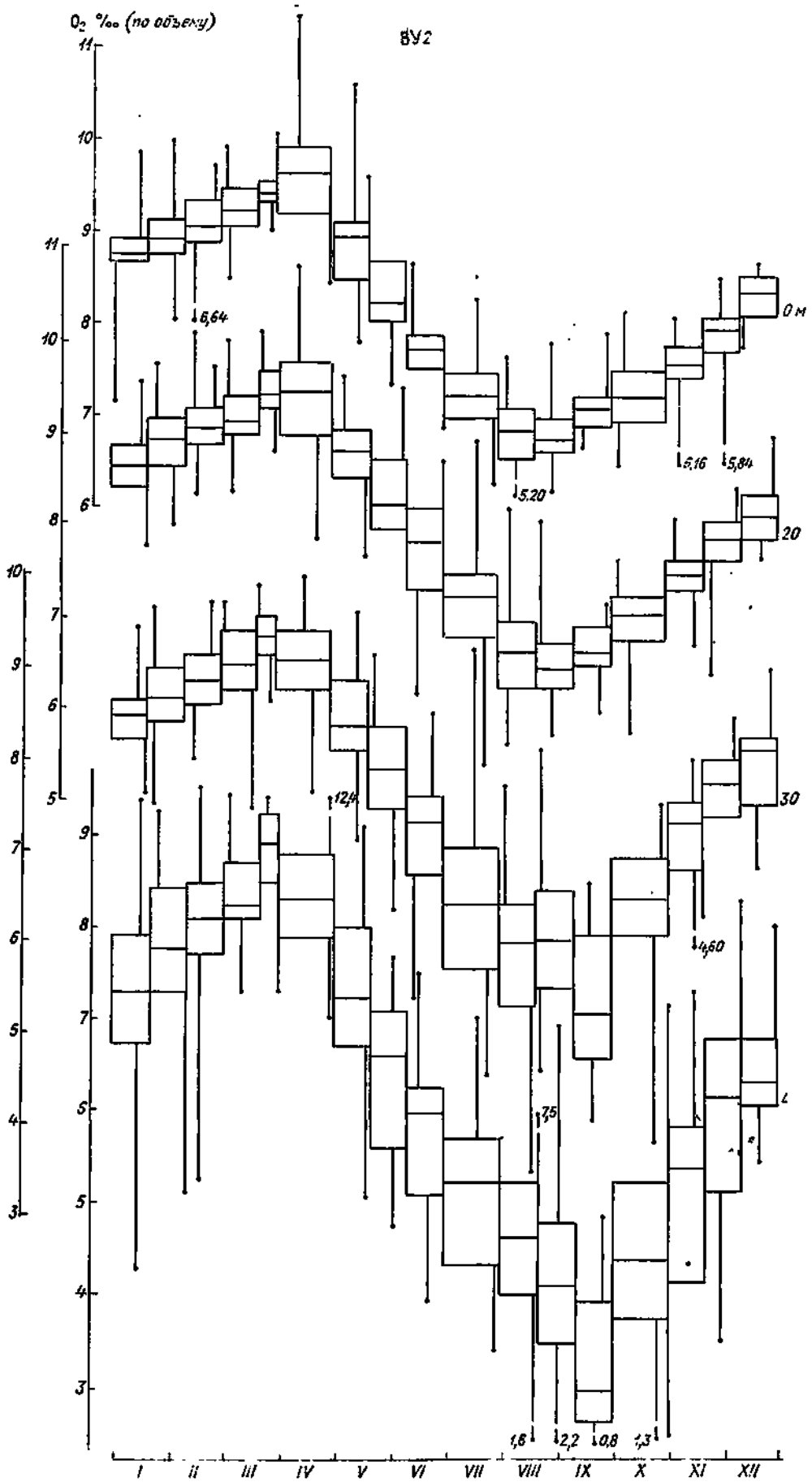

O₂ ‰ (по объему)
8У2
0 м
20
30
6,64
5,16
5,84
5,20
12,4
4,60
7,5
1,6
2,2
0,8
1,3
I
II
III
IV
V
VI
VII
VIII
IX
X
XI
XII

Рис. 12.4.

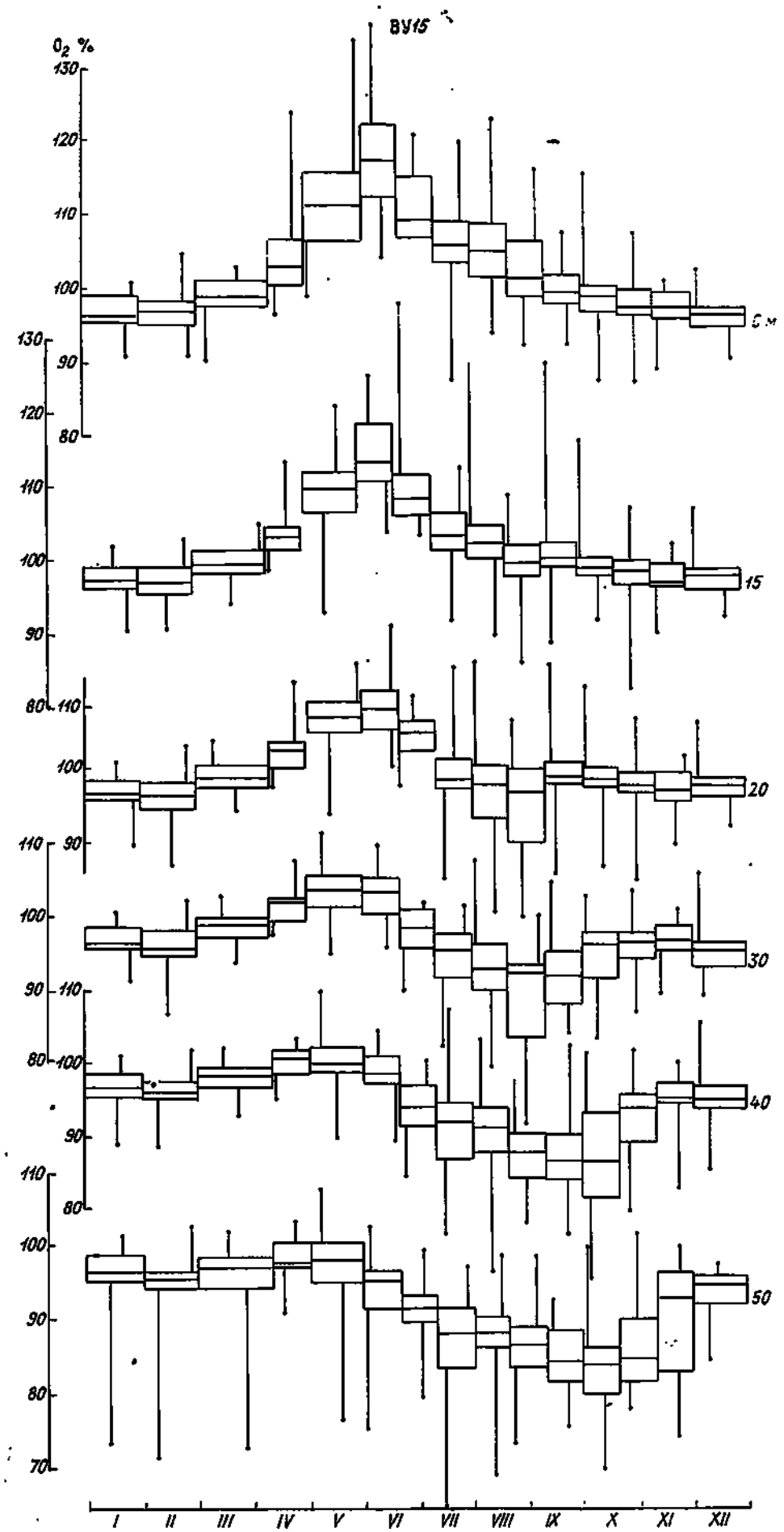


Рис. 12.5. Годовой ход насыщения кислородом на стандартных горизонтах Готландской (ст. BY 15) и Арконской (ст. BY 2) впадин по данным квартильного анализа.

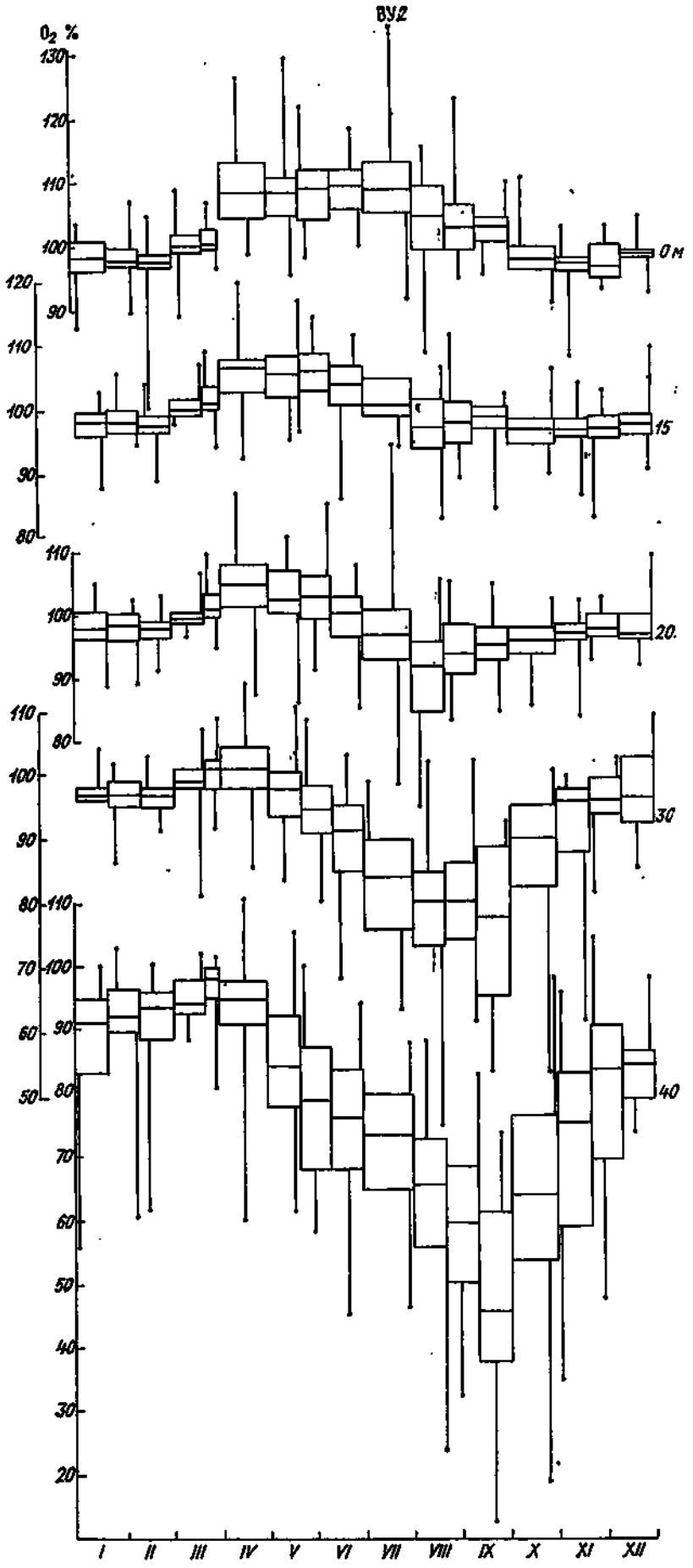


Рис. 12.5.

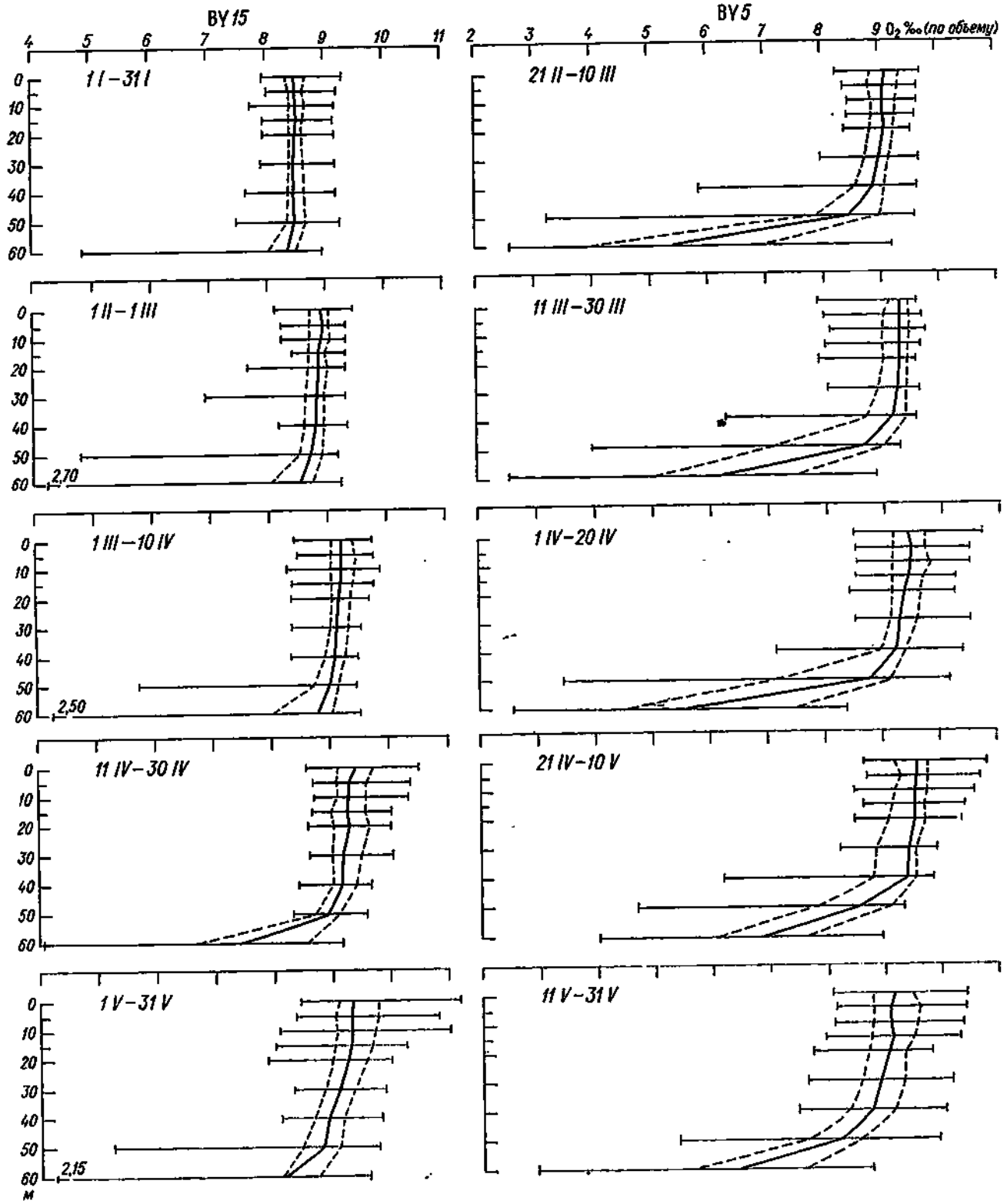


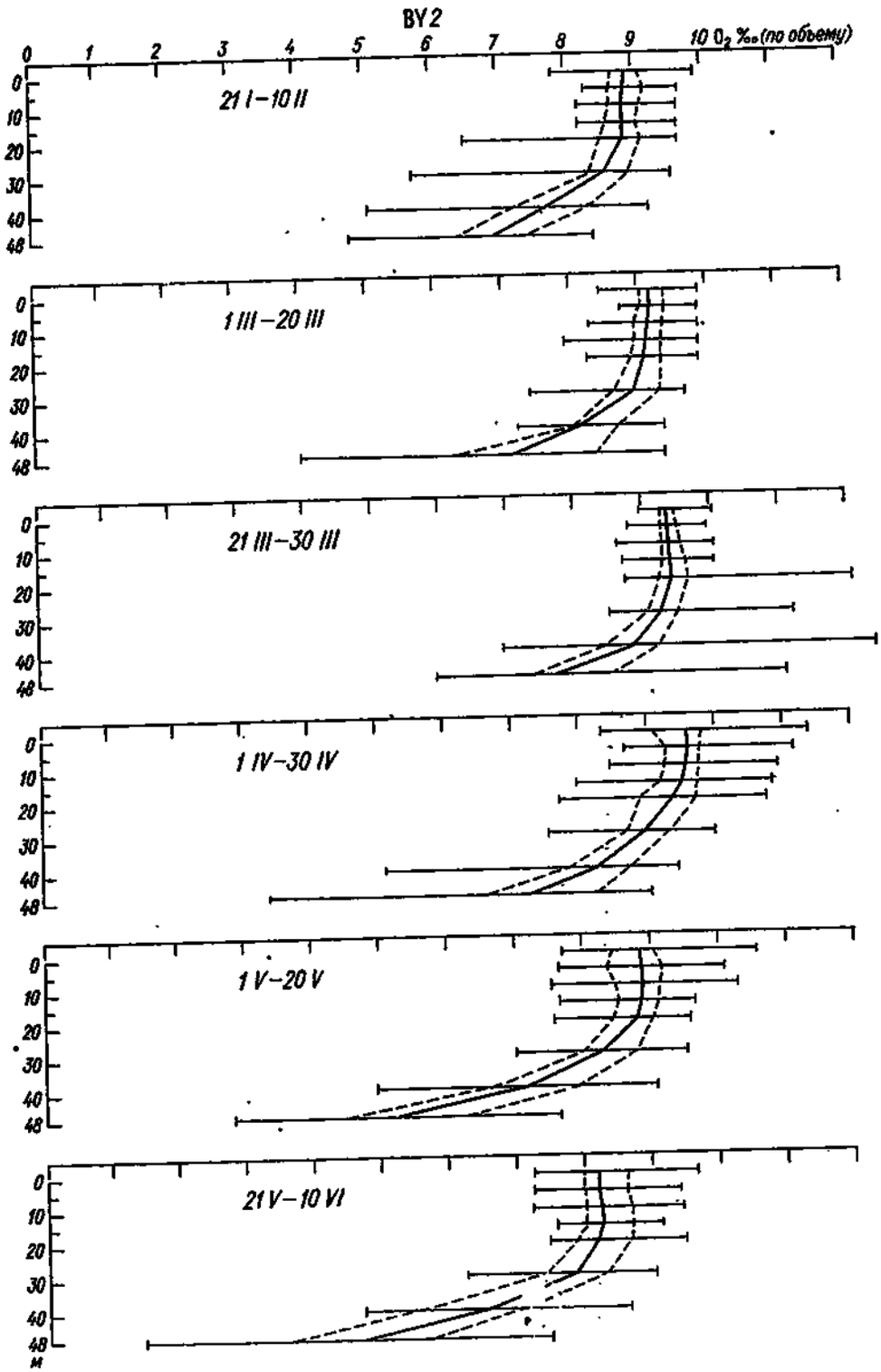
Рис. 12.6. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций кислорода в зимний и весенний периоды

зуется однородностью, обусловленной осенне-зимним конвективным перемешиванием (см. рис. 12.6 и 12.9).

Увеличение концентраций и насыщения кислородом, связанное с активизацией фотосинтетической деятельности, характерно для ранней весны. Более того, по увеличению процентного содержания кислорода эта фаза, общая для гидрохимических условий верхнего слоя, была выделена статистически (см. п. 10.2.4).

В период весенней вспышки цветения фитопланктона содержание кислорода достигает внутригодового максимума и значительного перенасыщения, быстро распространяющихся вглубь.

В летний период по мере уменьшения фотосинтетической активности, связанного с истощением фондов биогенных элементов, а также вследствие увеличения температуры воды и возрастания относительной роли биохимической деструкции, концентрации кислорода уменьшаются и зависят от



в верхнем слое Готландской (ст. BY 16), Борнхольмской (ст. BY 5) и Арконской (ст. BY 2) впадин.

распределения температуры и солености воды. Однако пересыщение кислородом в начале лета возрастает и достигает максимума в слое 0—30 м в течение первых двух декад июня вследствие сильного и быстрого прогрева воды и развития термической стратификации, затрудняющей аэрацию подстилающих водных масс кислородом, продуцируемым при фотосинтезе. Ниже глубины 30 м содержание кислорода в этот период уменьшается и становится ниже 100 %.

Доминирующая роль продуцирования кислорода по сравнению с его затратами при биохимическом окислении органических веществ сохраняется в фотическом слое, толщина которого уменьшается, до 2-й декады сентября (в Арконском бассейне до конца сентября) и обеспечивает насыщение кислородом более 100 %. Однако абсолютные значения процентного содержания и концентраций кислорода летом уменьшаются в связи с повышением температуры воды, уменьшающим растворимость кисло-

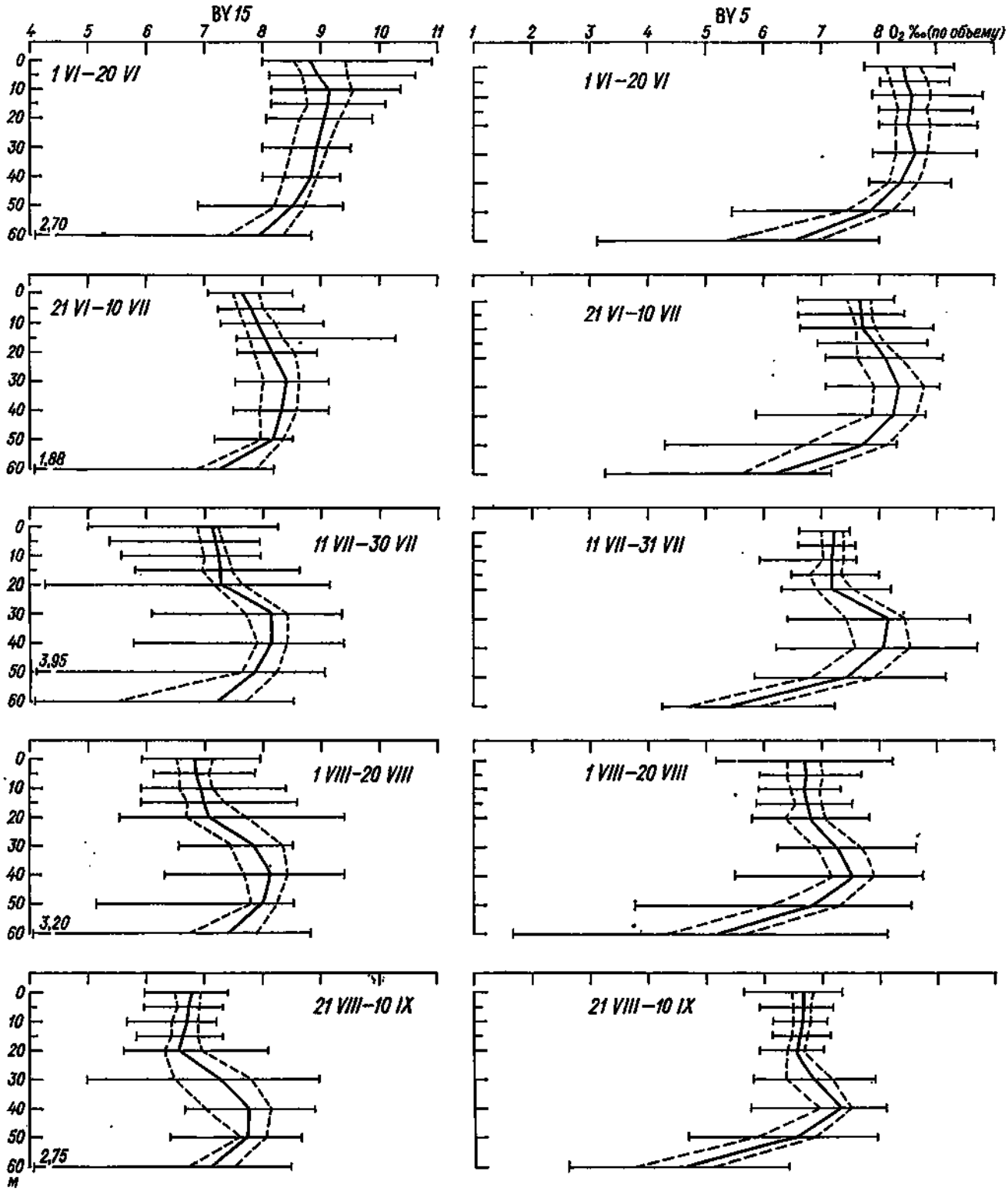
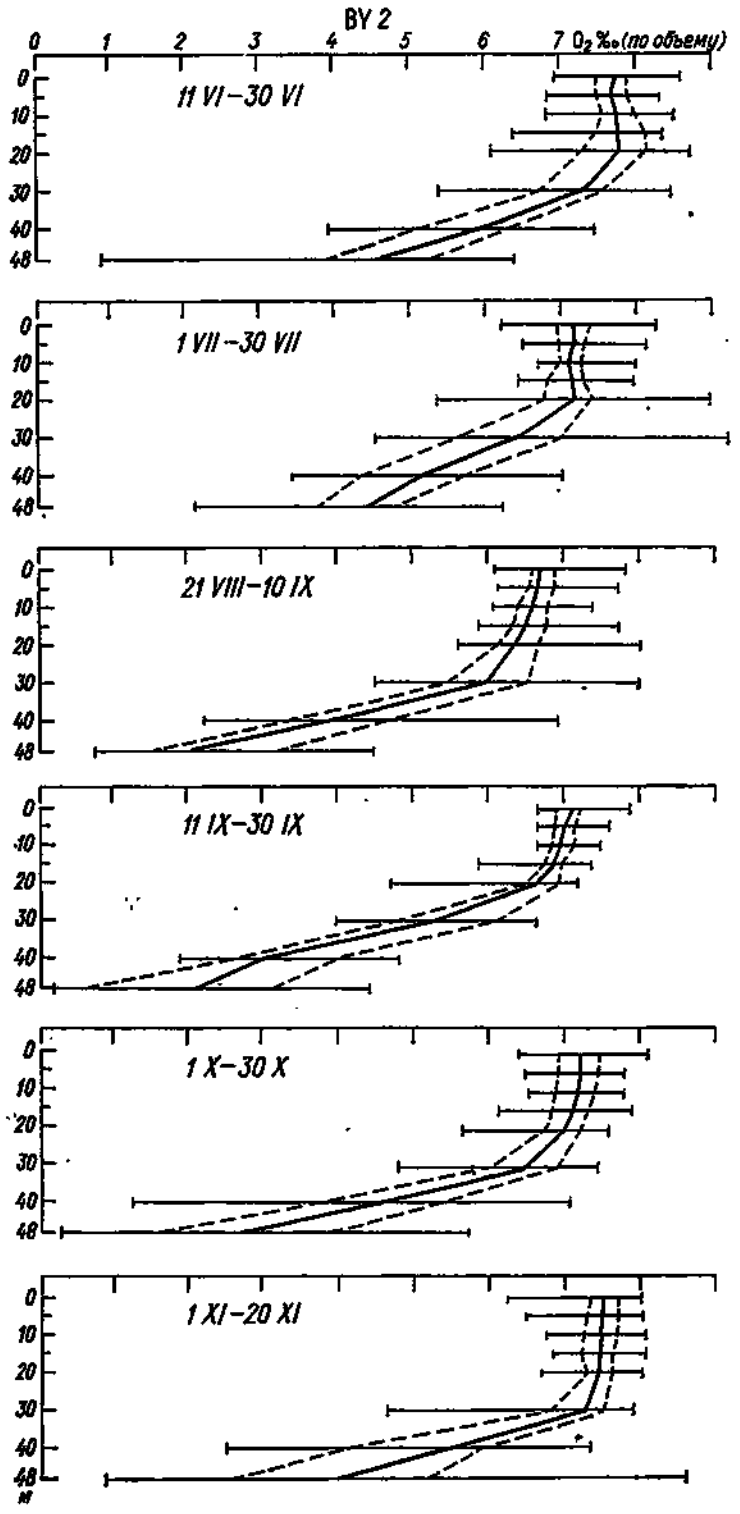


Рис. 12.7. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций кислорода в летний период в верхнем впадин и в летний и осенний периоды в Арконской впа-

рода и способствующим отдаче его в атмосферу, а также из-за затрат на биохимическое окисление продуцируемого и поступающего с поверхностным стоком с суши органического вещества. Внутригодовой минимум концентраций совпадает с периодом максимальных значений температуры воды и отмечается в августе—1-й декаде сентября. С глубиной время наступления минимума сдвигается на более поздние сроки.

В термоклине и под ним убыль кислорода связана лишь с процессами биохимической деструкции взвешенных веществ, замедленной из-за низкой температуры воды. Поэтому здесь сохраняются относительно высокие концентрации кислорода, формирующие максимум его вертикального распределения.

Осенью, по мере охлаждения воды и сокращения светового дня, интенсивность фотосинтеза и



слое Готландской (ст. BY 15) и Борнхольмской (ст. BY 5) дине (ст. BY 2).

продуцирования кислорода снижается и главным источником его поступления становится абсорбция из атмосферы. Уже в сентябре концентрации кислорода в слое 0—20 м начинают повсеместно возрастать в связи с увеличением его растворимости по мере понижения температуры воды. Однако насыщенность поверхностного слоя остается ниже 100 % и даже уменьшается к концу года из-за увеличения толщи аэрируемого слоя.

Ниже этого слоя концентрации кислорода, в отличие от процентного содержания, уменьшаются, до тех пор пока в результате осеннего охлаждения, увеличения толщины поверхностного слоя, ослабления и заглубления термоклина не начнется аэрация всего верхнего слоя.

Годовой ход показателей содержания кислорода в конкретных условиях одного года можно сопоставить со средним многолетним благодаря наличию

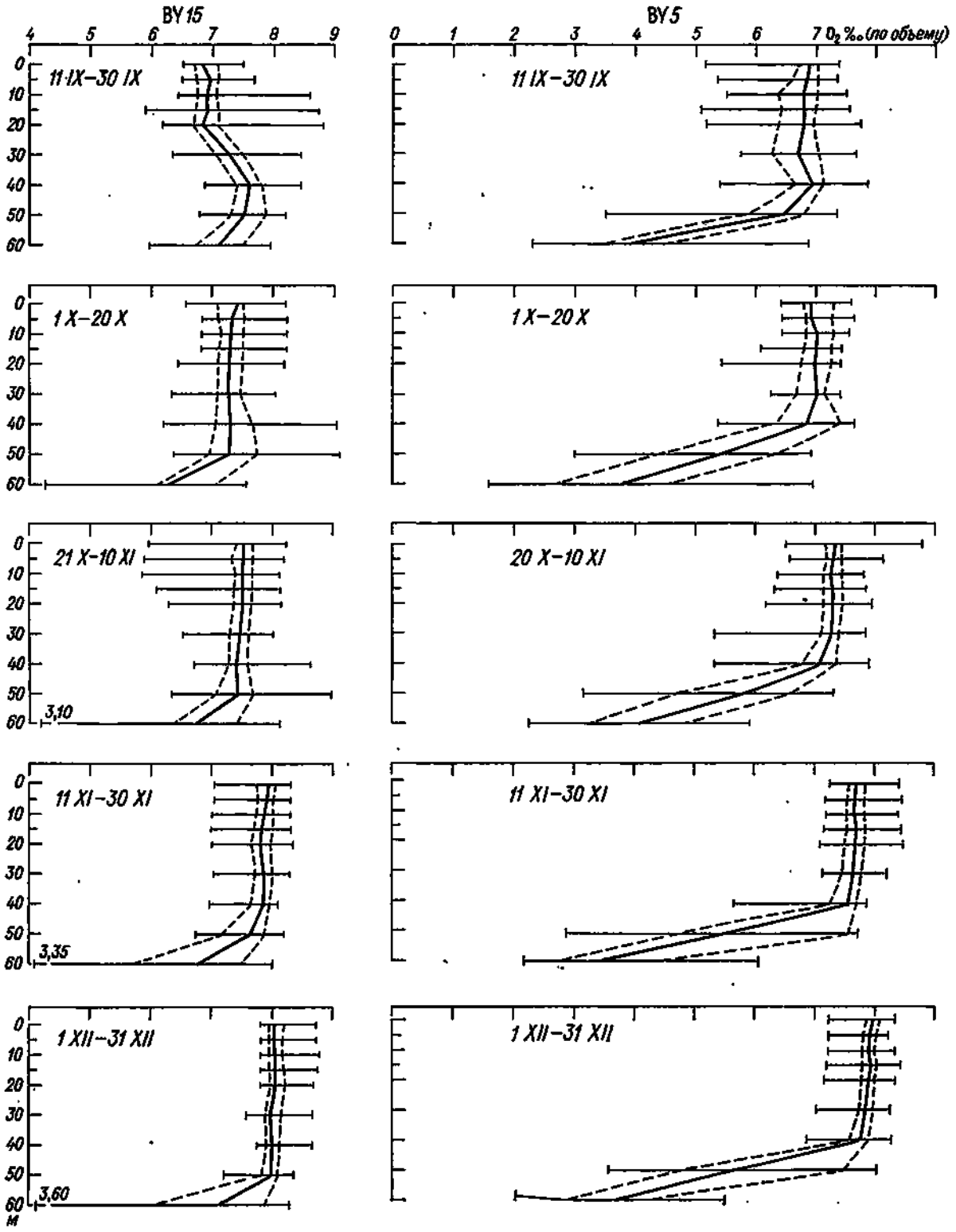


Рис. 12.8. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций кислорода в осенний и зимний периоды в верхнем слое Готландской (ст. BY 15) и Борнхольмской (ст. BY 5) впадин.

данных наблюдений по программе Международного года Балтики (1969—1970 гг.), когда в Готландской впадине ежемесячно, а иногда дважды в месяц, проводились многосуточные измерения длительностью около 4—5 сут. Расчет квартилей распределения данных каждой из этих серий позволил получить достаточно хорошо обеспеченный статистически, едва ли не уникальный для открытой части моря с этой точки зрения годовой ход показателей содержания кислорода в конкретном 1969 г. Кривые годового хода для поверхности, полученные путем соединения центров выборок (медианных значений, отнесенных к средним датам наблюдений) для 1969 г. и по средним многолетним данным, представлены на рис. 12.12. Данные 1969 г. иллюстрируют характерные особенности фазовых переходов в фотическом слое, к которым относятся:

1) скачкообразное возрастание процентного со-

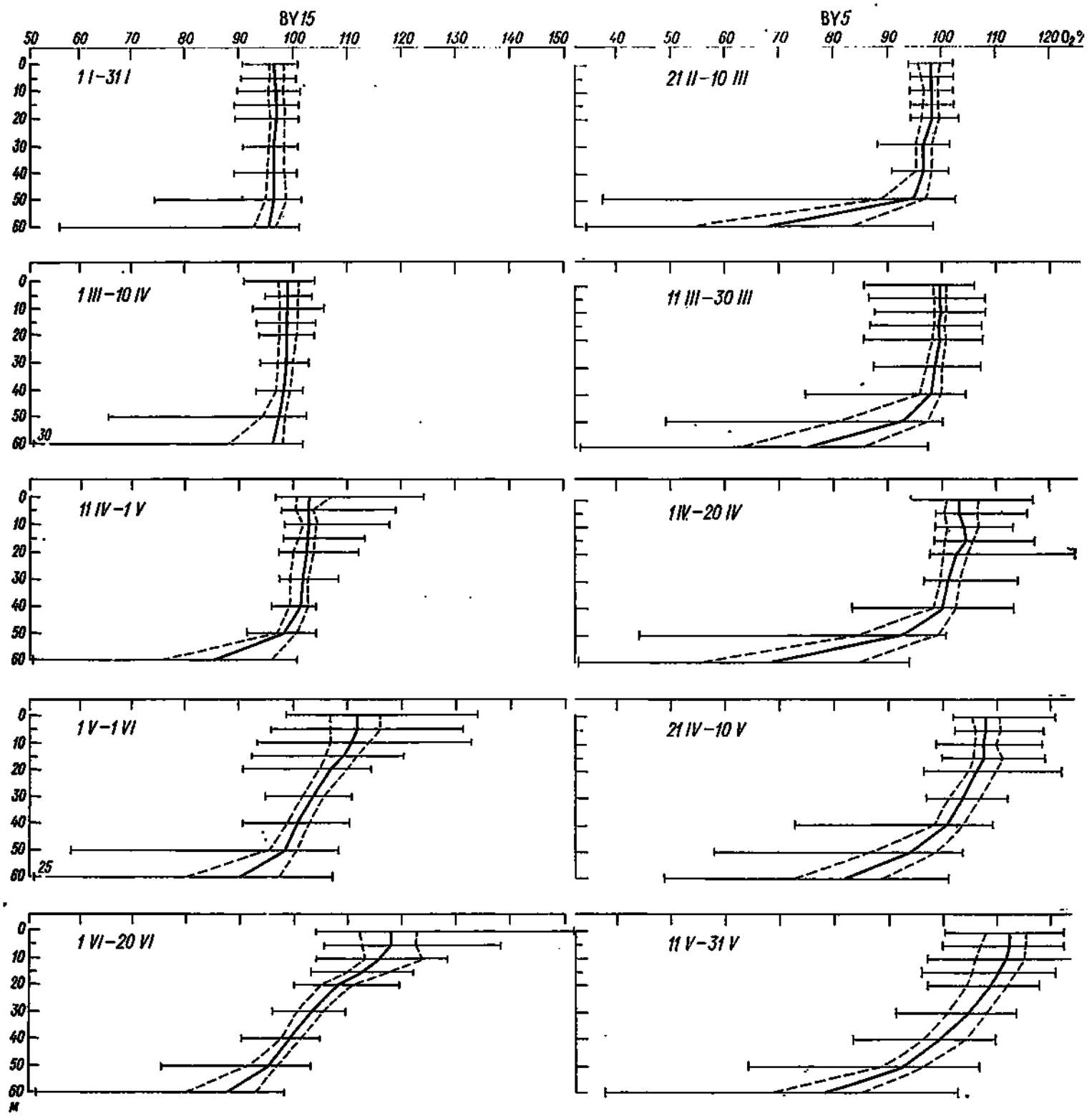


Рис. 12.9. Вертикальное распределение квартильных оценок насыщения кислородом верхнего слоя Готландской (ст. BY 15), Борнхольмской (ст. BY 5) и Арконской (ст. BY 2) впадин в зимний и весенний периоды.

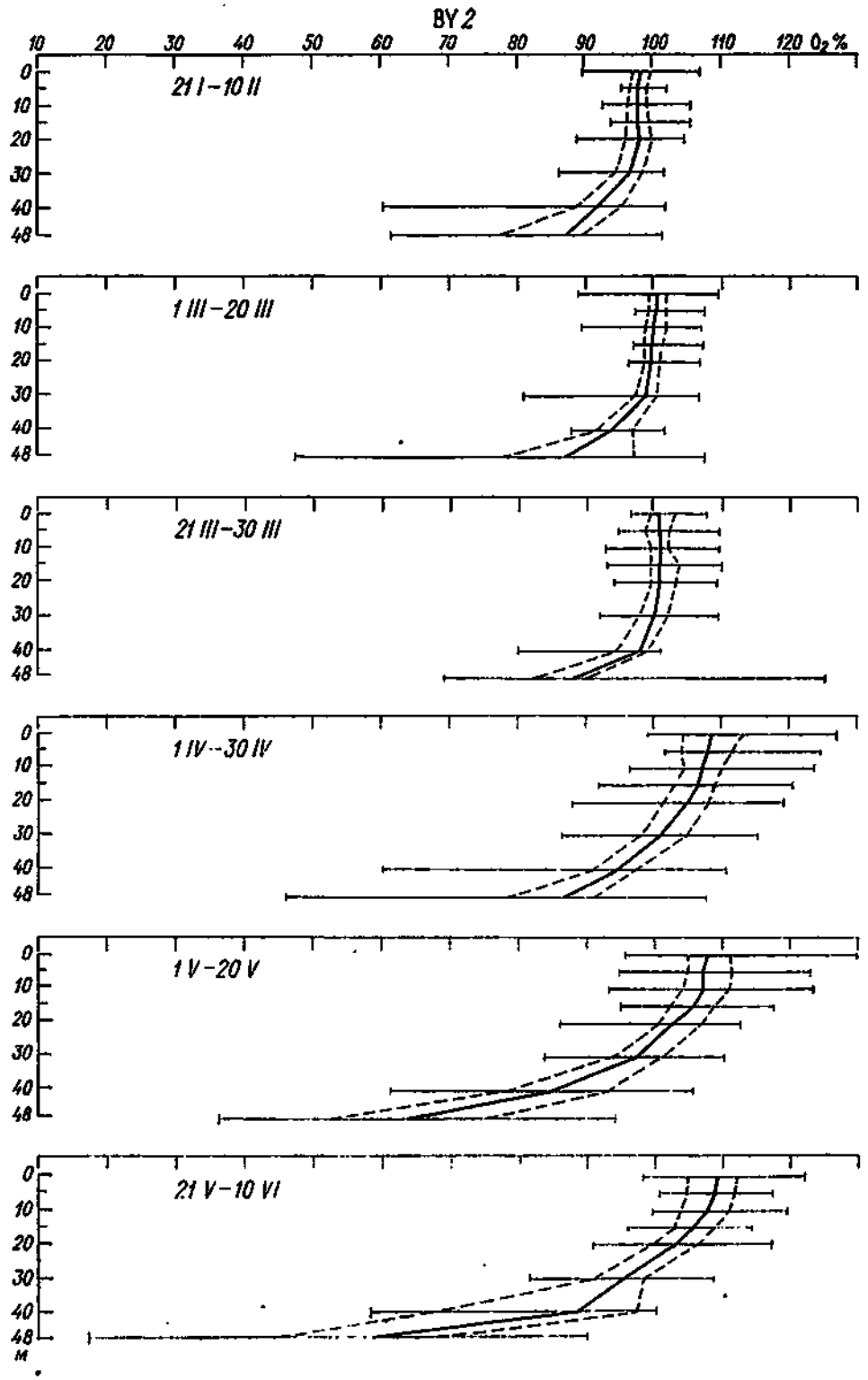


Рис. 12.9.

держания кислорода и его концентраций в период весенней вспышки фитопланктона в апреле (рис. 12.12 *а*, кривая *2*);

2) увеличение пересыщения кислородом в июне (рис. 12.12 *б*, кривая *2*);

3) небольшой осенний максимум концентраций и насыщения кислородом в октябре, отражающий, по-видимому, осеннюю вспышку фитопланктона.

В статистических многолетних данных все эти изменения сглажены (см. рис. 12.12, кривые *1*).

Пространственные особенности годового хода иллюстрируют рис. 12.13—12.15, из которых видно, что различия концентраций на поверхности моря в целом невелики и более характерны для весеннего периода и первой половины лета. С глубиной пространственные различия концентраций увеличиваются и на глубинах 20—40 м становится более выраженным их возрастание с юга на север. Главная причина этих различий, по-видимому, в уменьшении солености в этом направлении и в лучшей растворимости кислорода в воде.

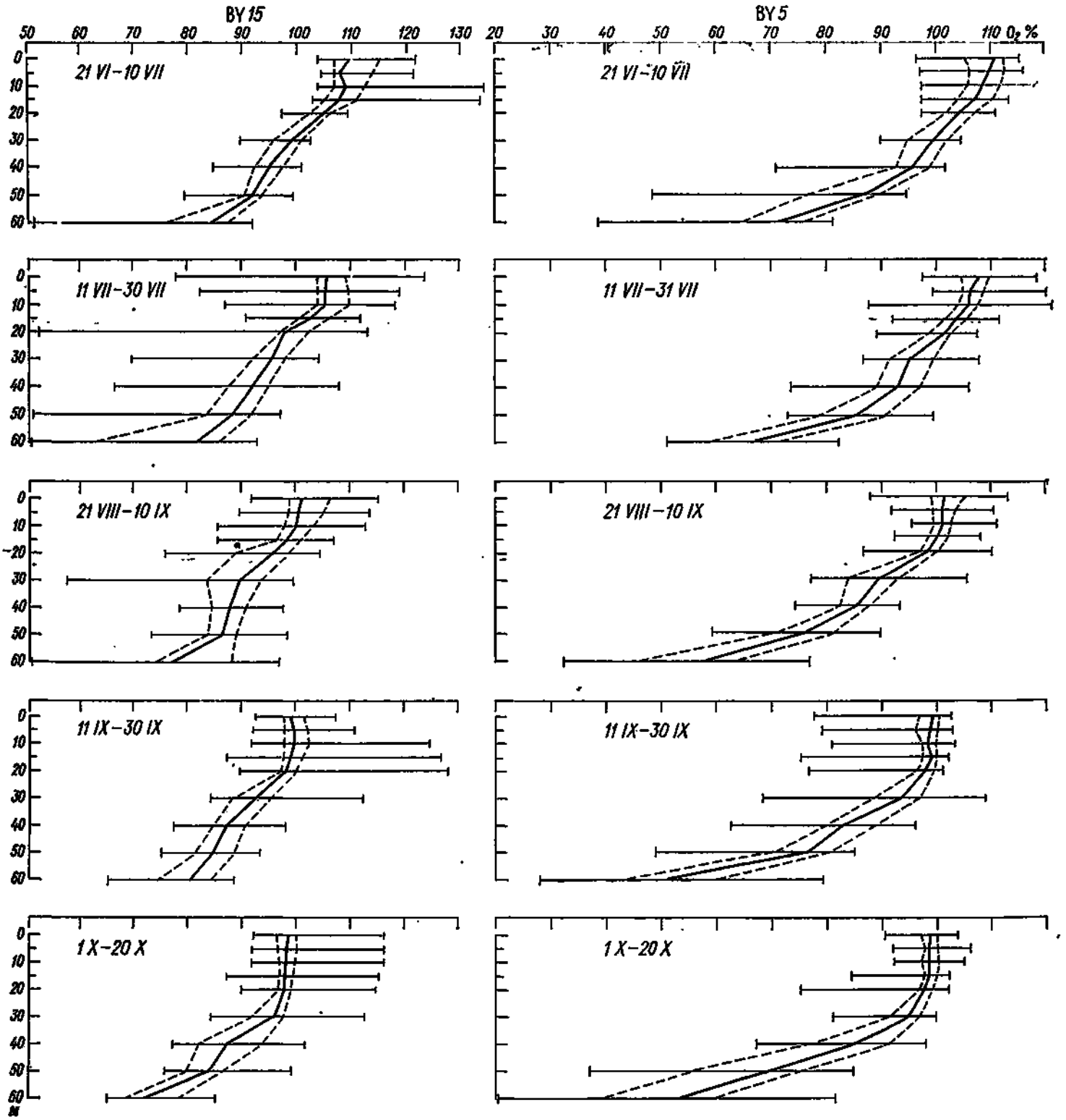


Рис. 12.10. Вертикальное распределение квартильных оценок насыщения кислородом верхнего слоя Готландской (ст. BY 15), Борнхольмской (ст. BY 5) и Арконской (ст. BY 2) впадин в летний и осенний периоды.

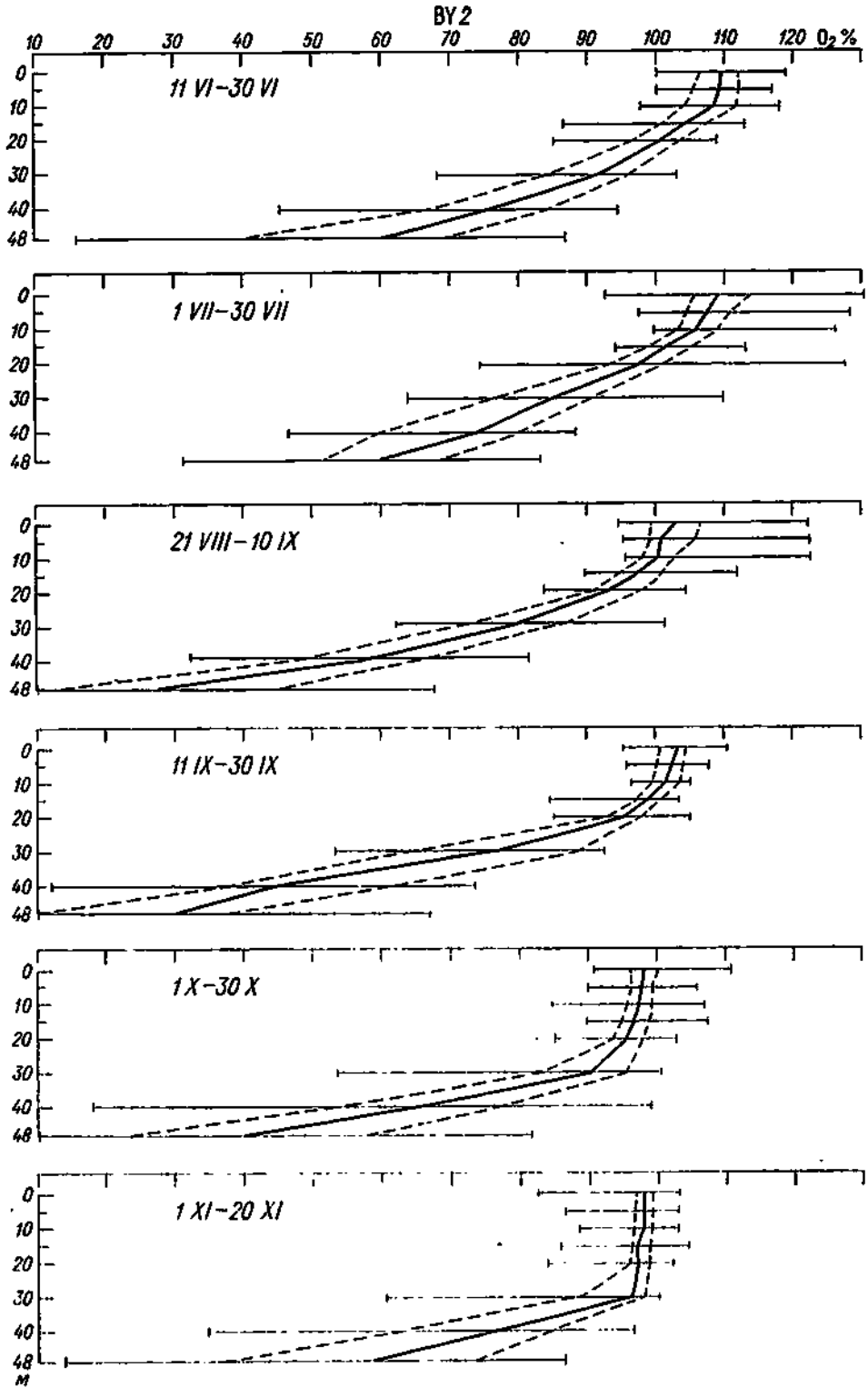


Рис. 12.10.

Пространственные различия в насыщении кислородом вод, как и концентраций, относительно невелики и лишь в фазе их максимума (в июне) возрастают.

12.1.2. Суточная и короткопериодная изменчивость

Наличие суточных колебаний содержания кислорода в поверхностном слое моря связано с суточным ходом температуры и, главным образом, освещенности, регулирующей интенсивность фотосинтеза в течение вегетационного периода. Однако эти колебания не всегда явно выражены, поскольку происходят на фоне температурных, регулирующих газообмен с атмосферой, и динамических колебаний, определяющих короткопериодную изменчивость всех показателей, вклад которой для кислорода, как показано далее, не меньше, чем суточной.

Характеристика короткопериодной и суточной изменчивости содержания кислорода дается на основе статистического анализа данных срочных на-

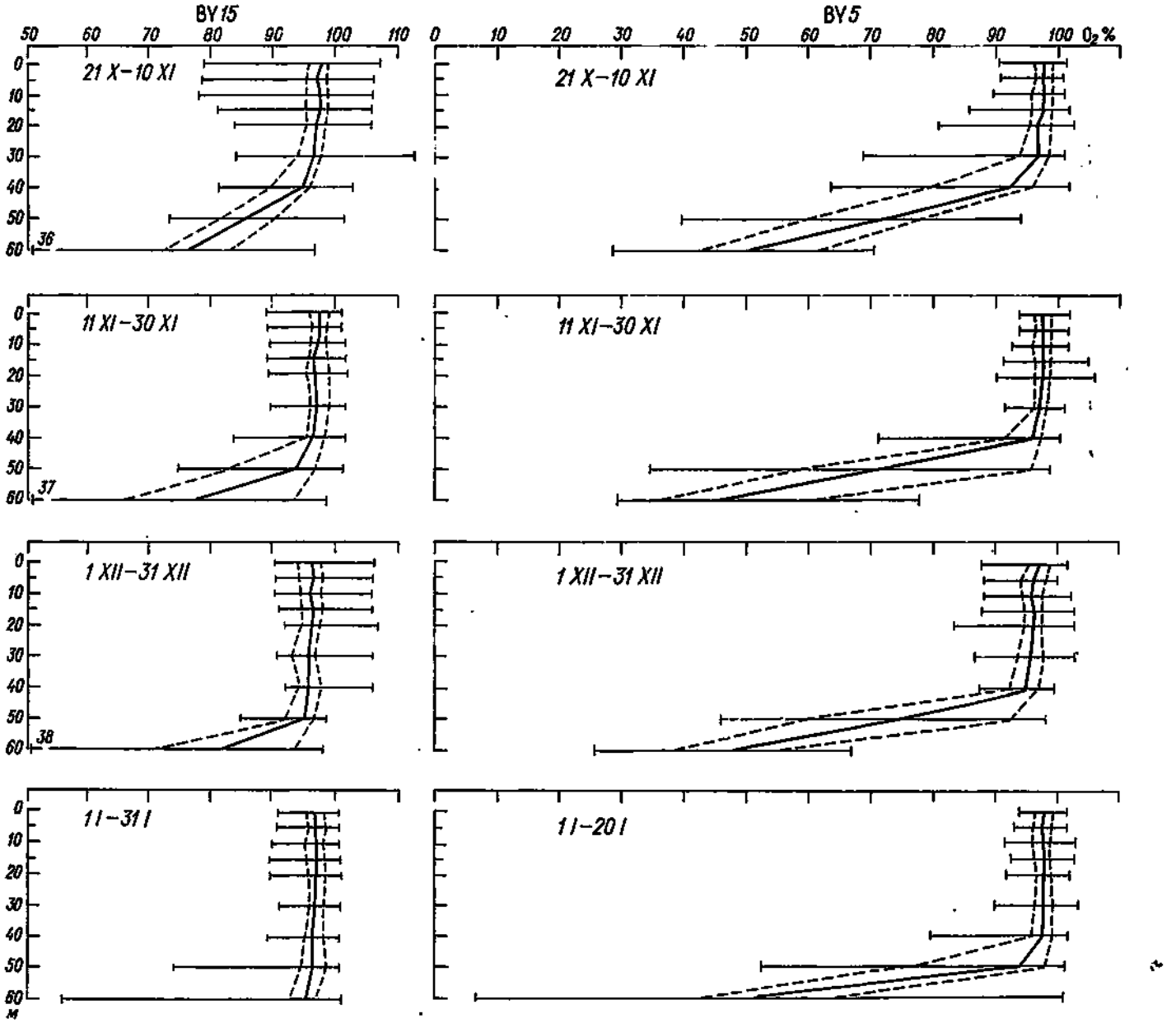


Рис. 12.11. Вертикальное распределение квартильных оценок насыщения кислородом верхнего слоя Готландской (ст. BY 15) и Борнхольмской (ст. BY 5) впадин в осенний и зимний периоды.

блюдений 17 многосуточных серий, выполненных по программе МГБ в Готландской впадине (табл. 12.1), о которых упоминалось выше (см. рис. 12.12).

Анализ этих данных произведен для всех горизонтов наблюдений в верхнем слое (0, 10, 30 и 50 м) в двух аспектах: 1) рассмотрен временной ход концентраций на каждом из горизонтов в течение серий, определены размахи[1] и периоды флюктуаций, в том числе и суточного хода, результаты обобщены для холодного и теплого периодов года; 2) получены оценки короткопериодной изменчивости данных каждой серии, характеризуемые интерквартильным расстоянием и размахом, рассмотрены их сезонные изменения и соотношение с соответствующими многолетними статистическими показателями.

[1] Размах флюктуаций определялся как разность между каждой максимальной концентрацией и ближайшей последующей минимальной.

Сопоставление изменений содержания кислорода на глубинах 0, 10, 30 и 50 м показало, что даже в зимних условиях, когда для верхнего слоя характерно наиболее однородное вертикальное распределение гидрологических и гидрохимических показателей, синхронность флюктуаций наблюдается не всегда, но все же преобладает, как показывает пример на рис. 12.16 *а*. Весной при активизации фотосинтеза это характерно лишь в слое вод 0—30 м (рис. 12.16 *б*), летом синхронность нарушается в связи с экранирующим влиянием термоклина.

Изменения концентраций кислорода в холодный период, как правило, имеют противоположную направленность по отношению к температурным, однако весной и летом эта взаимосвязь нарушается, а на поверхности часто встречается положительная корреляция.

Как показало объединение данных многосуточных серий холодного (октябрь—декабрь, январь—

Таблица 12.1

Информационная база данных для анализа суточной и короткопериодной изменчивости содержания кислорода на ст. BY 15

Номер серии	Судно	Страна	Период наблюдений	Дискретность наблюдений, ч	Количество данных на горизонте
1	«Скагеррак»	Швеция	25—30 I 1969	3	40
2	«Мазирбе»	СССР	18—26 II 1969	6	28
3	«Проф. Альбрехт Пенк»	ГДР	4,5—7,8 III 1969	3	20
4	«Биркут»	ПНР	30 III—3 IV 1969	3	40
5	«Скагеррак»	Швеция	19—24 IV 1969	3	40
6	«Мазирбе»	СССР	22—29 V 1969	6	27
7	«Аранда»	Финляндия	7—13 VI 1969	3	40
8	«Биркут»	ПНР	12—17 VII 1969	3	40
9	«Мазирбе»	СССР	2—9 VIII 1969	6	28
10	«Биркут»	ПНР	20—22 IX 1969	3	17
11	«Проф. Альбрехт Пенк»	ГДР	6—11 X 1969	3	42
12	«Мазирбе»	СССР	1—4 XI 1969	6	11
13	«Скагеррак»	Швеция	24—25 XI 1969	3	10
14	«Проф. Альбрехт Пенк»	ГДР	10—12 XII 1969	3	16
15	«Скагеррак»	Швеция	23—26 I 1970	3	28
17	«Алькор»	ФРГ	16—21 V 1970	3	42

март) и теплого (апрель—сентябрь) периодов 1969 г., представленное на рис. 12.17, размах флюктуаций концентрации кислорода возрастает в теплые месяцы и увеличивается с глубиной.

Предполагается, что максимум содержания кислорода в фотическом слое должен наблюдаться после полудня, когда уменьшающееся продуцирование кислорода становится равным его потреблению, а минимум — ранним утром, когда возрастающее продуцирование кислорода достигает одинаковой интенсивности с его убылью [1]. Как показал анализ данных многосуточных серий, обусловленный суточной ритмикой фотосинтеза максимум содержания кислорода на поверхности в районе Готландской впадины весной и летом характерен (с учетом сроков и дискретности измерений) для интервала 12—18 ч, а минимум — для интервала 21—3 ч. В сентябре наблюдался сдвиг времени суточных экстремумов на более поздний срок. Размах суточных изменений определялся по разности суточных экстремумов концентраций (рис. 12.18).

В осенние и зимние месяцы наблюдались меньшие суточные изменения концентраций кислорода, связанные с суточным ходом температуры: в период ее минимума (преимущественно в 6 ч) наблюдался кислородный максимум, а в 12—18 ч, когда температура достигала дневного максимума — минимум содержания кислорода. Размах этих колебаний был существенно меньше, чем в теплые месяцы, и составлял 0,04—0,15‰ (см. рис. 12.18).

Представление о вкладе короткопериодной изменчивости в полученные статистические характеристики многолетнего годового хода концентраций и насыщения вод кислородом дает графическое сопоставление их на рис. 12.19 и 12.20. Как показывает положение данных многосуточных серий на фоне многолетних, в слое 0—30 м доминирует межгодовая изменчивость. В то же время для глубины 50 м в период с мая по октябрь можно предполагать, что динамика содержания кислорода вблизи галоклина в большей степени определяется короткопериодными колебаниями. Не исключено, однако, что это связано со спецификой гидрологических условий 1969 г., в течение которого происходил приток каттегатских вод в Готландскую впадину.

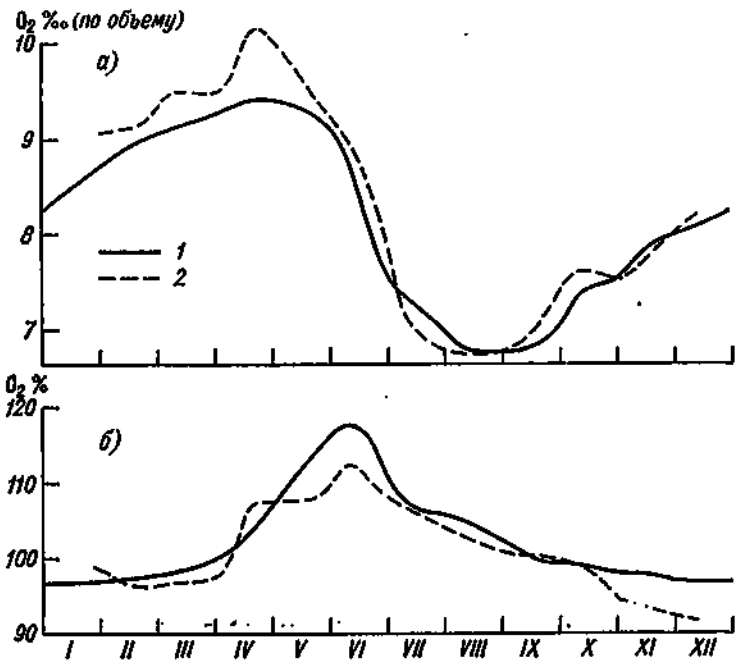


Рис. 12.12. Годовой ход концентраций (*а*) и насыщения кислородом (*б*) поверхностных вод Готландской впадины (ст. BY 15) по многолетним данным (*1*) и по данным многосуточных серий наблюдений в 1969 г. (*2*).

12.2. Кислородный режим глубинного слоя

12.2.1. Межгодовая изменчивость и сезонный аспект динамики кислородных условий

Во всех глубоководных районах моря в динамике кислородных условий в глубинном слое доминирует межгодовая изменчивость, формируемая мощными вторжениями высокосоленых североморских вод в придонные слои (см. п. 10.3.3) и модифицируемая адвекцией соленых вод по галоклину и верхней части глубинного слоя (см. п. 10.3.4).

Количество кислорода, поступающего с притоками вод, различно и зависит, с одной стороны, от

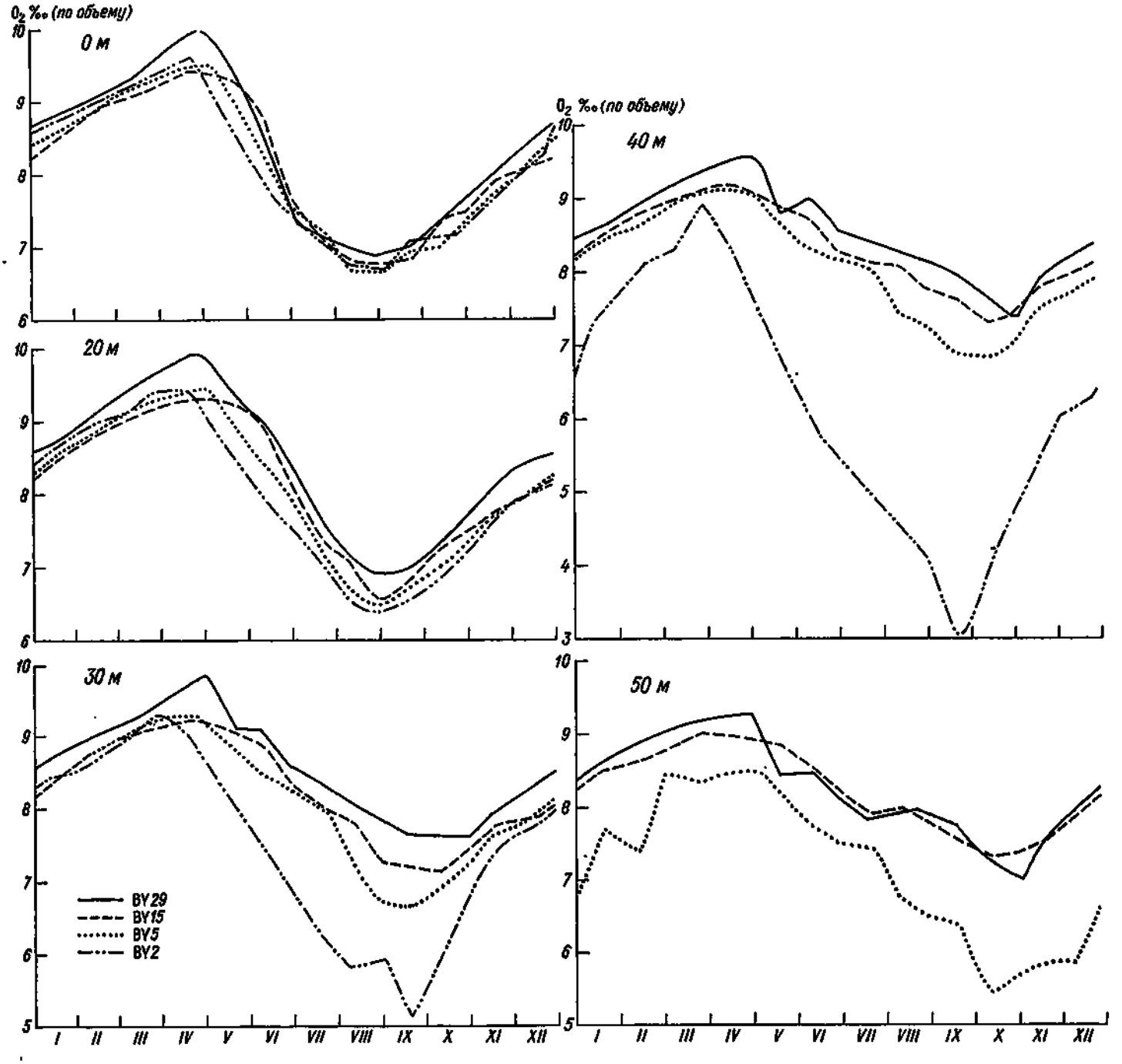


Рис. 12.13. Годовой ход концентраций кислорода по многолетним данным в различных районах моря на стандартных горизонтах 0—50 м.

их объема, солености и времени года, в течение которого они происходят. С другой стороны, максимальные концентрации, которые можно обнаружить при поступлении свежих вод, зависят от географического положения района — его удаленности от зоны проливов, геоморфологических особенностей и глубины.

В течение циклов, выделенных на основе наиболее значительных притоков (см. п. 10.3.3), концентрации кислорода снижаются, поскольку его биохимическое потребление превышает аэрацию за счет меньших притоков и вертикального переноса из верхних слоев. Динамика соотношения биохимическое потребление кислорода (БПК) — аэрация определяет протекание циклов в различных районах моря, а также минимальные концентрации кислорода или максимальные сероводорода в конечной фазе циклов.

Межгодовые изменения концентраций кислорода в глубинном слое основных бассейнов Балтийского моря, определяемые разнообразным сочетанием указанных условий, представлены квартильными оценками в табл. 12.2 и на рис. 12.21—12.23.

В соответствии со своим генезисом циклы межгодовых изменений наиболее ярко выражены в нижней части глубинного слоя, по которой распространяются только мощные потоки. Обобщенные данные о толще вод с характерным возрастанием концентраций кислорода в результате мощных потоков и снижением их при анаэробных условиях у

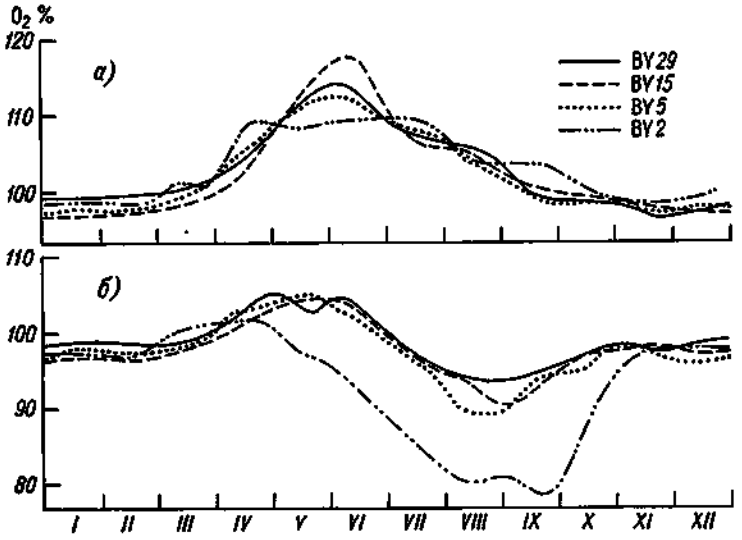


Рис. 12.14. Годовой ход насыщения кислородом поверхностных вод (*а*) и на глубине 30 м (*б*) в различных районах моря по многолетним данным.

дна, а также о характерном для этих периодов содержании кислорода и сероводорода представлены в табл. 12.3. (Расчет характеристик проведен по объединенным массивам данных, полученных в периоды аэробных и анаэробных условий у дна.)

В верхней части активного глубинного слоя и в галоклине (на глубинах 70—90 м) состояние кислородных условий непосредственно не связано со сменой аэробных условий анаэробными. Межгодовая изменчивость содержания кислорода в галоклине в наибольшей степени определяется изменениями глубины его залегания и условиями вертикального обмена (рис. 12.24). Повышенные концентрации кислорода характерны для многолетних периодов с меньшей соленостью вод на данной глубине и с лучшими условиями аэрации за счет вертикального перемешивания, в то время как низкие значения соответствуют высокой солености и уменьшению роли этого процесса.

Другим важнейшим процессом, определяющим наряду с мощными вторжениями динамику кислорода в активном глубинном слое, может оказаться распространение притоков меньшего объема и солености, ежегодно формируемых в Датских проливах в осенне-зимних условиях как следствие штормовых нагонов и в летних условиях в виде компенсационного противотечения (см. п. 10.3.4). Исходя из результатов специального статистического анализа (см. рис. 12.23), можно предполагать, что распространение «зимних» и «летних» вод приводит к возникновению сезонной динамики содержания кислорода, тем более отчетливо связанной с адвекцией, чем ближе соответствующий бассейн расположен к проливам. Согласно этой гипотезе, холодные, обогащенные кислородом воды в Борнхольмскую впадину поступают в феврале—мае, а теплые воды с пониженным содержанием кислорода — в августе—январе (рис. 12.25, ст. BY 5), в юго-восточную часть моря — в апреле—сентябре и октябре—феврале (см. рис. 12.23, ст. BY 9), в Готландскую впадину — в мае—октябре и ноябре—апреле (рис. 12.25, ст. BY 15) соответственно. Сезонная динамика в северной части моря формируется главным образом биохимической деструкцией взвешенных веществ, оседающих на протяжении и по окончании вегетационного сезона, и осенне-зимним конвективным перемешиванием (рис. 12.25, ст. BY 29).

На состояние кислородных условий в северо-западной части моря большое влияние оказывает распространение притоков, минующих придонный слой впадин с водами высокой плотности. Роль этого фактора отражает динамика содержания кислорода у дна Ландсортской впадины, где, несмотря на наибольшую в Балтийском море глубину (459 м), анаэробные условия развиваются реже и более кратковременно, чем в Готландской впадине (см. рис. 10.25) [240]. Характерно, что приток 1983 г., который не вызвал изменения анаэробных условий в Готландской впадине (прошел по слою 70—100 м), оказался достаточно эффективным для обновления глубинных вод Ландсортской впадины в 1984 г. Фактором лучшего обеспечения кислородом ее придонного слоя является хорошее вертикальное перемешивание — ниже 100 м и до дна наблюдается однородный по плотности слой [225].

Притоки свежих вод, генерируемые мощными вторжениями, в Ландсортской впадине обнаруживаются через 2—4 мес после того, как достигают дна Готландской впадины [54]. Этот интервал, по-видимому, нередко продолжительнее, так как формируемые максимумами солености и содержания кислорода у дна межгодовые циклы здесь отмечаются со сдвигом в 2 года по отношению к Борнхольмской впадине (см. рис. 10.25). Транзит притоков по активному глубинному слою происходит значительно быстрее [240]. В целом кислородные условия в Ландсортской впадине определяются в значительной мере их состоянием в северной части моря — вслед за развитием анаэробных условий у дна этих районов сероводород обнаруживается и у дна Ландсортской впадины [225].

Кислородные условия в Ландсортской впадине, как правило, несколько лучше, чем в Западной Готландской котловине, куда поступают вытесненные из восточной частн Центрального бассейна застойные воды. При близких значениях концентраций кислорода анаэробные условия здесь наблюдаются чаще [103].

Своеобразна динамика кислородных условий в глубинном слое впадины Карлсё, который формируется в значительной мере водами промежуточного слоя Балтики [366]. В ходе межгодовых изменений содержания кислорода у дна циклы, образуемые мощными вторжениями каттегатских вод [240], не обнаруживаются. Преобладающим диапазоном колебаний является годовой ход, определяемый влиянием зимней конвекции [37, 366]. Максимум содержания кислорода наблюдается в конце зимы с аэрацией всей толщи вод до дна, наименьшие концентрации — в конце осени—начале зимы [37, 366]. Эффективное зимнее обогащение глубинных вод кислородом обусловлено слабым галоклином [37].

В 1968—1976 гг. у дна впадины Карлсё в периоды внутригодовых минимумов наблюдалось присутствие сероводорода, который при зимней аэрации заменялся кислородом (максимальные концентрации менее 0,3‰). В предшествующий и последующий многолетние периоды наблюдений кислородные условия в этом районе были значительно лучше и максимальные концентрации составляли 1—2‰ и даже более [240].

Таблица 12.2

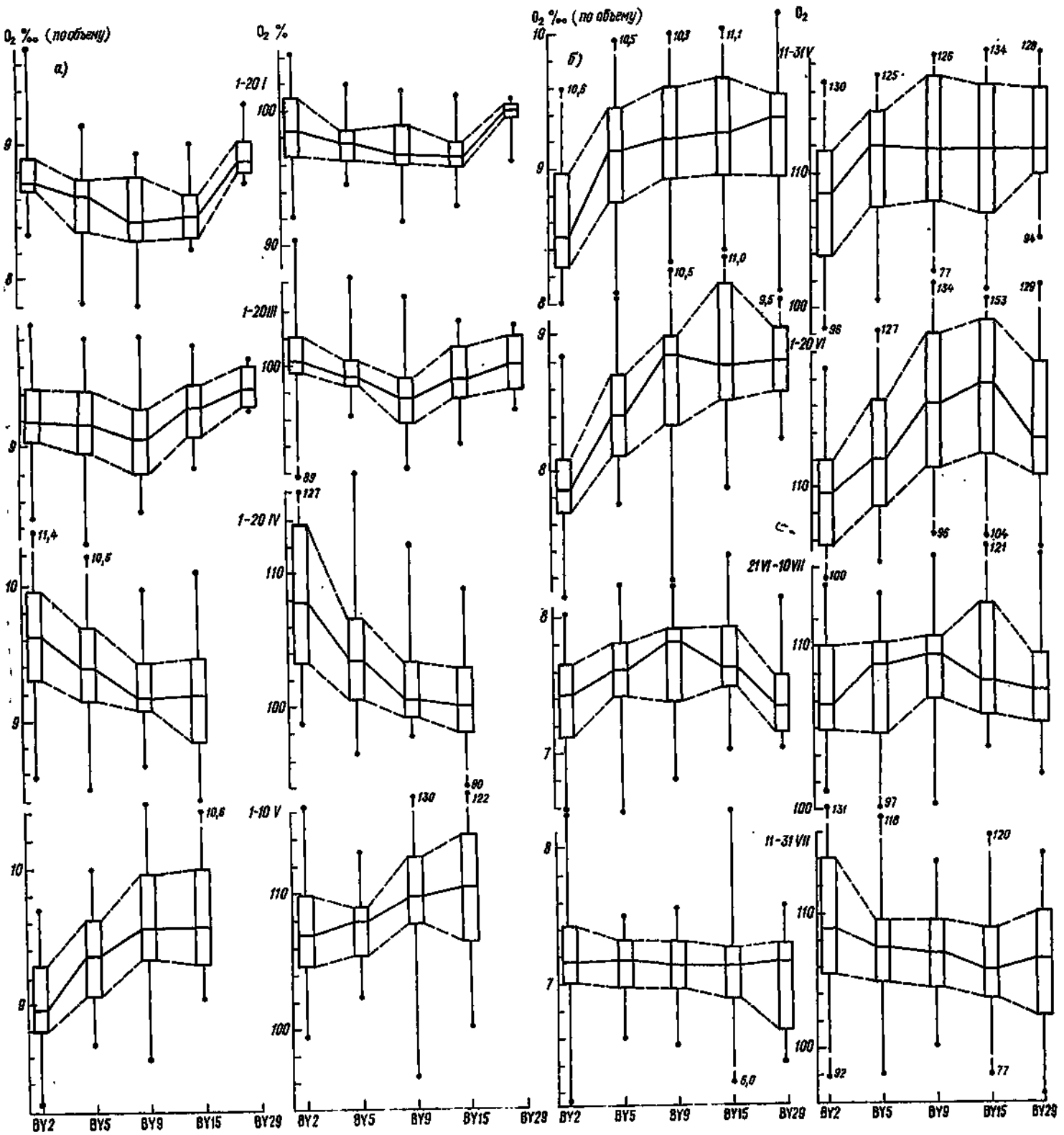
Статистические характеристики концентраций кислорода (‰ по объему) на станциях BY 5, BY 9, BY 15 и BY 29 по циклам межгодовой изменчивости у дна и на глубинах 100 и 80 м

Характеристика	Дно *				100 м			80 м		
	BY 5	BY 9	BY 15	BY 29	BY 9	BY 15	BY 29	BY 9	BY 15	BY 29
					1961—1964 гг.					
T	1,3	1,3	0,3	—	2,0	1,3	—	3,0	2,7	—
$x_{0,25}$	0,3	0,8	0,1	—	1,6	1,1	—	1,7	1,4	—
Me	1,3	1,2	0,2	—	1,9	1,3	—	3,1	2,5	—
$x_{0,75}$	2,3	1,9	0,8	—	2,6	1,5	—	3,9	4,2	—
$x_{мин}$	0,0	0,1	0,0	—	1,1	0,9	—	1,3	1,1	—
$x_{макс}$	4,8	3,9	2,3	—	4,4	1,8	—	6,3	7,4	—
					1964—1967 гг.					
T	1,1	2,1	0,7	0,5	2,2	1,4	0,5	2,1	1,5	0,7
$x_{0,25}$	0,4	1,3	0,1	0,3	1,6	1,2	0,4	1,6	1,3	0,7
Me	0,9	2,0	0,7	0,5	2,2	1,4	0,5	2,1	1,5	0,7
$x_{0,75}$	2,0	3,1	1,3	0,7	2,9	1,7	0,6	2,6	1,8	0,8
$x_{мин}$	0,1	0,2	—0,7	0,2	1,0	0,8	0,3	1,0	0,6	0,4
$x_{макс}$	4,8	3,8	2,0	1,0	3,9	2,1	0,9	4,9	3,4	1,8
					1967—1969 гг.					
T	1,0	0,8	—0,7	—0,1	1,2	0,7	0,2	1,2	0,9	0,6
$x_{0,25}$	0,3	0,2	—1,8	—0,3	0,8	0,5	0,1	0,9	0,7	0,3
Me	0,9	0,8	—0,5	—0,1	1,1	0,7	0,2	1,2	0,9	0,6
$x_{0,75}$	1,8	1,3	0,1	0,2	1,7	1,0	0,3	1,6	1,2	1,2
$x_{мин}$	—0,1	0,0	—2,8	—1,6	0,4	0,2	—0,5	0,5	0,3	—0,3
$x_{макс}$	4,9	2,9	1,2	0,6	3,0	1,4	0,7	2,9	4,8	4,0
					1969—1972 гг.					
T	1,1	1,7	0,4	0,2	1,6	1,1	0,2	1,3	1,4	0,7
$x_{0,25}$	0,2	0,7	0,0	0,1	1,1	0,8	0,1	0,9	1,0	0,5
Me	1,0	1,7	0,4	0,2	1,5	1,1	0,2	1,3	1,3	0,7
$x_{0,75}$	2,4	2,8	0,7	0,4	2,2	1,5	0,4	1,8	1,8	1,0
$x_{мин}$	—0,6	—0,5	—1,7	—0,4	0,3	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2
$x_{макс}$	6,4	5,1	2,1	0,6	4,1	6,8	0,7	7,0	7,2	4,1
					1972—1976 гг.					
T	1,0	1,5	0,1	0,2	1,4	1,0	0,5	1,4	1,8	1,8
$x_{0,25}$	0,3	0,6	—0,2	0,2	1,0	0,8	0,2	1,0	0,9	0,8
Me	0,8	1,4	0,2	0,3	1,4	0,9	0,4	1,4	1,6	1,7
$x_{0,75}$	2,2	2,7	0,4	0,4	1,9	1,3	0,9	2,0	3,1	3,3
$x_{мин}$	—0,5	0,1	—2,3	0,0	0,0	0,3	—0,1	0,3	0,3	0,2
$x_{макс}$	7,5	5,1	2,3	0,7	3,4	8,0	1,6	6,6	8,6	7,8
					1976—1980 гг.					
T	1,5	2,3	0,1	0,5	2,1	1,4	0,7	2,4	2,1	1,8
$x_{0,25}$	0,4	1,3	—0,1	0,3	1,4	1,0	0,5	1,7	1,7	1,0
Me	1,1	2,3	0,2	0,6	2,0	1,4	0,7	2,2	2,0	1,6
$x_{0,75}$	3,3	3,5	0,5	0,8	2,8	1,9	1,1	3,4	2,9	3,1
$x_{мин}$	0,0	0,1	—2,1	0,0	0,3	0,5	0,3	0,7	0,8	0,8
$x_{макс}$	6,5	5,0	2,2	1,2	4,6	3,8	1,5	8,7	8,5	5,5
					1980—1983 гг.					
T	0,6	0,5	—1,6	—0,3	1,2	0,7	0,4	2,0	1,7	2,5
$x_{0,25}$	—0,1	0,2	—2,1	—0,6	0,7	0,4	0,1	1,3	1,1	1,5
Me	0,4	0,5	—1,8	—0,3	1,1	0,6	0,5	1,9	1,6	2,5
$x_{0,75}$	1,5	0,8	—0,6	—0,2	1,8	1,1	0,6	2,9	2,4	3,6
$x_{мин}$	—2,4	—0,5	—3,3	—1,1	—2,2	—0,1	0,0	0,6	—0,2	0,2
$x_{макс}$	5,8	3,0	0,9	0,2	4,0	7,9	1,1	7,7	8,3	5,1
					1983—1986 гг.					
T	0,9	2,9	—1,6	0,4	3,2	2,2	2,0	3,9	4,7	4,4
$x_{0,25}$	0,4	1,9	—1,9	0,1	2,7	1,4	1,1	3,3	3,6	2,8
Me	0,7	2,9	—1,7	0,5	3,2	2,3	1,5	3,8	4,6	4,1
$x_{0,75}$	1,9	3,9	—1,0	0,6	3,8	2,9	4,0	5,0	5,9	6,8
$x_{мин}$	—0,6	0,4	—3,2	—0,4	1,2	—0,2	1,0	1,9	—0,2	2,5
$x_{макс}$	4,0	5,1	0,0	0,7	6,2	8,3	6,2	6,5	8,2	8,5

* Глубина придонного горизонта на ст. BY 5 более 85 м, на ст. BY 9 более 116 м, на ст. BY 15 225 м, на ст. BY 29 более 150 м.

На фоне рассмотренных диапазонов временно́й изменчивости в глубинном слое значителен размах короткопериодных колебаний, вызванных не только гидродинамическими процессами данного масштаба, но и неоднородностью распределения неконсервативных веществ [256, 258].

На основе статистического анализа данных многосуточных серий (см. табл. 12.1) можно показать сопоставимость короткопериодной и межгодовой изменчивости для застойных условий. Интерквартильные расстояния для некоторых многосуточных серий (см. рис. 12.22) и для всей фазы анаэробных условий 1968—1969 гг. оказались соизмеримыми (высота «ящиков» на рис. 12.22). При повышенной гидродинамической активности размах короткопериодной изменчивости, естественно, возрастает, особенно в слое, по которому происходит распространение притоков. Примеры таких ситуаций дают статистические характеристики для серий многосуточных наблюдений 1—4 ноября 1969 г. и 16—21 апреля 1970 г.



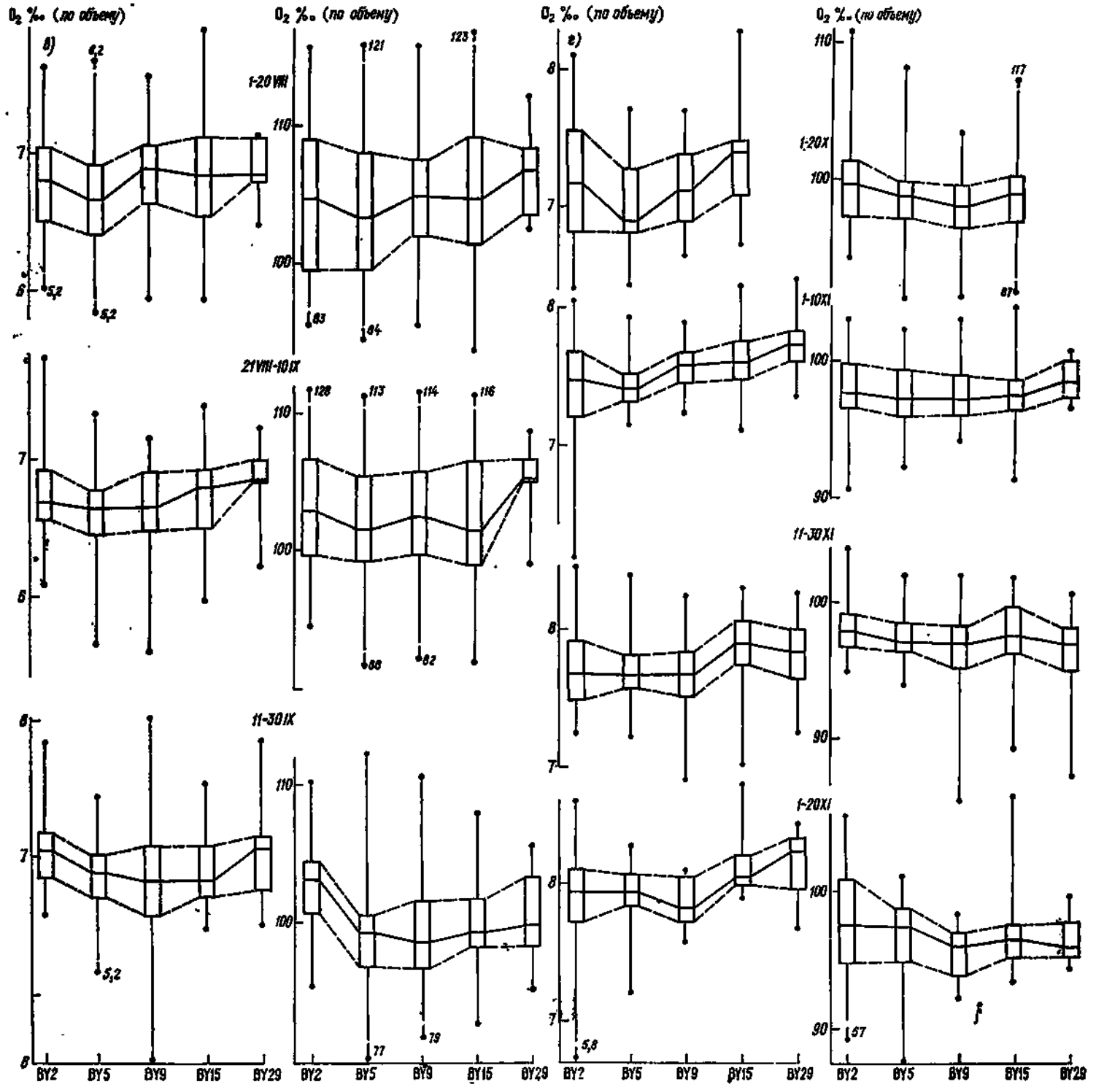


Рис. 12.15. Пространственные различия распределения квартильных оценок концентраций и насыщения кислородом, рассчитанных по одинаковым для всех базовых станций временным интервалам.

а) зима—весна; *б)* весна—лето; *в)* лето—осень; *г)* осень—зима.

12.2.2. Вертикальное и пространственное распределение кислорода

В табл. 12.4 и 12.5 и на рис. 12.26 представлены многолетние статистические характеристики содержания кислорода на стандартных горизонтах базовых станций, которые, несмотря на неизбежное при таком обобщении нивелирование различий, в целом отражают как пространственные изменения кислородных условий в направлении с юга на север, так и изменения содержания кислорода с глубиной в рассматриваемых районах.

Сложное вертикальное распределение кислорода характерно для периодов повышенной гидродинамической активности. При продвижении каттегатских вод в виде придонного течения, вытесняющего более легкие «старые» воды наверх, поступление их обнаруживается по придонному максимуму содержания кислорода. Распространение притоков по активному глубинному слою сопровождается фор-

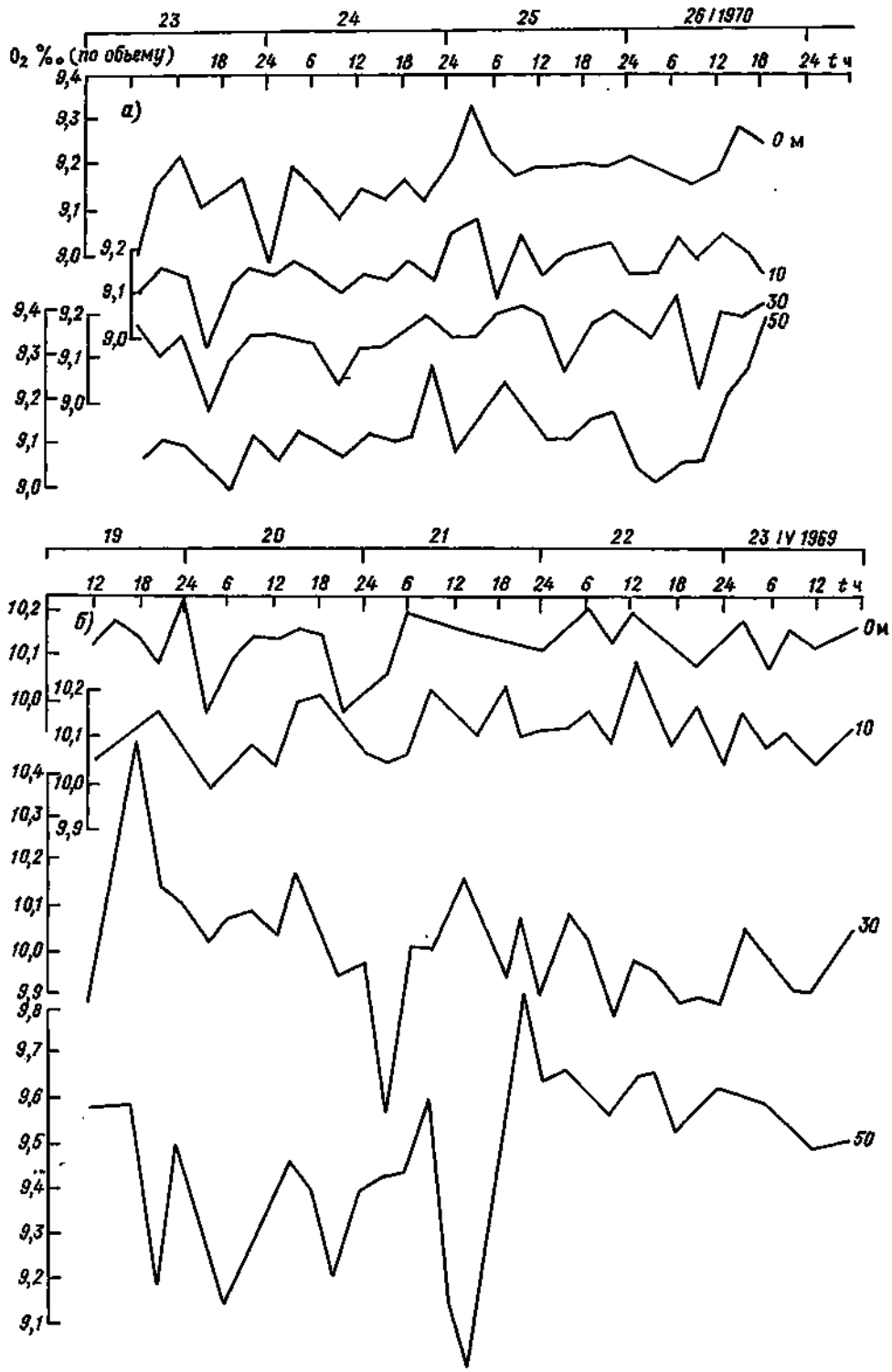


Рис. 12.16. Короткопериодные изменения концентраций кислорода в верхнем слое Готландской впадины в зимних (январь 1970 г.) (*а*) и в весенних условиях (апрель 1969 г.) (*б*) по данным срочных наблюдений многосуточных серий.

мированием вертикального максимума кислорода, над которым из-за сохранения «старых» вод, бедных кислородом, расположен минимум. Пример такого распределения в Готландской впадине дают вертикальные профили статистических характеристик для многосуточной серии в сентябре 1969 г. (рис. 12.27 *б*). Серии наблюдений в ноябре 1969 г (рис. 12.27 *в*) иллюстрируют обе ситуации — притока по дну и по нижней границе активного слоя. Сохранение вертикального минимума в слое 150—200 м даже в январе 1970 г., когда обновление вод уже завершилось, показывает, как медленно происходит перераспределение кислорода при аэрации глубинного слоя Готландской впадины, особенно в придонной его части.

Особенности пространственного распределения кислорода и сероводорода в развитых анаэробных условиях, динамику перестройки этого распределения в процессе распространения крупного вторжения каттегатских вод и по завершении обновления глубинного слоя открытой части Балтийского моря представляют уникальные данные наблюдений по

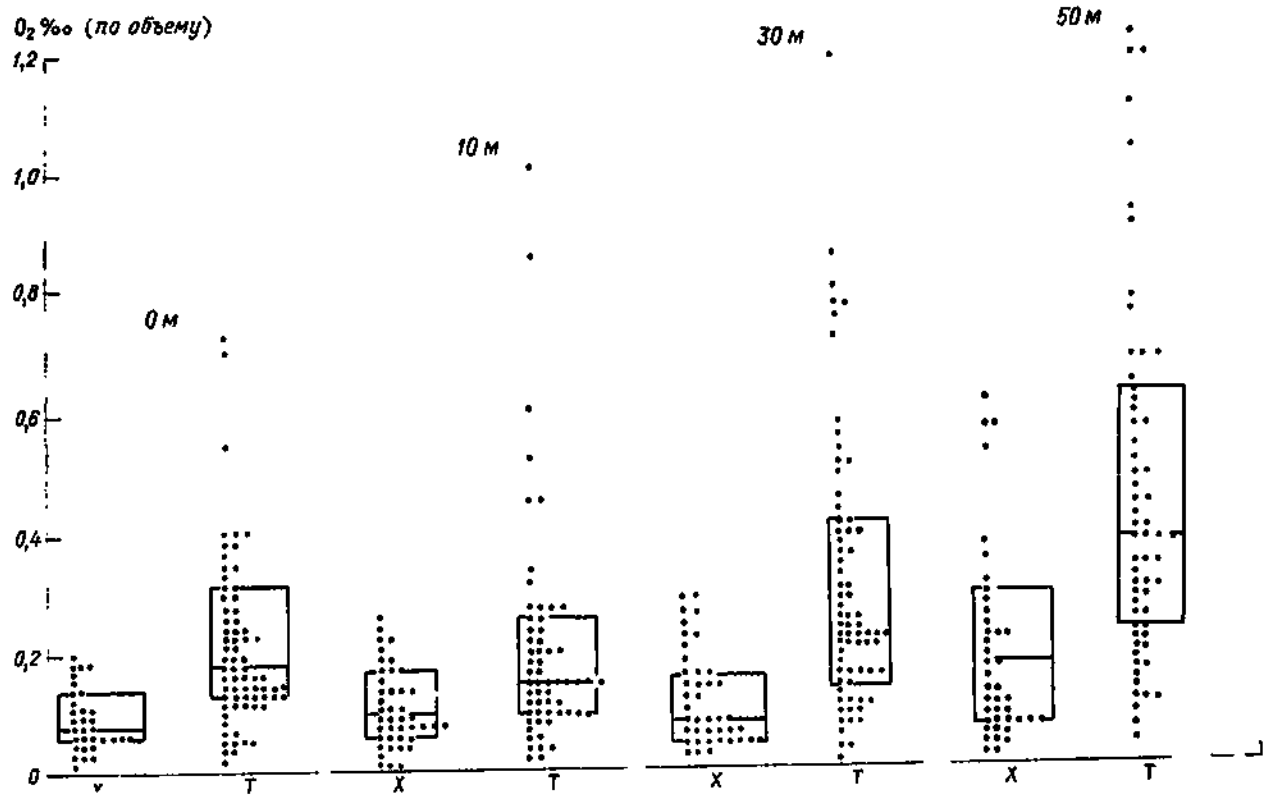


Рис. 12.17. Размах короткопериодных изменений концентраций кислорода на различных глубинах верхнего слоя Готландской впадины для холодного (X) и теплого (T) периодов года по объединенным данным срочных наблюдений многосуточных серий 1969—1970 гг.

программе Международного года Балтики (1969—1970 гг.) [291]. Данные наблюдений за соленостью и кислородом, представленные на рис. 12.28, почти полностью (пропущено лишь несколько съемок) позволяют проследить все этапы продвижения в море притока каттегатских вод объемом около 30 км³ с соленостью свыше 20‰ через Датские проливы в течение 29 января—3 февраля 1969 г. [386].

Продвижение притока в море происходило одновременно в виде придонного течения вод высокой солености и адвекции по активному глубинному слою. Исходная ситуация, представленная данными январской экспедиции, отражает распределение кислорода и сероводорода в развитых анаэробных условиях, наблюдавшихся в 1968 г. во всех глубоководных впадинах. Лишь в Борнхольмской впадине условия изменились вследствие небольшого притока в ноябре—декабре 1968 г. Все изменения, характерные для обновления глубинного слоя, отмеченные выше, можно обнаружить на представленных графиках с учетом основных этапов:

1) февраль—начало марта 1969 г. — обновление вод в Борнхольмском бассейне;

2) март—начало мая 1969 г. — поступление вод в юго-восточную часть Готландской котловины;

3) сентябрь 1969 г. — начало поступления притока в Готландскую впадину, вытеснение «старых» вод в северо-восточные районы;

4) октябрь 1969 г. — заполнение Готландской впадины и изменение стратификации ее вод;

5) декабрь 1969 г. — обновление вод в северной части Центральной Балтики;

6) январь 1970 г. — начало обновления вод Ландсортской впадины и Западной Готландской котловины;

7) март 1970 г. — новое обновление вод Арконского и Борнхольмского бассейнов;

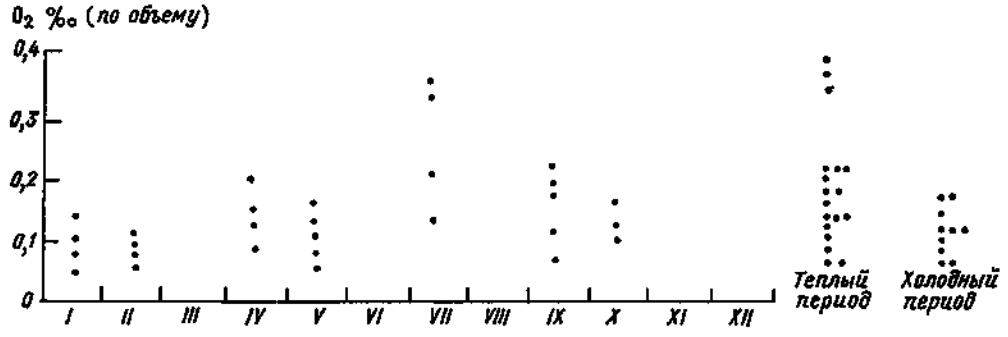


Рис. 12.18. Размах внутрисуточных изменений концентраций кислорода поверхностных вод Готландской впадины по данным срочных наблюдений многосуточных серий 1969—1970 гг.

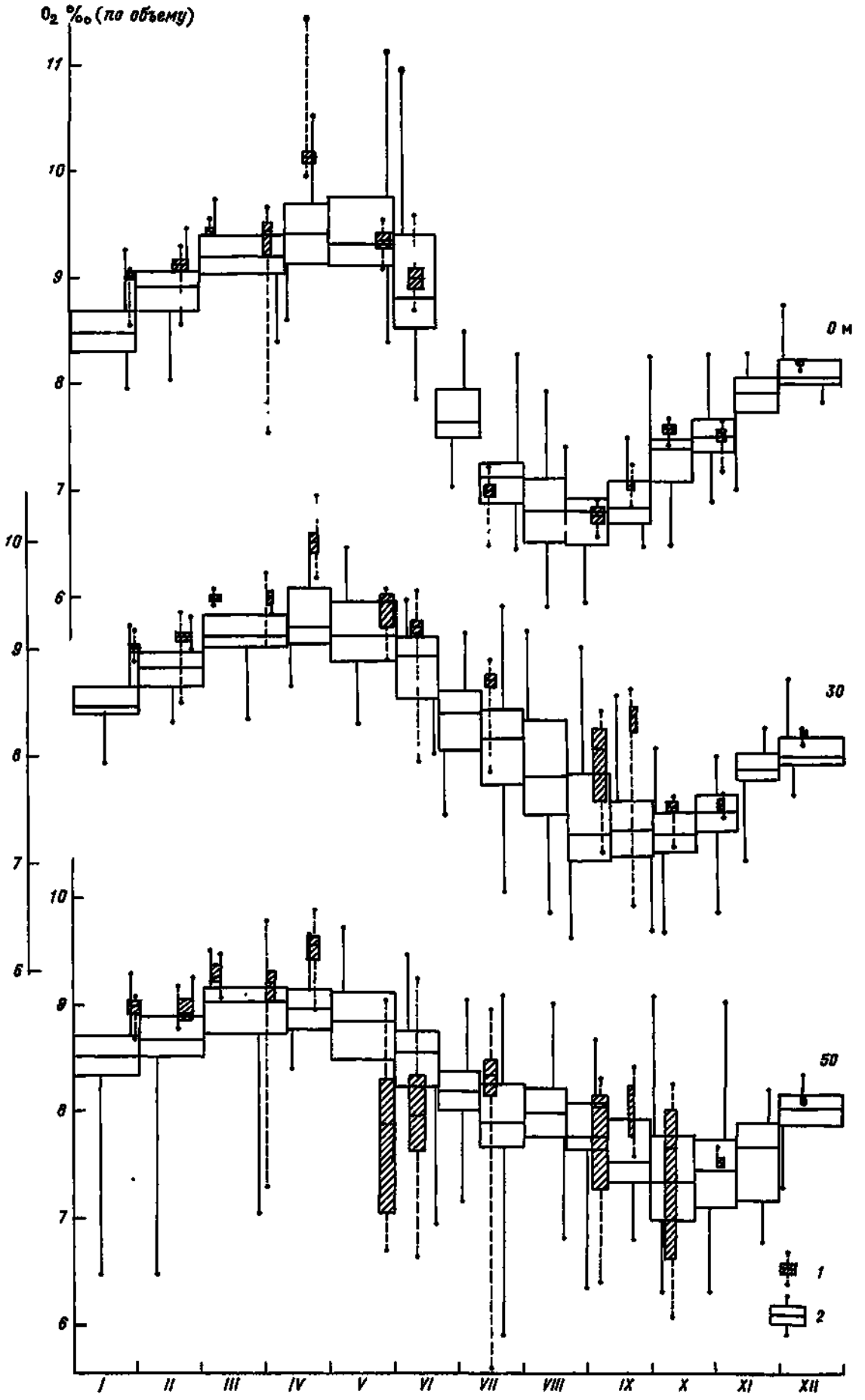


Рис. 12.19. Годовой ход концентраций кислорода на различных глубинах верхнего слоя Готландской впадины по данным квартильного анализа для серий многосуточных наблюдений 1969 г. (*1*) и по многолетним выборкам (*2*).

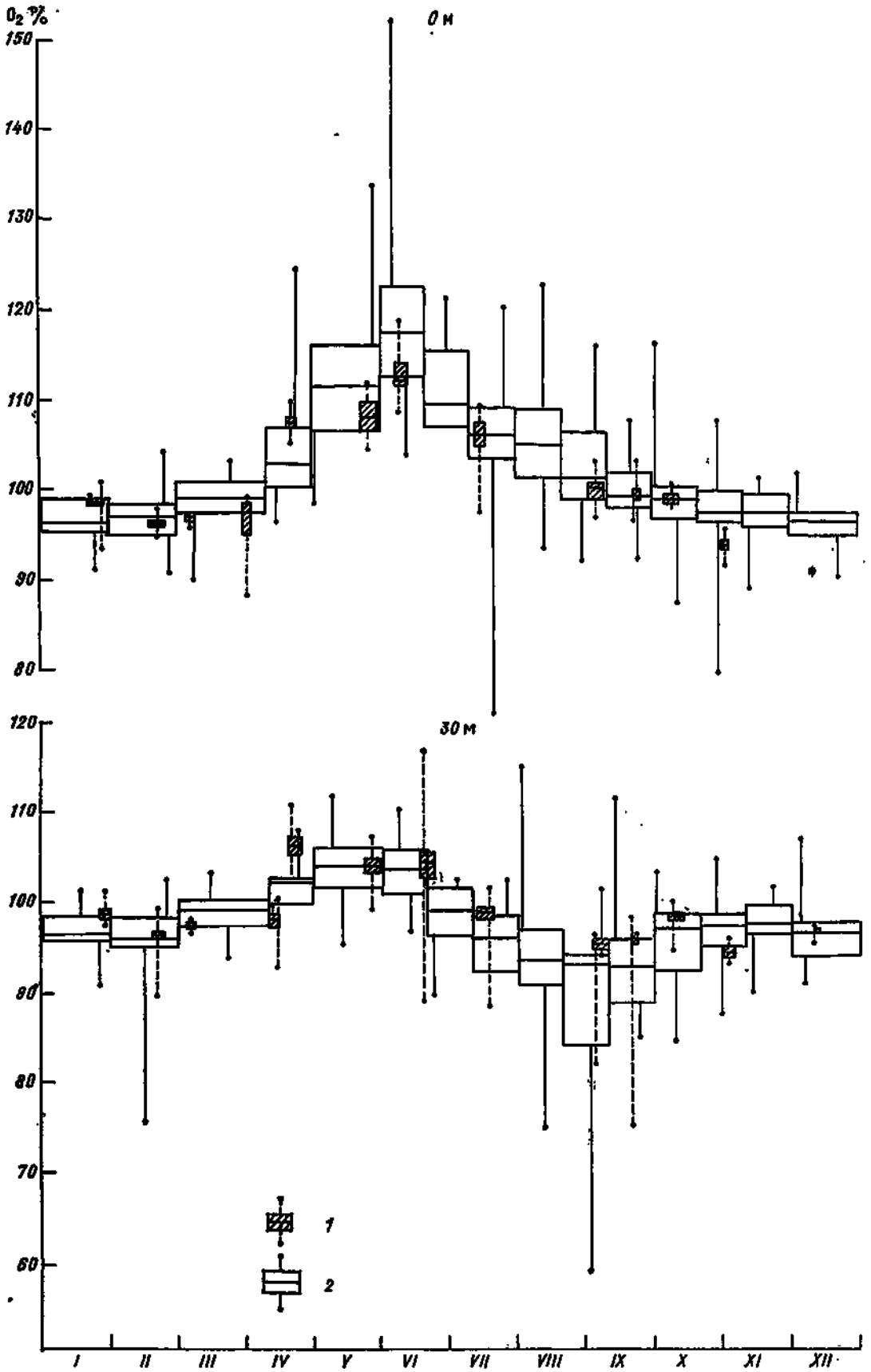
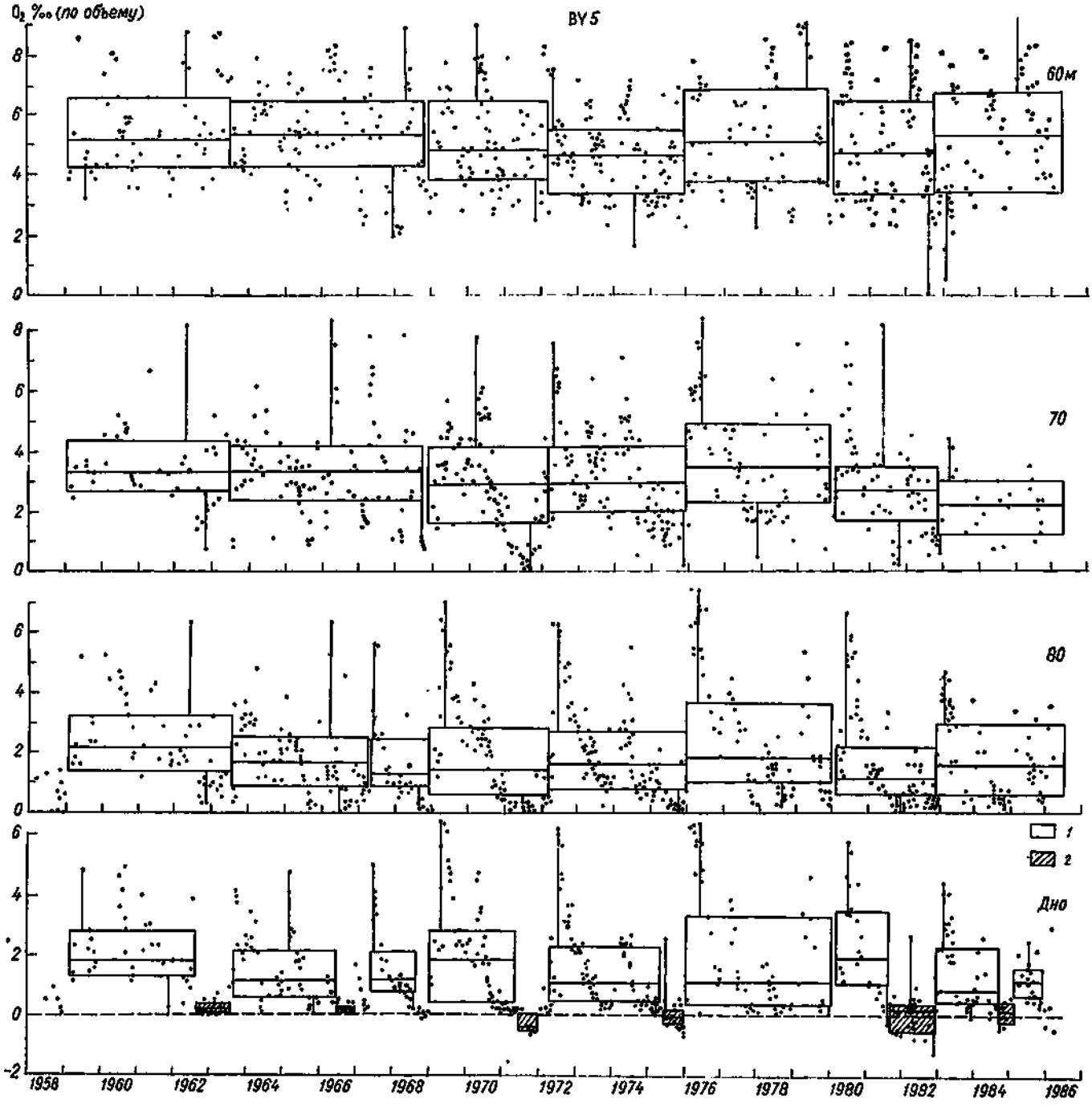


Рис. 12.20. Годовой ход насыщения кислородом поверхностных вод Готландской впадины по данным квартильного анализа для серий срочных многосуточных наблюдений 1969 г. (*1*) и по многолетним выборкам (*2*).



8) май 1970 г. — поступление нового притока в юго-восточную часть Готландской котловины и окончание перестройки стратификации в Ландсортской впадине;

9) август 1970 г. — возобновление притока в Западную Балтику — аэрация Борнхольмского бассейна;

10) декабрь 1970 г. — конец обновлений, анаэробные условия в Западной Балтике сохраняются.

Представляют интерес разнообразные эффекты, сопровождающие распространение притока и перестройку структуры водных масс, — подъемы и опускания вод, линзы аэрированных вод среди «старых» и, наоборот, сероводородные пятна среди кислородсодержащих вод, сложная слоистая структура.

12.2.3. Многолетние изменения кислородных условий

Ввиду большой изменчивости концентраций кислорода в глубинных водах, рассмотренной выше, и трудностей использования статистических характеристик (см. п. 10.3.3) в качестве обобщенного показателя состояния кислородных условий у дна обычно используются размеры площадей зон с критическими для жизни донной фауны концентрациями (менее 2‰) и с анаэробными условиями (рис. 12.29 и 12.30).

Площадь зон, пригодных для жизни бентической фауны, в Центральной Балтике не уменьшилась, а в юго-западной части моря условия ухудшились — в Борнхольмской впадине в период 1975—1987 гг. сероводород у дна обнаруживался в восьми годах,

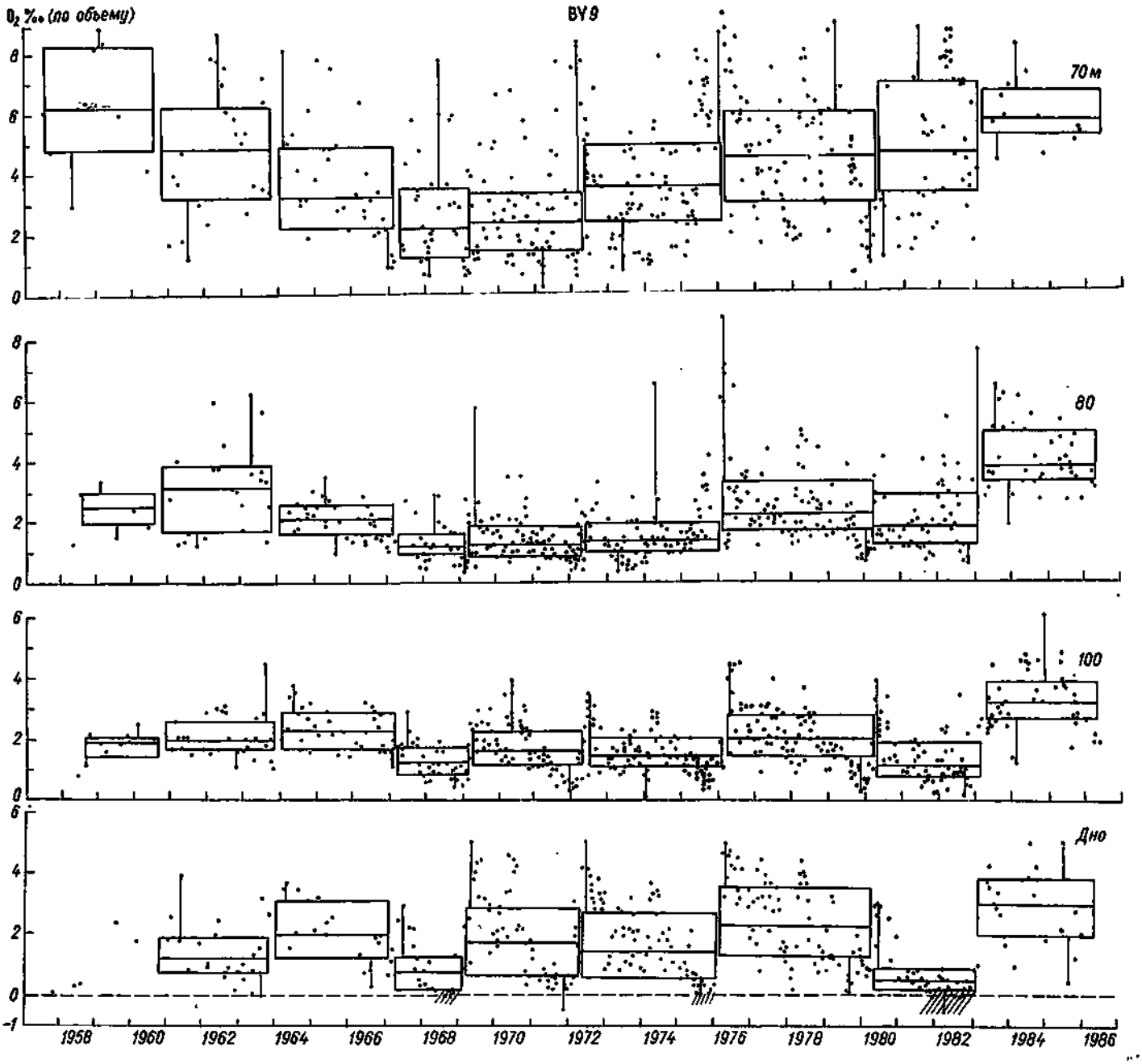


Рис. 12.21. Квартильные оценки концентраций кислорода в глубинном слое Борнхольмской впадины (ст. BY 5) и юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9).

тогда как в течение 1963—1974 гг. — лишь в четырех. Но и в хорошо аэрируемом Арконском бассейне в последние годы несколько раз наблюдались критические концентрации кислорода у дна — менее 2‰, хотя до 1980 г. такие случаи не отмечались [123].

Линейные тренды, рассчитанные в [411] для придонного слоя всех глубоководных впадин Балтийского моря (рис. 12.31—12.34), показали ухудшение кислородных условий в придонном слое Арконского и Борнхольмского бассейнов, а также Готландской впадины. В юго-восточной части Готландской котловины, в северной части моря и в Ландсортской впадине тренды не обнаружены, а в Западной Готландской котловине отмечается повышение содержания кислорода в течение 1965—1988 гг.

В качестве причин ухудшения кислородных условий в указанных выше районах называется длительный период стагнации, обусловленный отсутствием эффективных обновлений глубинных вод и увеличением эвтрофирования в верхнем слое [411]. Улучшение кислородных условий в промежуточном слое центральной и северной частей моря связывается с улучшением аэрации за счет притоков по активному глубинному слою, с увеличением вертикального переноса кислорода из верхнего слоя через галоклин благодаря уменьшению вертикальных градиентов солености и с значительным заглублением галоклина.

Необходимо, однако, отметить, что использование линейной аппроксимации тренда для коротких рядов данных со сложным характером квазипериодической межгодовой изменчивости и с внутригодовыми колебаниями может оказаться формальным приемом, неадекватным реальному характеру многолетней изменчивости. Для избежания такого ре-

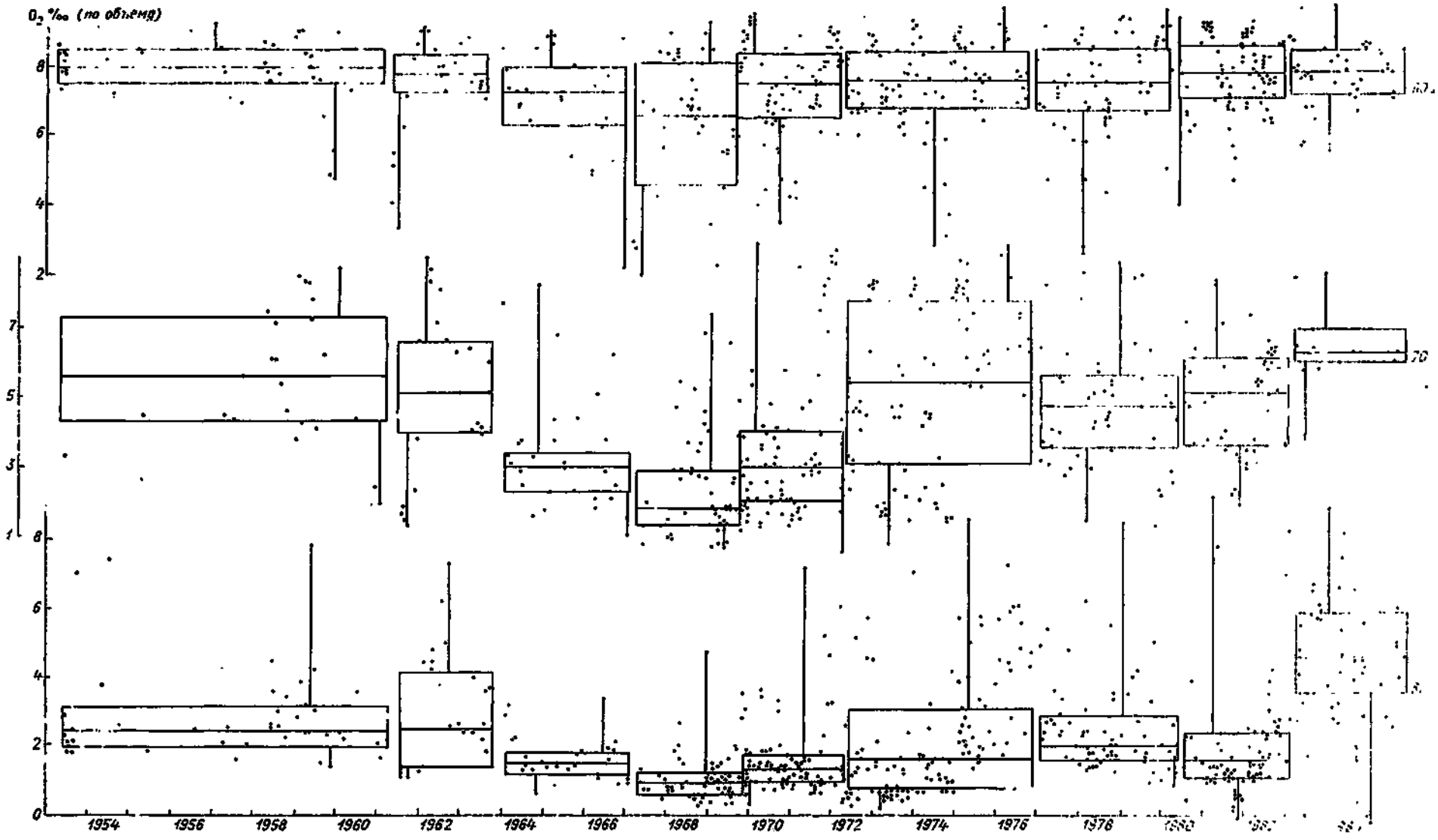


Рис. 12.22. Квартильные оценки концентраций кислорода (*1*) и сероводорода (*2*) в галоклине и глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 16).

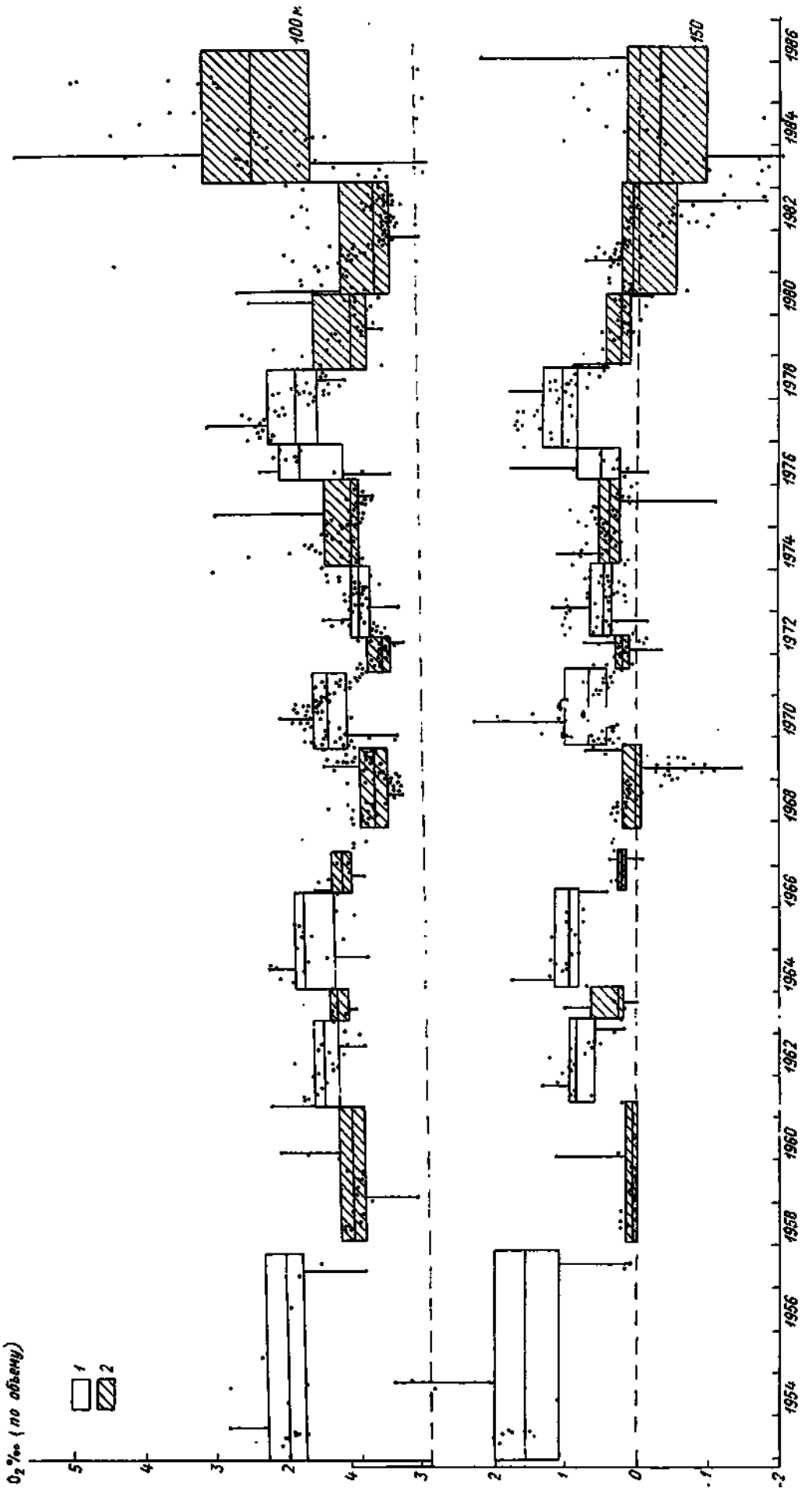

100 м
150
1954
1956
1958
1960
1962
1964
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1984
1986
1
2
O_2 ‰ (по объему)

Рис. 12.22.

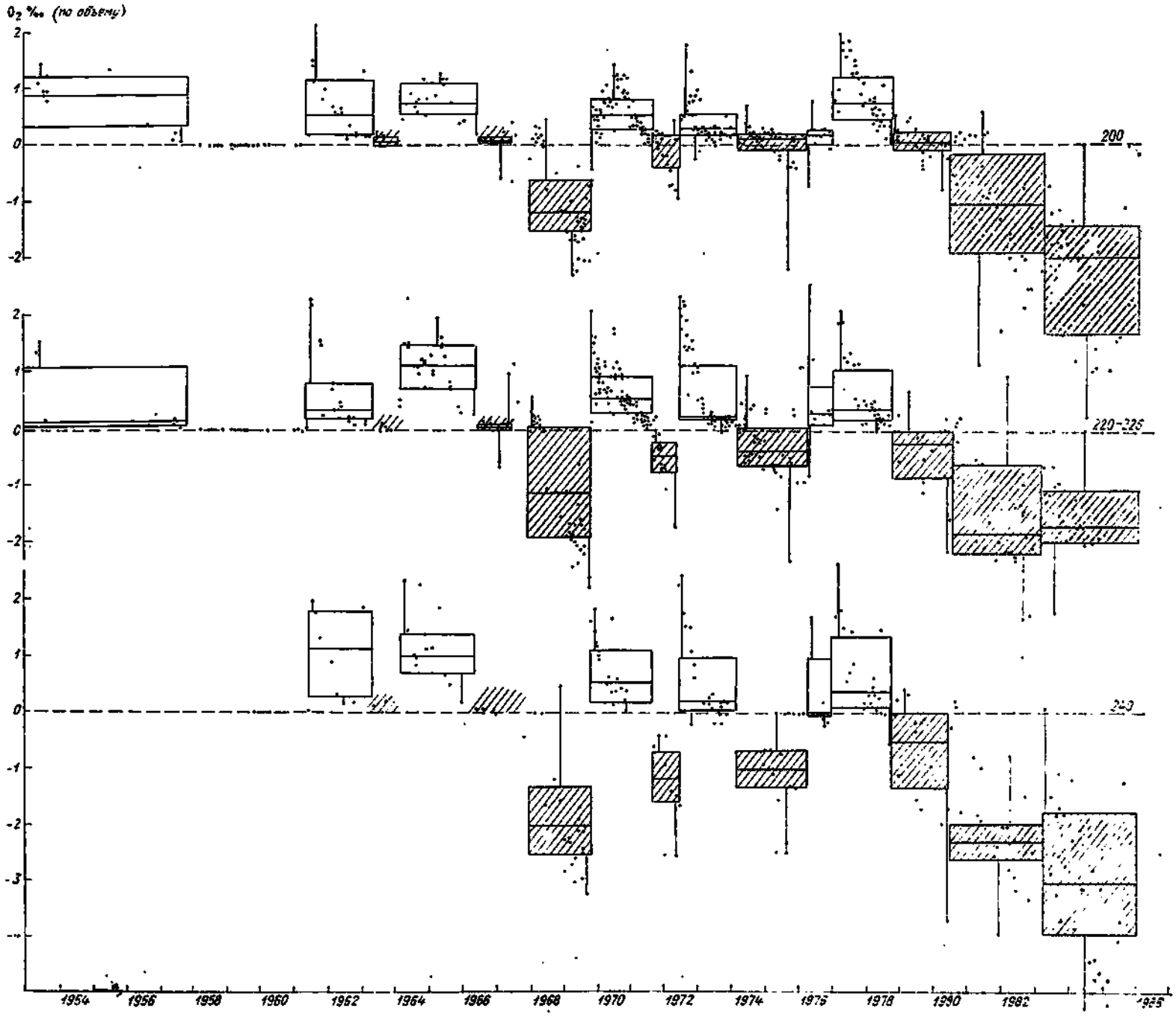

O_2 ‰ (по объему)
200
220-225
240
1954
1956
1958
1960
1962
1964
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1985

Рис. 12.22.

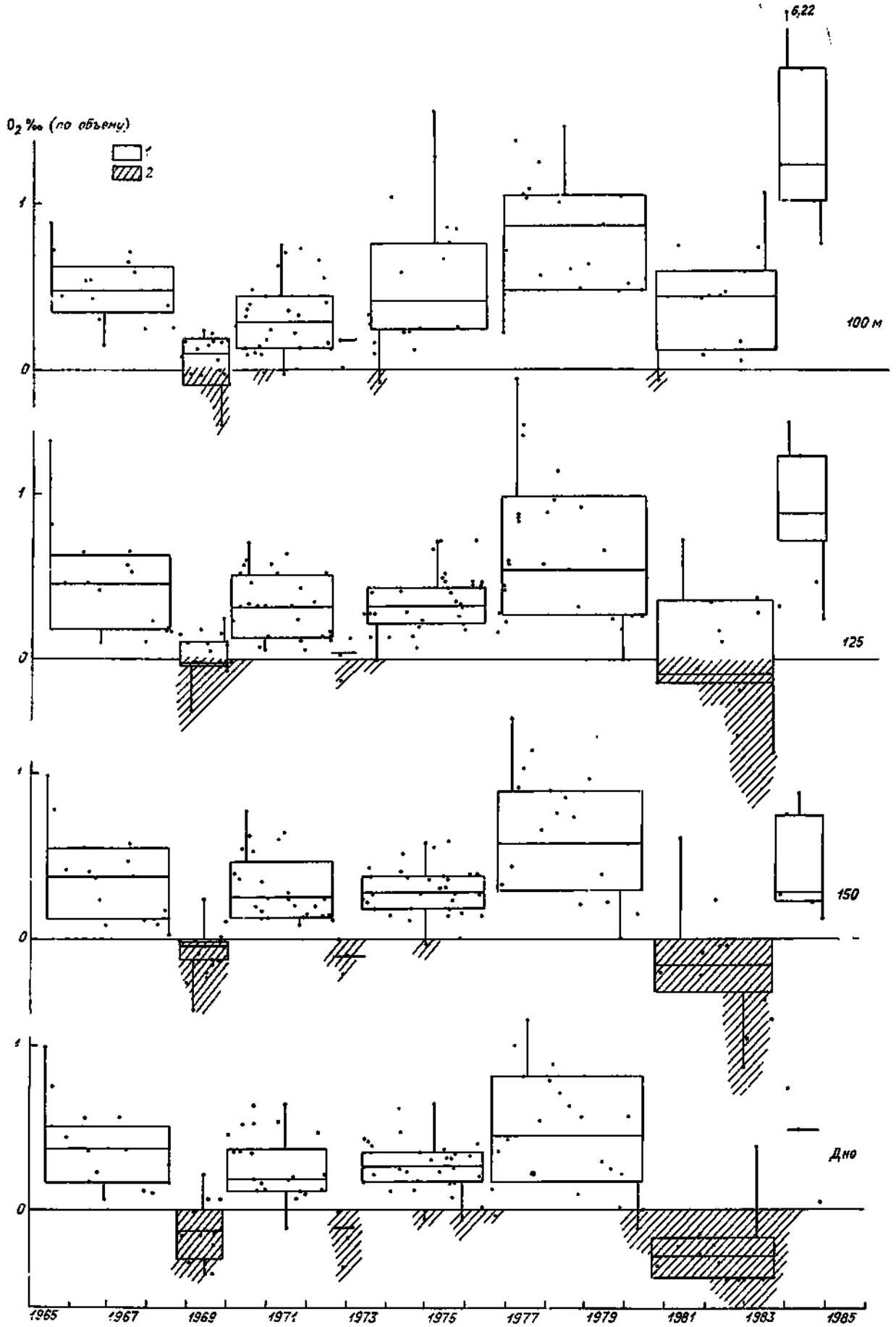


Рис. 12.23. Квартильные оценки концентраций кислорода (*1*) и сероводорода (*2*) в глубинном слое северной части моря (ст. BY 29).

Таблица 12.3

Многолетние статистические характеристики концентраций кислорода и сероводорода (отрицательные значения) (‰ по объему) в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	$\bar{x}$	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	$\bar{x}$	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
Ст. BY 5														
60	5,2	0,5	3,9	5,1	6,5	9,3	485	4,8	0,0	3,6	4,7	6,0	8,7	117
70	3,3	0,3	2,2	3,3	4,3	8,4	415	1,7	0,1	0,8	1,6	2,7	5,2	101
80	2,0	0,0	1,1	1,9	3,0	7,7	492	0,4	—0,8	0,2	0,4	0,7	4,6	122
Дно	1,3	—0,6	0,5	1,2	2,4	7,5	450	0,1	—2,4	—0,3	0,1	0,3	3,0	106
Ст. BY 15														
80	1,8	0,3	1,3	1,7	2,5	8,5	227	2,0	—0,2	1,1	1,8	3,2	9,2	344
90	1,4	0,3	1,1	1,4	1,8	7,1	225	1,3	—0,2	0,8	1,1	2,0	8,3	342
100	1,4	0,3	1,0	1,4	1,7	6,8	224	1,0	—0,2	0,6	0,9	1,4	8,3	350
125	1,3	—0,1	1,0	1,3	1,5	6,9	168	0,6	—1,2	0,3	0,6	0,9	2,6	223
150	0,9	—0,2	0,5	0,9	1,1	10,3	218	0,2	—2,0	—0,1	0,2	0,3	6,3	294
175	0,5	—0,4	0,2	0,5	0,8	2,8	164	—0,1	—2,4	—0,7	0,0	0,2	1,3	173
200	0,6	—2,5	0,3	0,6	0,9	2,1	214	—0,4	—4,8	—1,3	—0,1	0,1	0,7	250
225	0,6	0,0	0,2	0,5	1,1	2,3	246	—0,6	—3,3	—1,3	—0,5	0,0	1,2	253
Дно	0,6	—0,5	0,2	0,5	1,2	2,6	97	—1,6	—5,2	—2,5	—1,6	—0,5	1,7	128
Ст. BY 29														
80	1,4	0,2	0,7	1,2	2,7	8,7	111	1,1	—0,3	0,3	0,8	2,5	5,1	30
100	0,5	—0,1	0,2	0,5	0,8	6,2	111	0,2	—0,5	0,1	0,2	0,4	1,1	30
125	0,4	0,0	0,2	0,4	0,6	1,7	110	0,0	—0,6	—0,1	0,0	0,1	0,7	29
150	0,3	—0,1	0,2	0,3	0,5	1,3	109	—0,1	—0,8	—0,2	—0,1	0,0	0,6	28
Дно	0,3	—0,4	0,1	0,3	0,5	1,2	107	—0,3	—1,6	—0,4	—0,3	—0,1	0,2	29

Таблица 12.4

Статистические характеристики концентраций кислорода (‰ по объему) в глубинном слое

Горизонт, м	$\bar{x}$	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
Ст. BY 5, 1958—1985 гг.							
60	5,1	0,5	3,8	5,0	6,5	9,3	614
70	2,9	0,05	1,8	2,9	4,0	8,3	531
80	1,5	—0,8	0,6	1,4	2,6	7,7	627
Дно	1,1	—2,4	0,3	0,9	2,2	6,5	568
Ст. BY 9, 1958—1985 гг.							
60	7,4	0,9	6,3	7,5	8,2	9,9	518
70	3,7	0,2	2,2	3,5	5,5	9,9	471
80	1,9	0,3	1,2	1,8	2,9	8,7	532
90	1,7	0,2	1,1	1,7	2,4	8,7	530
100	1,8	0	1,3	1,7	2,5	6,2	532
Дно	1,7	—0,5	0,6	1,6	2,9	5,1	402
Ст. BY 15, 1958—1986 гг.							
60	7,5	1,9	6,7	7,5	8,3	9,6	550
70	4,2	0,5	2,3	4,1	6,2	9,4	434
80	1,8	—0,2	1,1	1,7	2,8	9,2	585
90	1,3	—0,2	0,9	1,3	1,9	8,3	581
100	1,1	—0,2	0,7	1,1	1,6	8,3	587
125	0,9	—1,2	0,5	0,9	1,3	3,9	399
150	0,4	—2,0	0,1	0,3	0,8	3,8	525
175	0,2	—2,4	—0,04	0,2	0,5	2,8	344
200	0,1	—4,8	—0,2	0,2	0,5	2,1	477
220	0	—3,3	—0,5	0,1	0,5	2,3	512
Дно	—0,3	—5,2	—1,8	0	0,4	2,6	232
Ст. BY 29, 1964—1984 гг.							
60	6,8	1,2	5,8	7,5	8,3	9,7	143
70	4,2	0,2	1,9	4,0	6,4	9,1	139
80	1,8	—0,3	0,6	1,2	2,5	8,7	141
90	1,1	—0,1	0,4	0,8	1,6	7,2	86
100	0,5	—0,5	0,2	0,4	0,7	6,2	140
125	0,3	—0,6	0,1	0,3	0,5	1,7	139
150	0,3	—0,8	0,1	0,2	0,4	1,3	138
Дно	0,2	—1,6	0	0,2	0,4	1,2	136

Таблица 12.5

Статистические характеристики процентного содержания кислорода в глубинном слое

Горизонт, м	$\bar{x}$	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
Ст. BY 5, 1958—1985 гг.							
60	62	7	48	62	76	102	607
70	38	1	24	38	51	96	527
80	20	0	9	19	34	93	613
Дно	14	0	4	12	28	90	547
Ст. BY 9, 1958—1985 гг.							
60	83	11	71	84	92	109	516
70	43	7	26	41	63	109	470
80	23	4	14	22	34	96	531
90	20	3	13	20	28	97	530
100	21	0	14	20	30	74	531
Дно	20	0	8	19	35	61	392
Ст. BY 15, 1958—1986 гг.							
60	84	22	75	84	94	107	542
70	47	6	27	47	69	104	427
80	23	3	14	21	85	102	578
90	16	3	11	15	23	99	572
100	13	1	9	13	19	97	578
125	11	1	7	11	16	47	393
150	6	0	2	5	11	45	496
175	3	0	1	3	7	34	311
200	3	0	1	2	7	26	427
220	3	0	0	2	7	28	448
Дно	3	0	0	2	9	34	177
Ст. BY 29, 1959—1984 гг.							
60	77	14	65	84	93	106	143
70	48	3	22	45	72	100	138
80	21	0	7	13	29	101	141
90	13	0,5	4	10	19	82	85
100	6	0	2	5	9	72	139
125	5	—	2	4	6	21	132
150	4	—	2	3	5	16	125
Дно	3	—	1	3	5	14	117

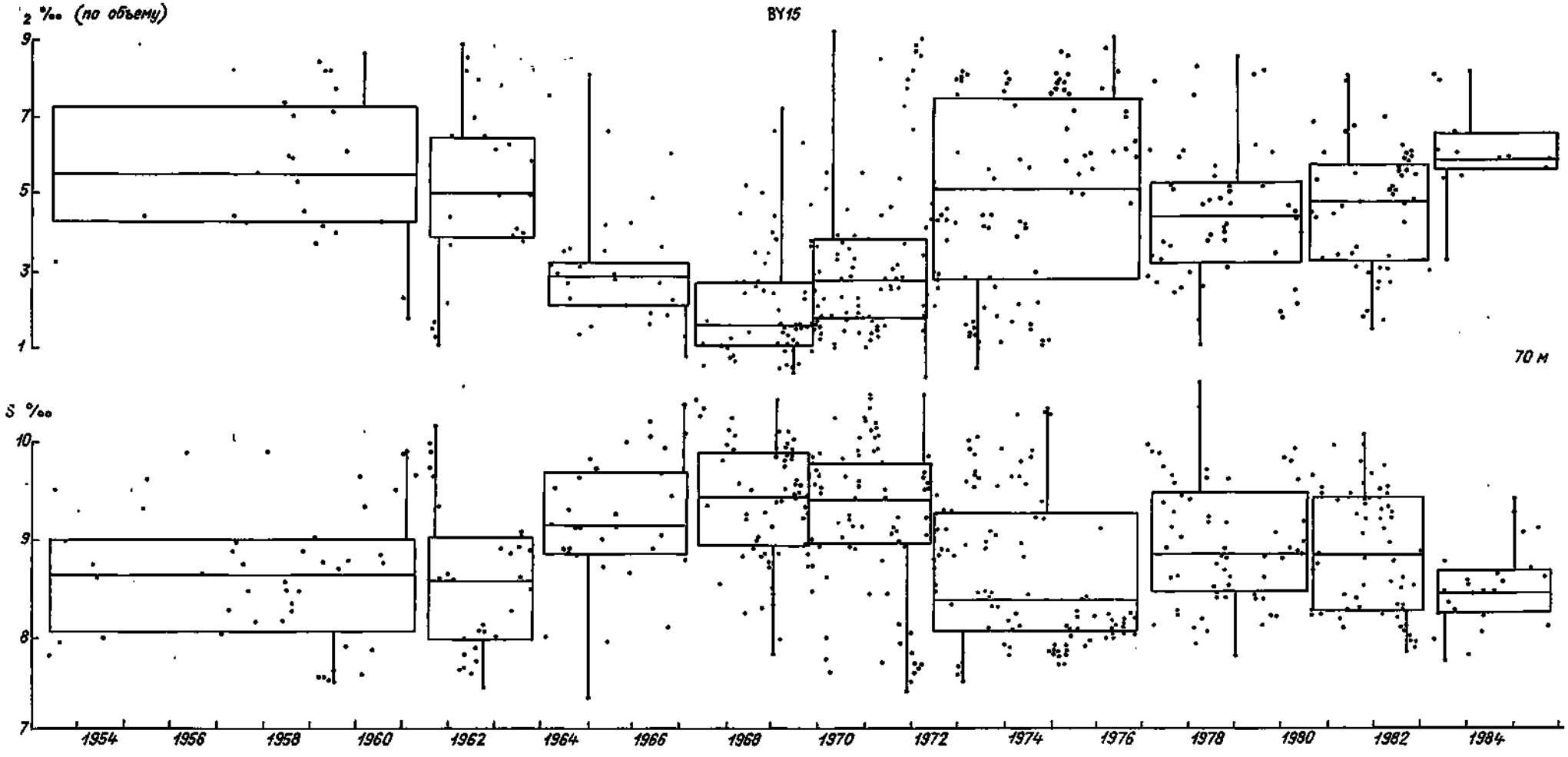


Рис. 12.24. Квартильные оценки концентраций кислорода и солености в галоклине Готландской впадины (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29).

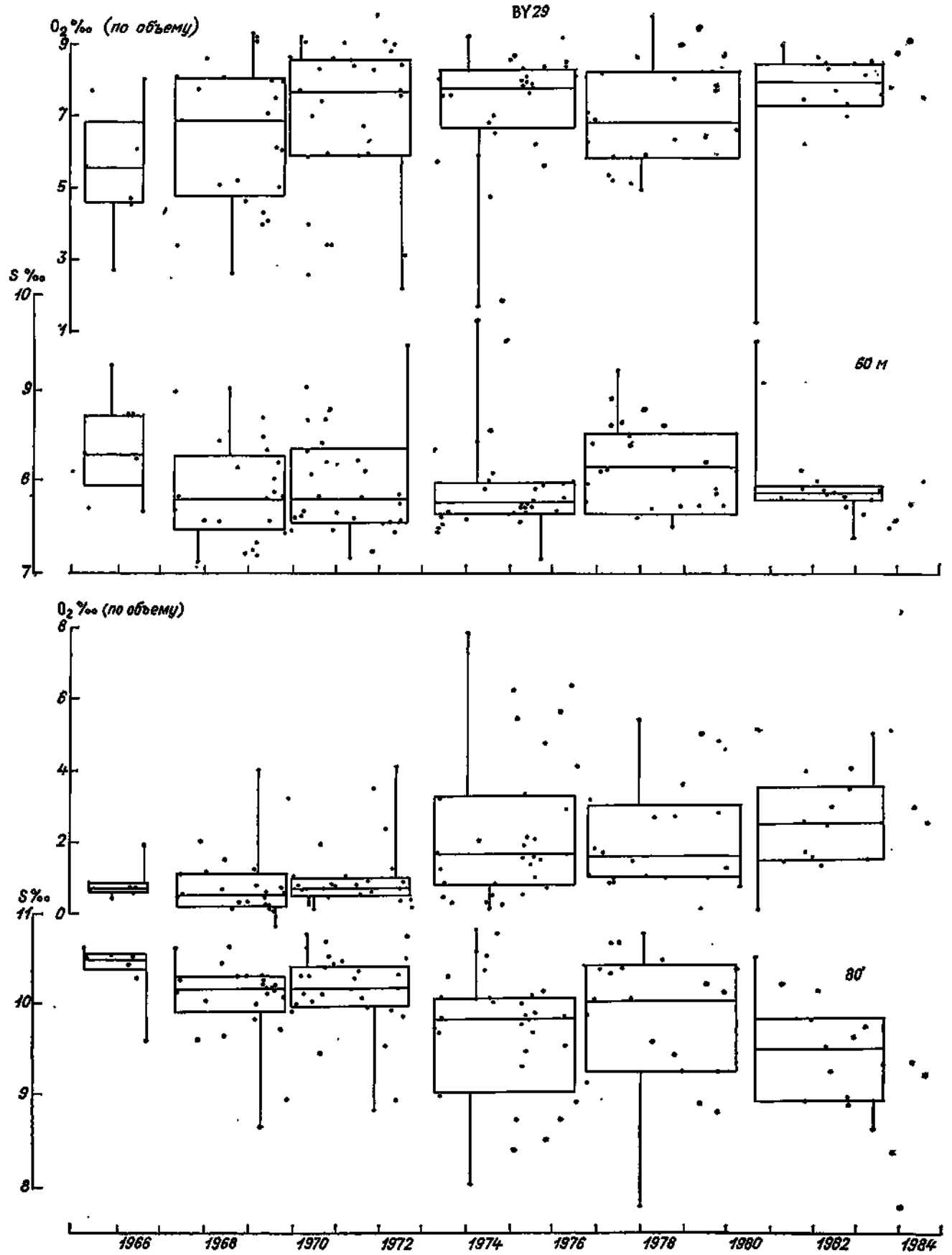


Рис. 12.24. Квартильные оценки концентраций кислорода и солености в галоклине Готландской впадины (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29).

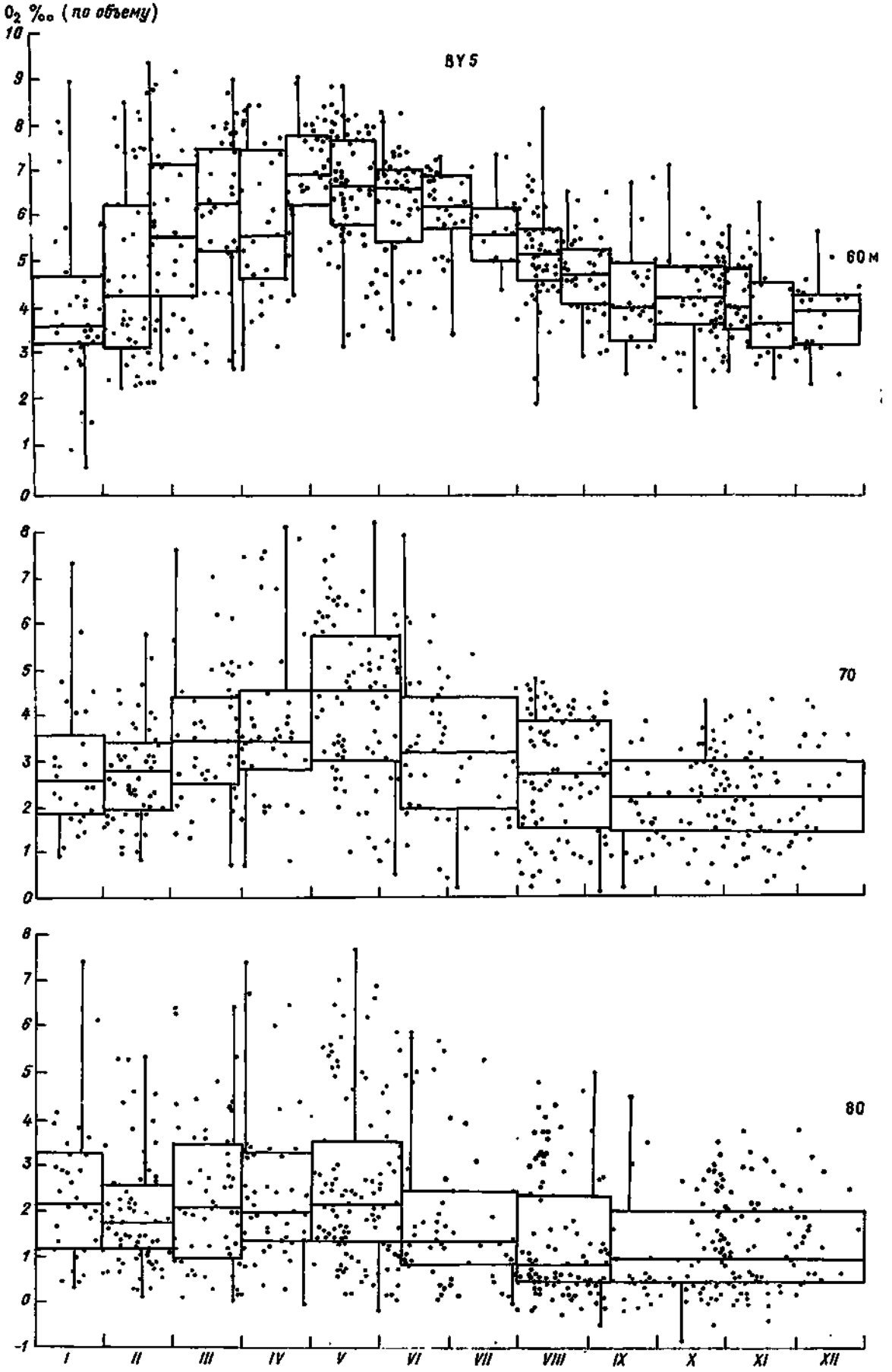


Рис. 12.25. Годовой ход концентраций кислорода в галоклине и глубинном слое Борнхольмской впадины (ст. BY 5), юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), Готландской впадины (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29) по данным квартильного анализа.

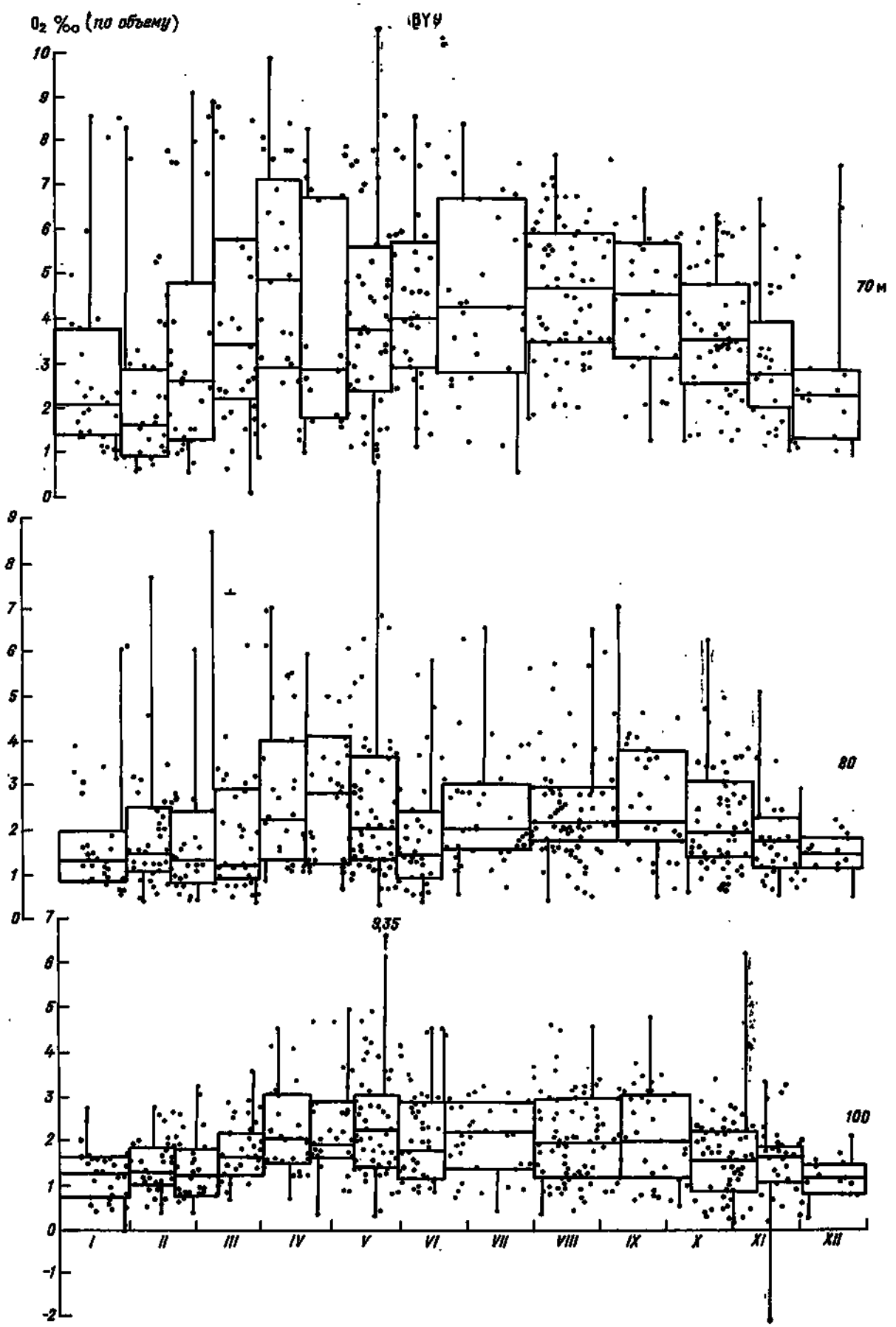


Рис. 12.25.

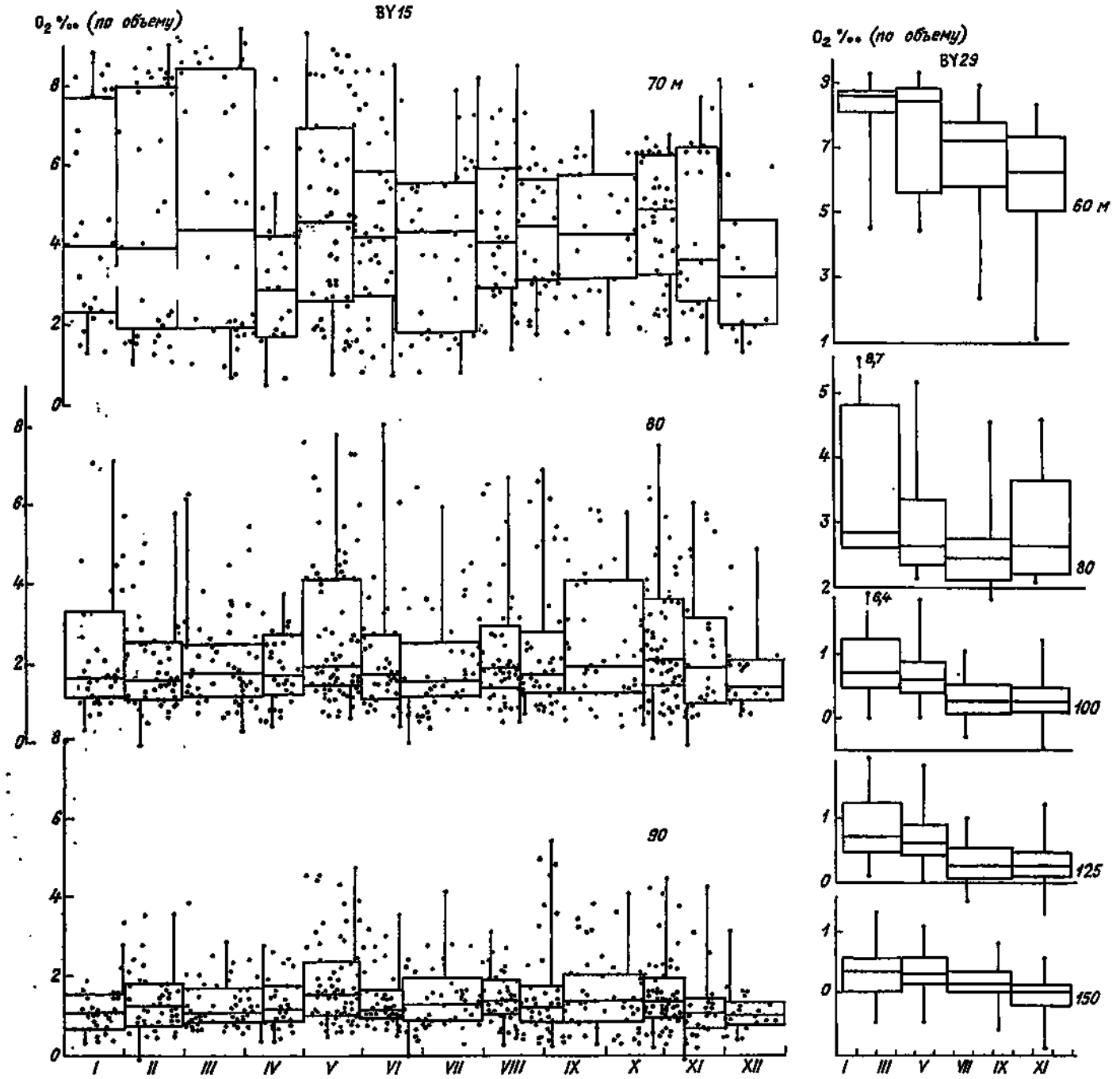

BY15
O_2 ‰ (по объему)
70 м
80
90
I II III IV V VI VII VIII IX X XI XII
BY29
O_2 ‰ (по объему)
60 м
8,7
80
6,4
100
125
150
I III V VII IX XI

Рис. 12.25.

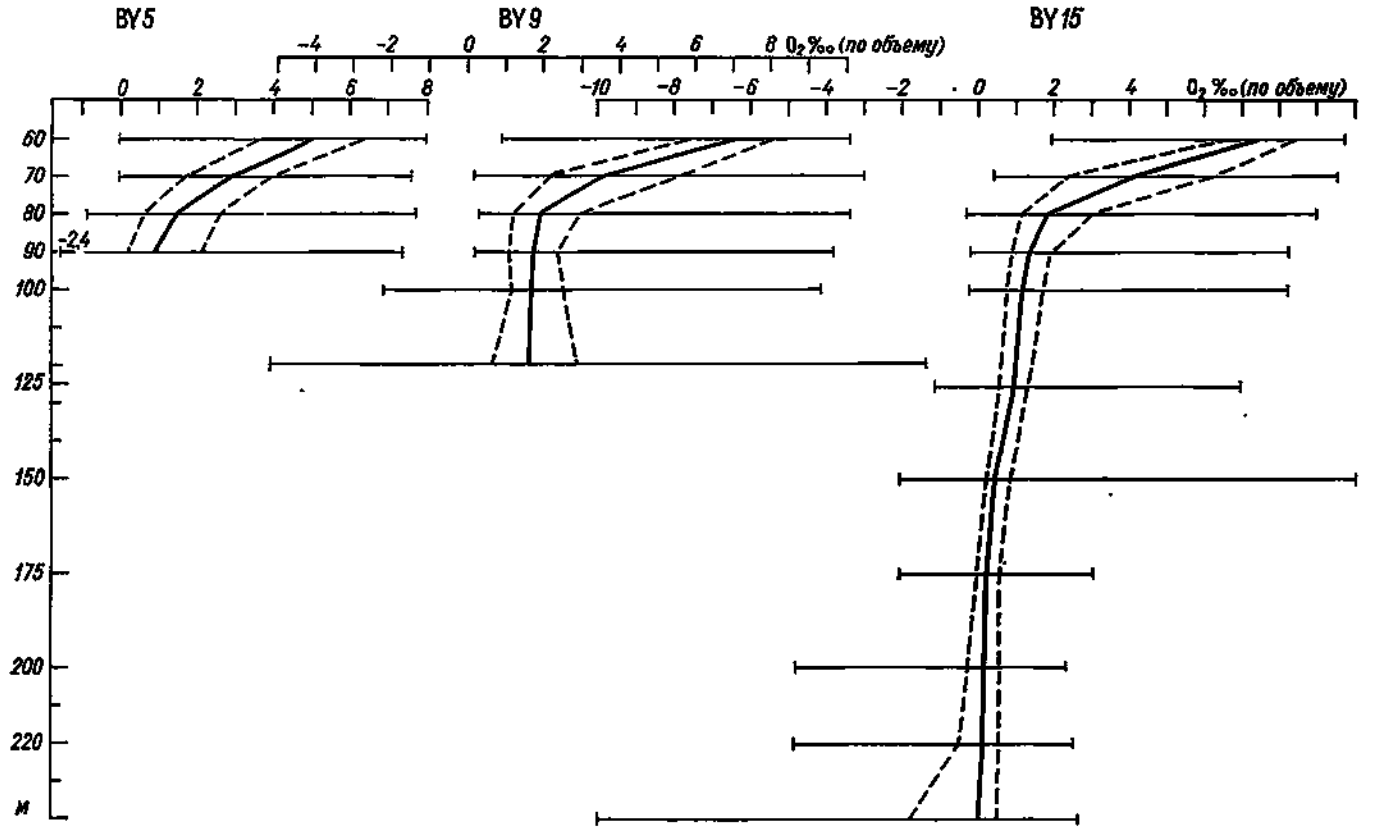


Рис. 12.26. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций кислорода и сероводорода (отрицательные значения) в глубинном слое моря по данным 1958—1986 гг.

зультата необходим ряд математических исследований, кратко указанных в [64], но не выполненных в данном случае.

Внимательное рассмотрение (см. рис. 12.29—12.31) свидетельствует о том, что отрицательные тренды концентраций кислорода в придонном слое Арконского и Борнхольмского бассейнов, а также в Готландской впадине вызваны общим уменьшением пределов разброса данных с 1980 по 1987 г., т. е. в конце исследуемого периода. В предшествующем ряде лет 1965—1979 гг. диапазоны изменений концентраций кислорода в указанных районах сохранялись примерно одинаковыми. Это подтверждают и статистические характеристики циклов межгодовой изменчивости для придонного слоя Борнхольмской и Готландской впадин (см. рис. 12.24).

Такое уточнение весьма существенно для объяснения различий с теми районами, где отрицательные тренды концентраций не обнаружены. Последовательное рассмотрение изменений по циклам межгодовой изменчивости показывает, что после слабых притоков каттегатских вод в конце 1979 г.— начале 1980 г. кислородные условия в течение 1980—1983 гг. ухудшились в придонном слое всех районов моря (см. рис. 12.21—12.23, 12.31—12.33). Различия условий, которые и определили различия трендов, последовали после притока в 1983 г., который в центральной части моря прошел по активному глубинному слою и не затронул придонные, богатые сероводородом воды, но оказался эффективным для аэрации всей толщи глубинных вод в северной части моря и в юго-восточной части Готландской котловины (см. рис. 12.21, 12.22 и 12.24).

На основании анализа этих данных можно выделить три многолетних периода, характеризующих различное состояние кислородных условий в галоклине центральных и северных районов моря: 1) повышенное содержание кислорода в 1958—1963 гг. (возможно, и ранее, что трудно установить из-за малочисленности данных для ст. BY 15 и отсутствия их для ст. BY 29); 2) наименьшие концентрации в течение 1964—1972 гг.; 3) более высокие концентрации в 1972—1986 гг. (период, по-видимому, продолжается далее). В юго-восточной части Готландской котловины в течение первого и последнего периодов четко выражены тенденции соответственно последовательного снижения и возрастания концентраций. Ведущая причина этих изменений состоит в улучшении или ухудшении аэрации промежуточного слоя, которые определяются как условиями адвекции каттегатских вод, так и изменениями вертикального транспорта, связанными со смещениями глубины залегания границ галоклина и с изменениями градиентов солености в нем (рис. 12.35, 12.36, 12.37).

В заключение следует отметить, что существенно лучшие кислородные условия наблюдались в первой половине нашего столетия (рис. 12.38, 12.39) при пониженных температуре (рис. 12.40 *а*) и солености (рис. 12.41 *а*) воды. Поэтому можно ожидать, что развивающиеся в последние годы тенденции как уменьшения солености вод верхнего

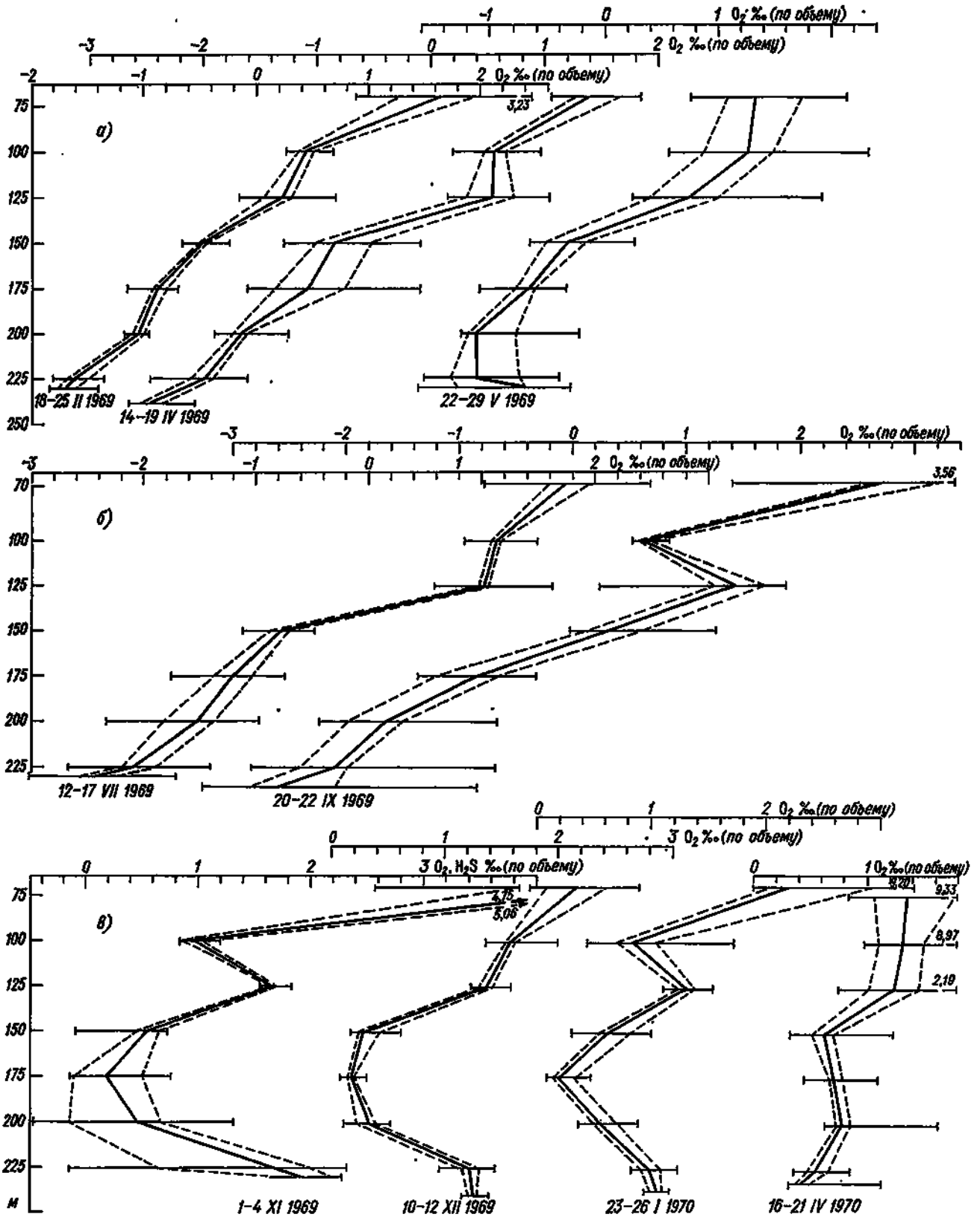


Рис. 12.27. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций кислорода и сероводорода (отрицательные значения) в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) по данным срочных наблюдений многосуточных серий 1969—1970 гг. при различных условиях.

а — стагнационные условия; *б* — начальная фаза поступления каттегатских вод по активному глубинному слою; *в* — период обновления всей толщи глубинного слоя.

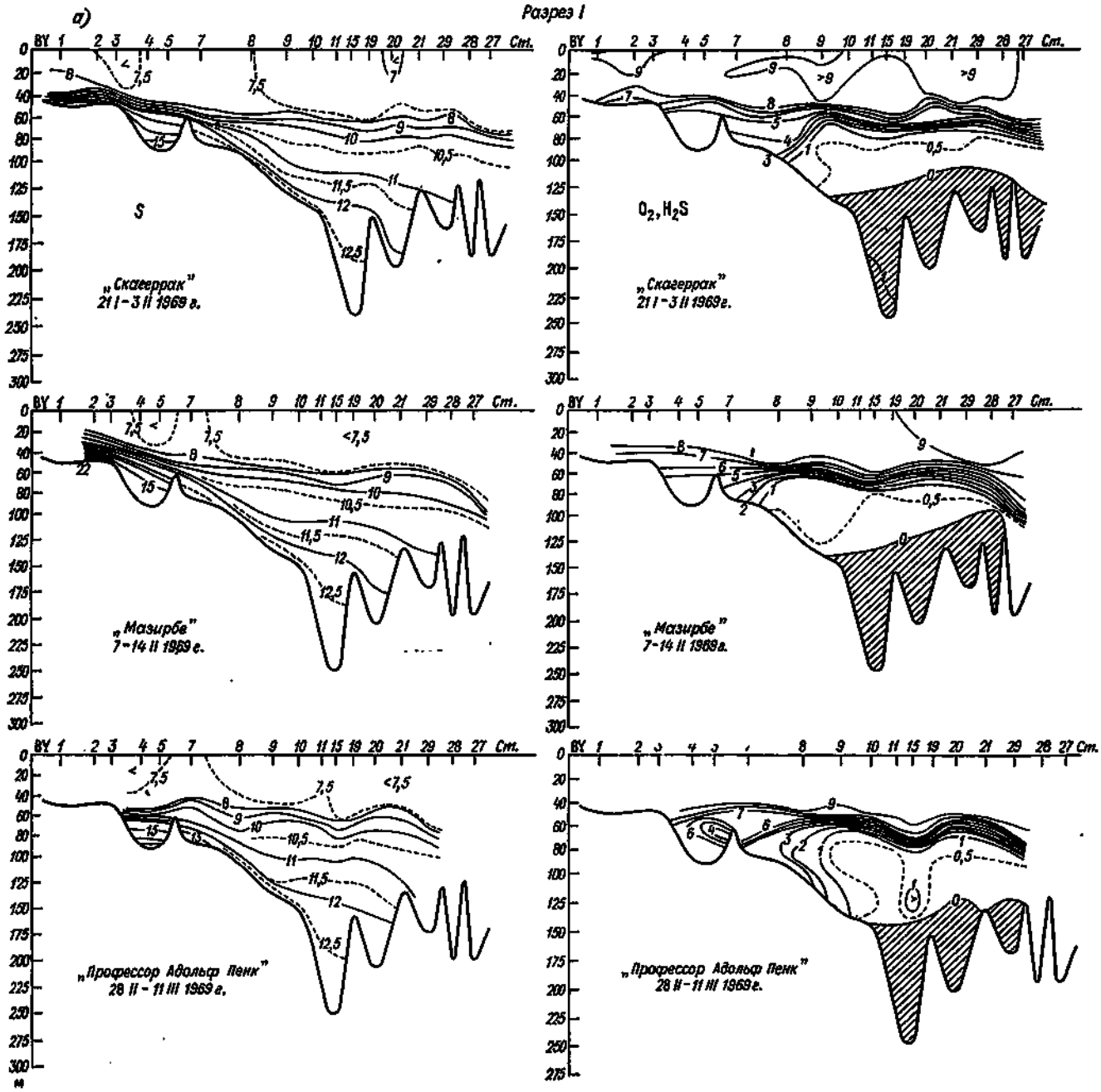


Рис. 12.28. Пространственное распределение солености и концентраций кислорода (*1*) и сероводорода (*2*) на восточном (I) и западном (II) продольных разрезах Балтийского моря (*г*) в течение 1969— 1970 гг. [291].

а) январь—май 1969 г.; *б*) июль—ноябрь 1969 г.; *в*) 1970 г.

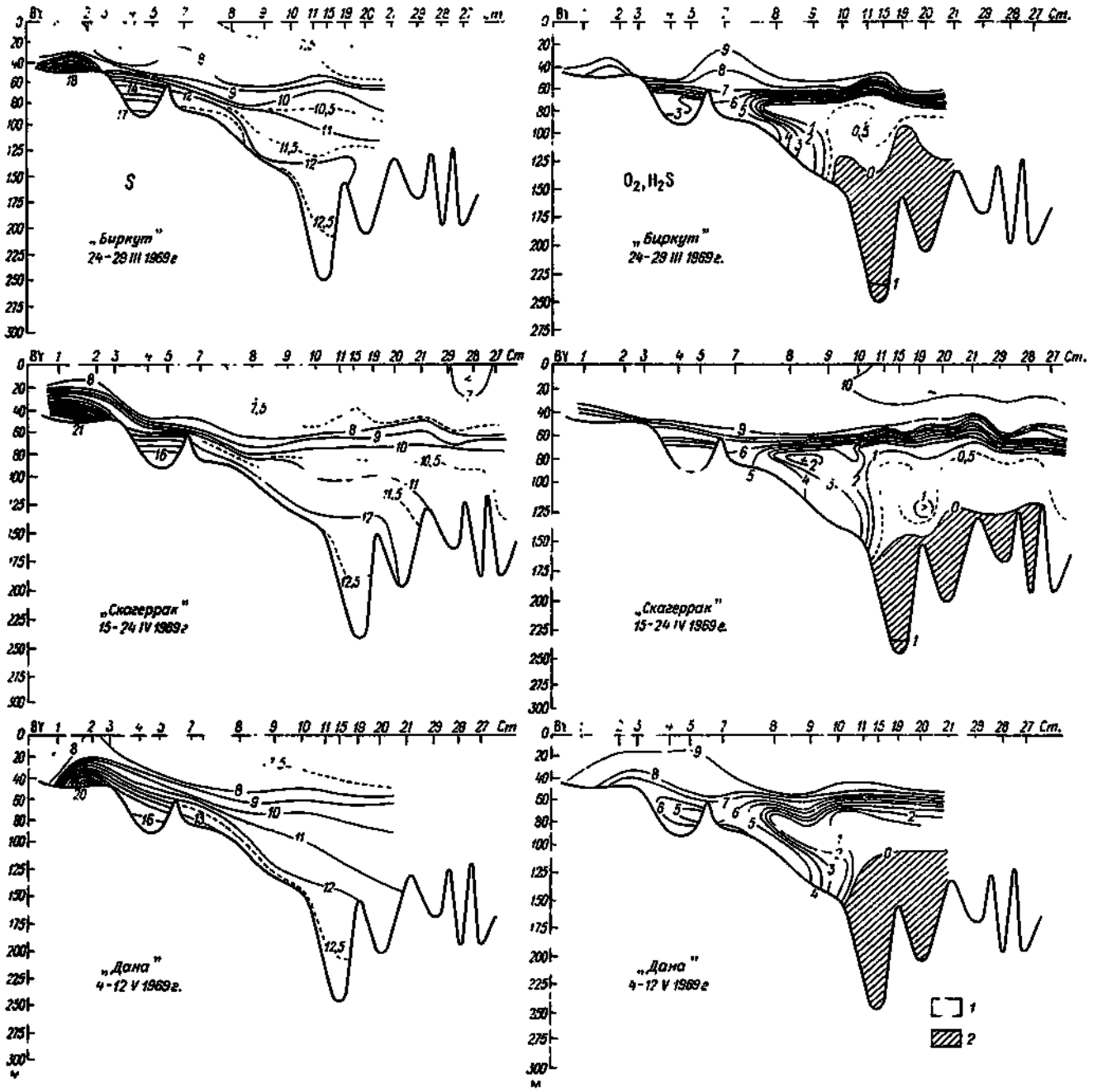

S
„Биркут"
24-28 III 1969 г
O_2, H_2S
„Биркут"
24-28 III 1969 г.
„Скагеррак"
15-24 IV 1969 г
„Скагеррак"
15-24 IV 1969 г.
„Дана"
4-12 V 1969 г.
„Дана"
4-12 V 1969 г
1
2

Рис. 12.28.

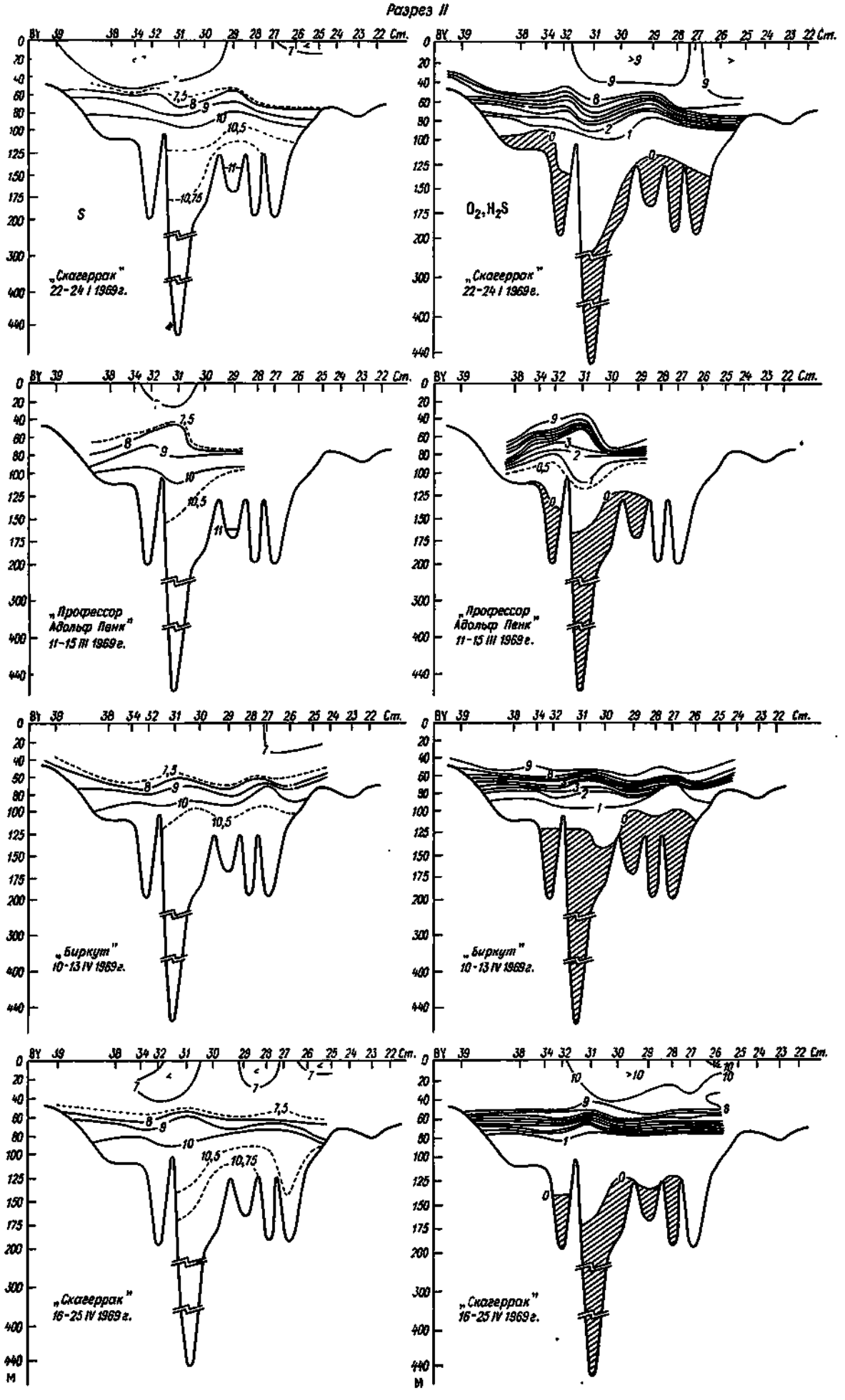

Разрез II
S
„Скагеррак"
22-24 I 1969г.
O_2, H_2S
„Скагеррак"
22-24 I 1969г.
„Профессор Адольф Пенк"
11-15 III 1969г.
„Профессор Адольф Пенк"
11-15 III 1969г.
„Биркут"
10-13 IV 1969г.
„Биркут"
10-13 IV 1969г.
„Скагеррак"
16-25 IV 1969г.
„Скагеррак"
16-25 IV 1969г.

Рис. 12.28.

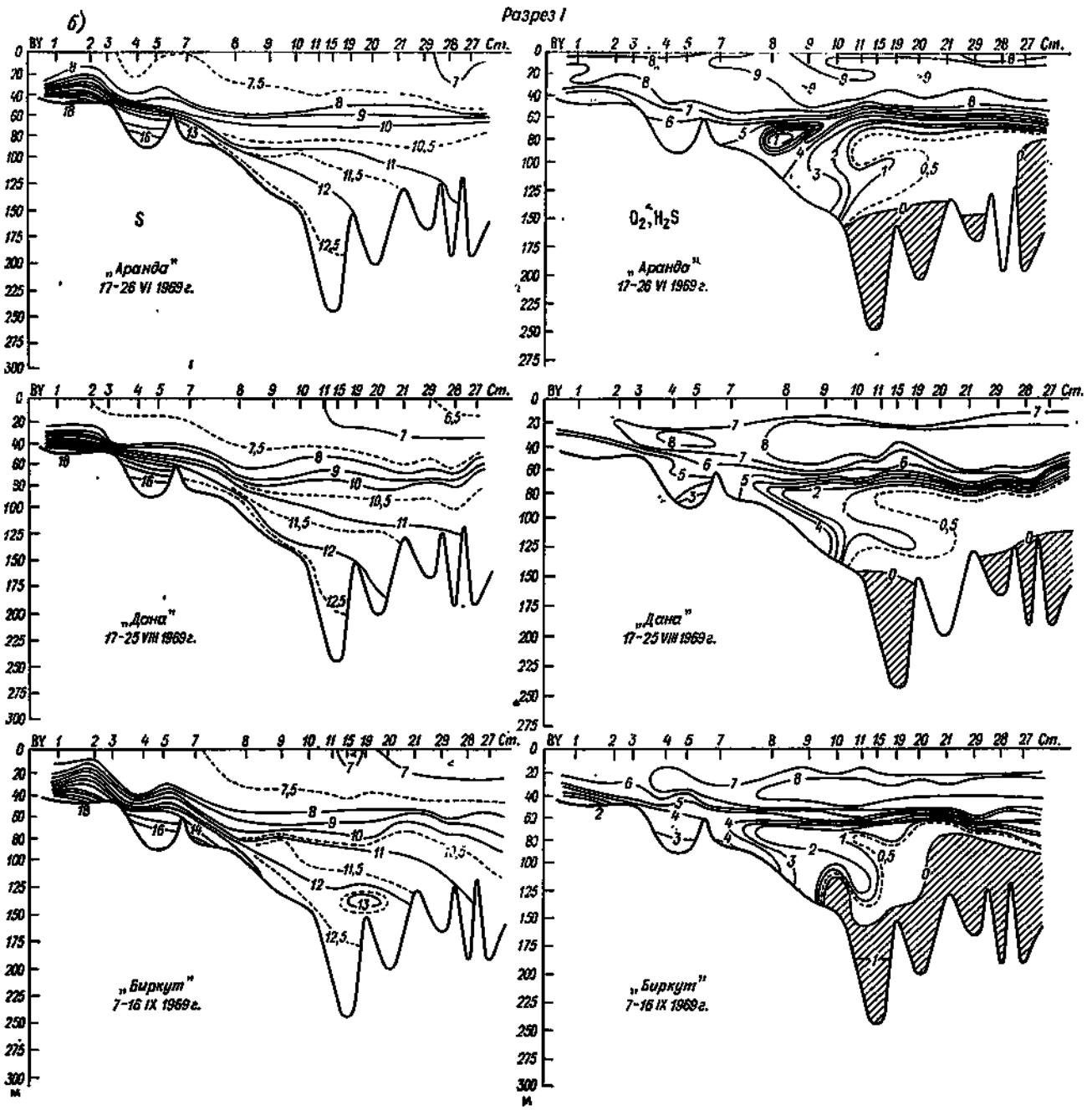

б)
Разрез I
S
„Аранда"
17–26 VI 1969 г.
O_2, H_2S
„Аранда"
17–26 VI 1969 г.
„Дана"
17–25 VIII 1969 г.
„Дана"
17–25 VIII 1969 г.
„Биркут"
7–16 IX 1969 г.
„Биркут"
7–16 IX 1969 г.
м

Рис. 12.28.

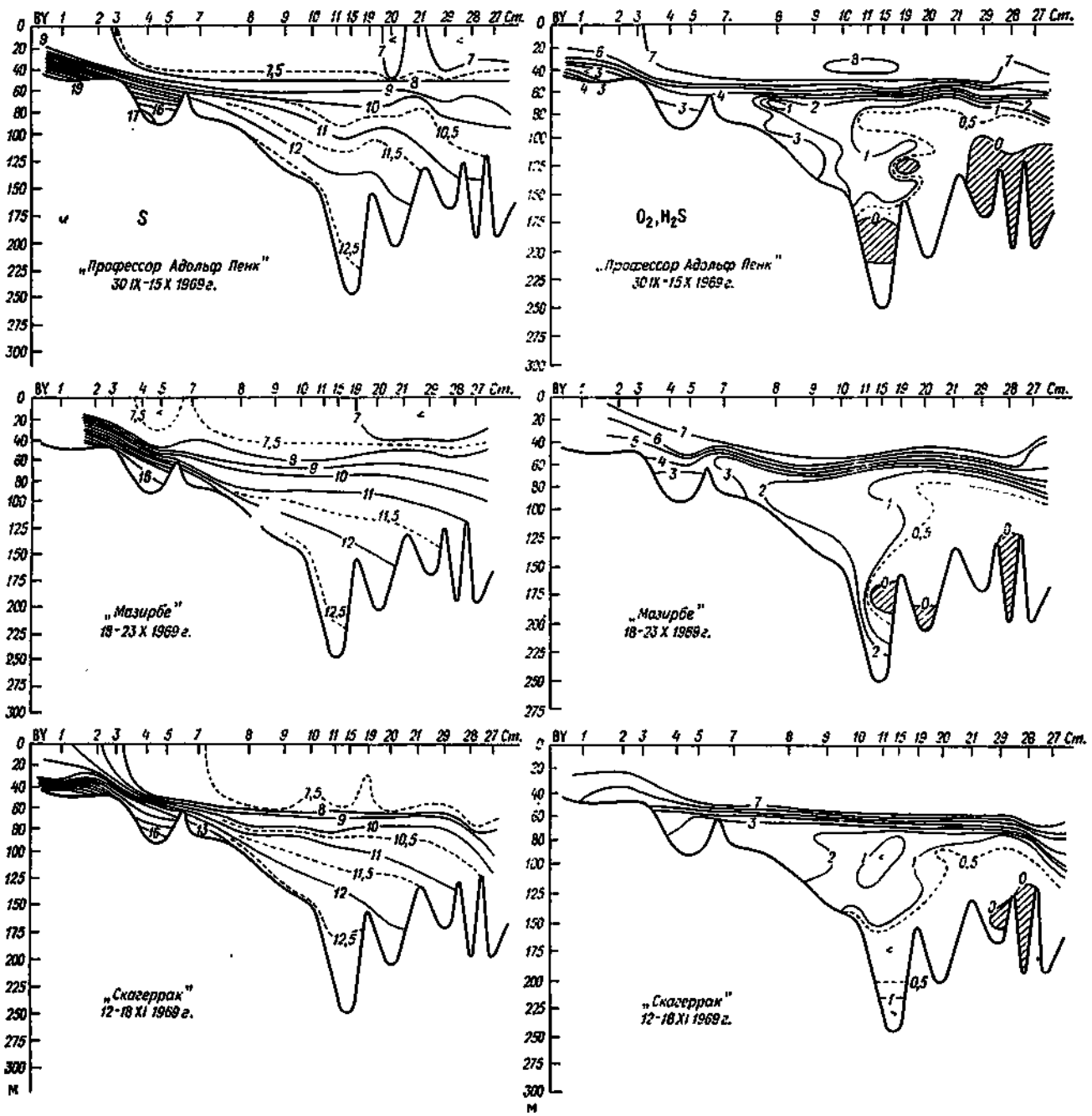

S
„Профессор Адольф Пенк"
30 IX–15 X 1969 г.
O_2, H_2S
„Профессор Адольф Пенк"
30 IX–15 X 1969 г.
„Мазирбе"
18–23 X 1969 г.
„Мазирбе"
18–23 X 1969 г.
„Скагеррак"
12–18 XI 1969 г.
„Скагеррак"
12–18 XI 1969 г.
м

Рис. 12.28.

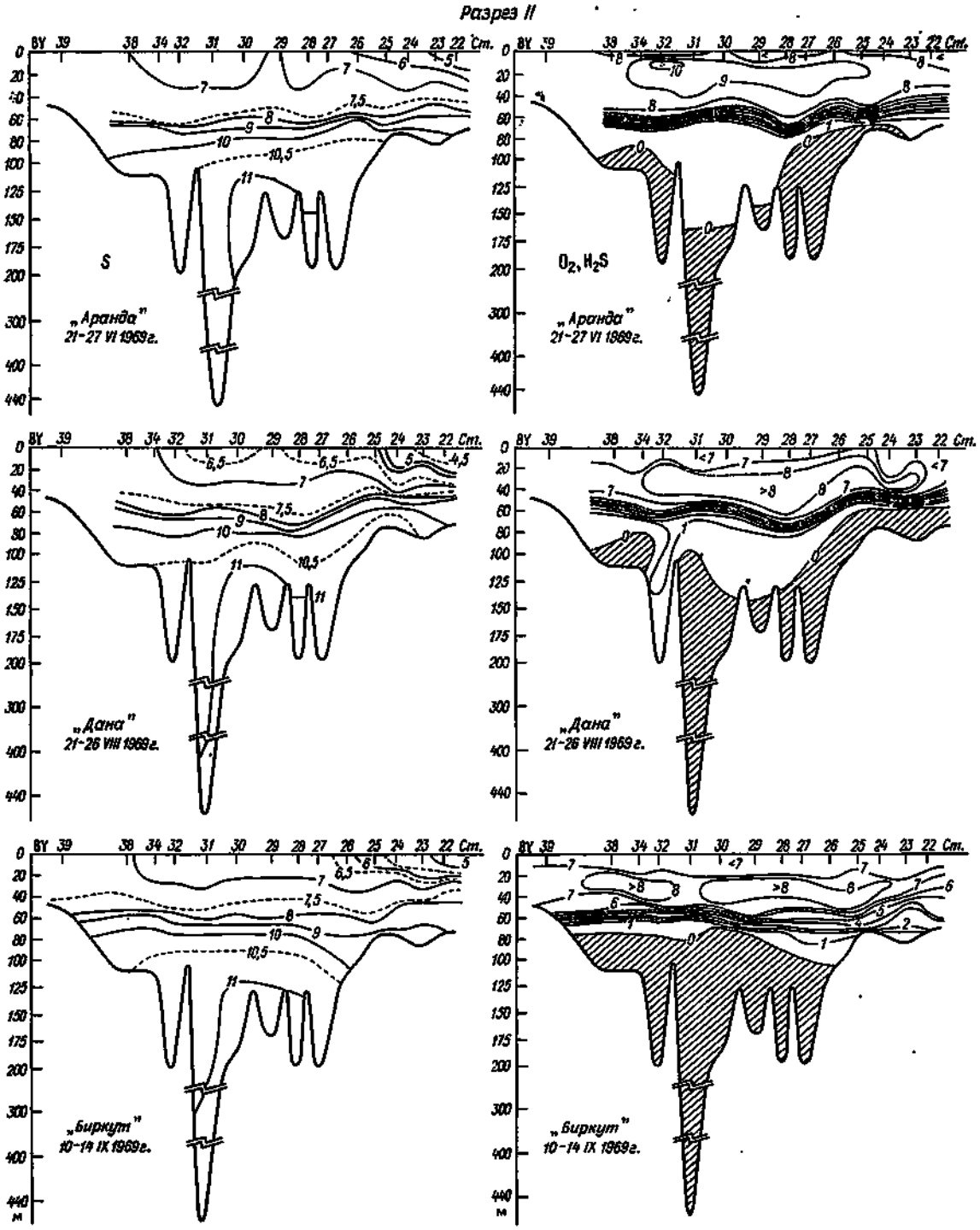

Разрез II
S
„Аранда"
21-27 VI 1969г.
O_2, H_2S
„Аранда"
21-27 VI 1969г.
„Дана"
21-26 VIII 1969г.
„Дана"
21-26 VIII 1969г.
„Биркут"
10-14 IX 1969г.
„Биркут"
10-14 IX 1969г.
BY 39 38 34 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 Cm.
м

Рис. 12.28.

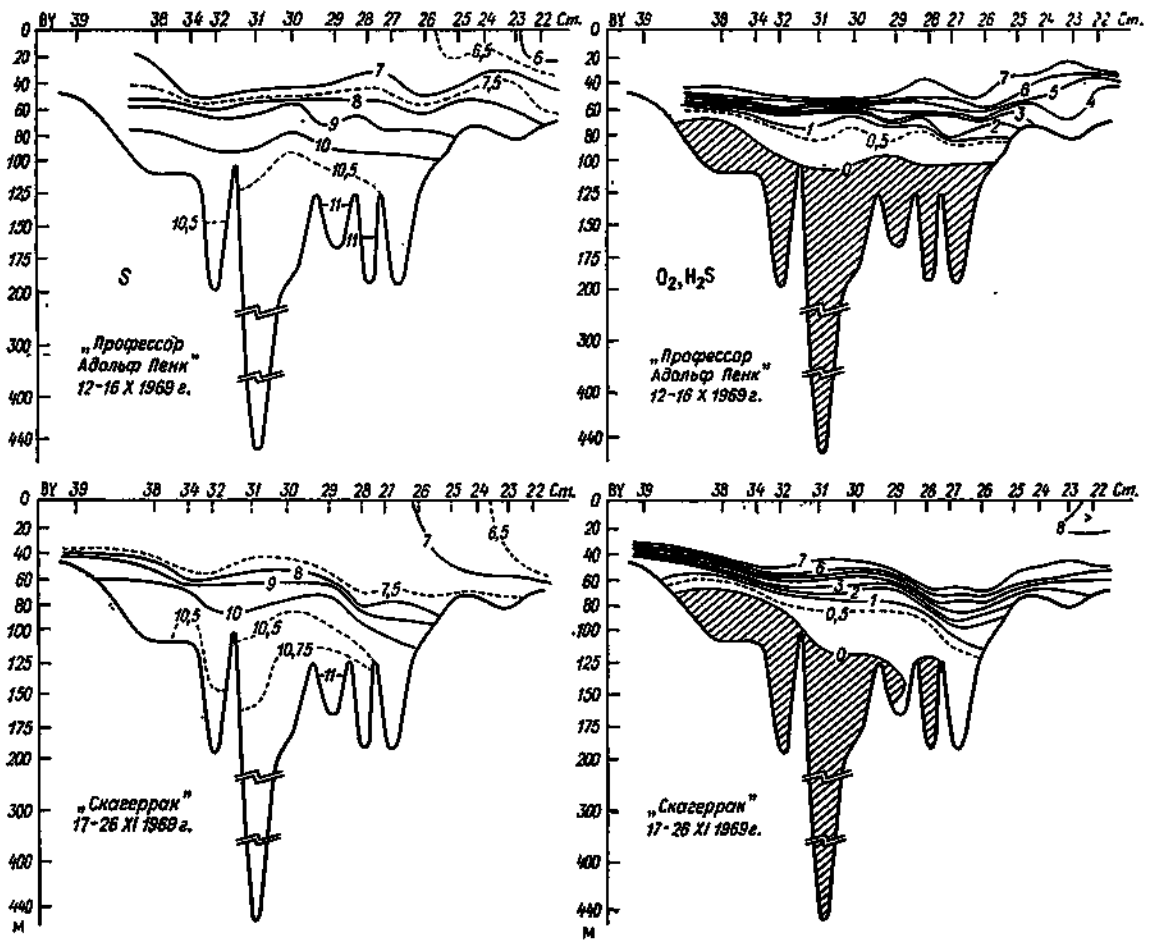

BY 39 38 34 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 Cm.
0 20 40 60 80 100 125 150 175 200 300 400 440
S
„Профессор Адольф Пенк"
12-16 X 1969 г.
O2, H2S
„Профессор Адольф Пенк"
12-16 X 1969 г.
„Скагеррак"
17-26 XI 1969 г.
„Скагеррак"
17-26 XI 1969 г.
м

Рис. 12.28.

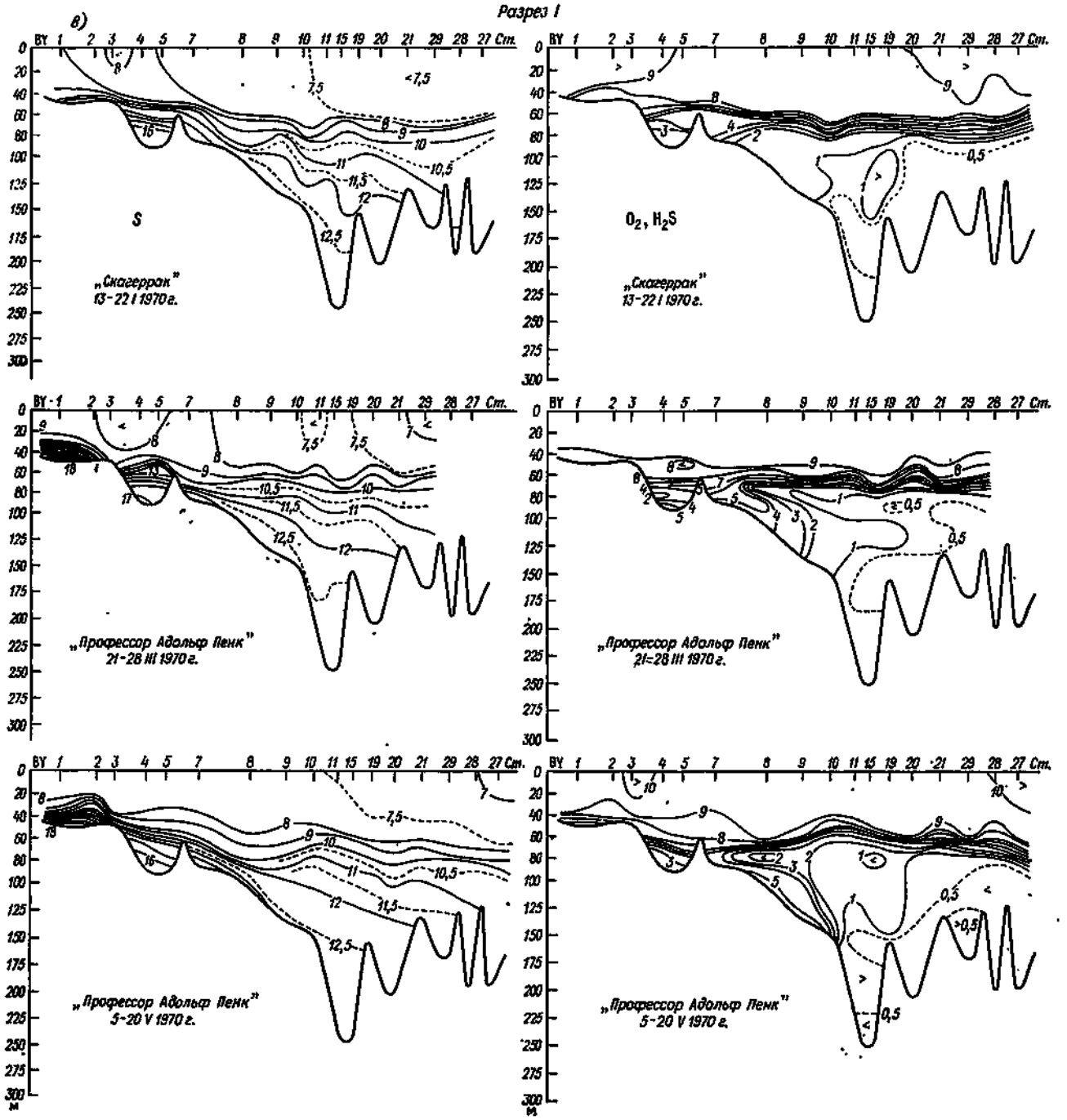

в)
Разрез I
S
„Скагеррак"
13-22 I 1970 г.
O_2, H_2S
„Скагеррак"
13-22 I 1970 г.
„Профессор Адольф Пенк"
21-28 III 1970 г.
„Профессор Адольф Пенк"
21-28 III 1970 г.
„Профессор Адольф Пенк"
5-20 V 1970 г.
„Профессор Адольф Пенк"
5-20 V 1970 г.

Рис. 12.28.

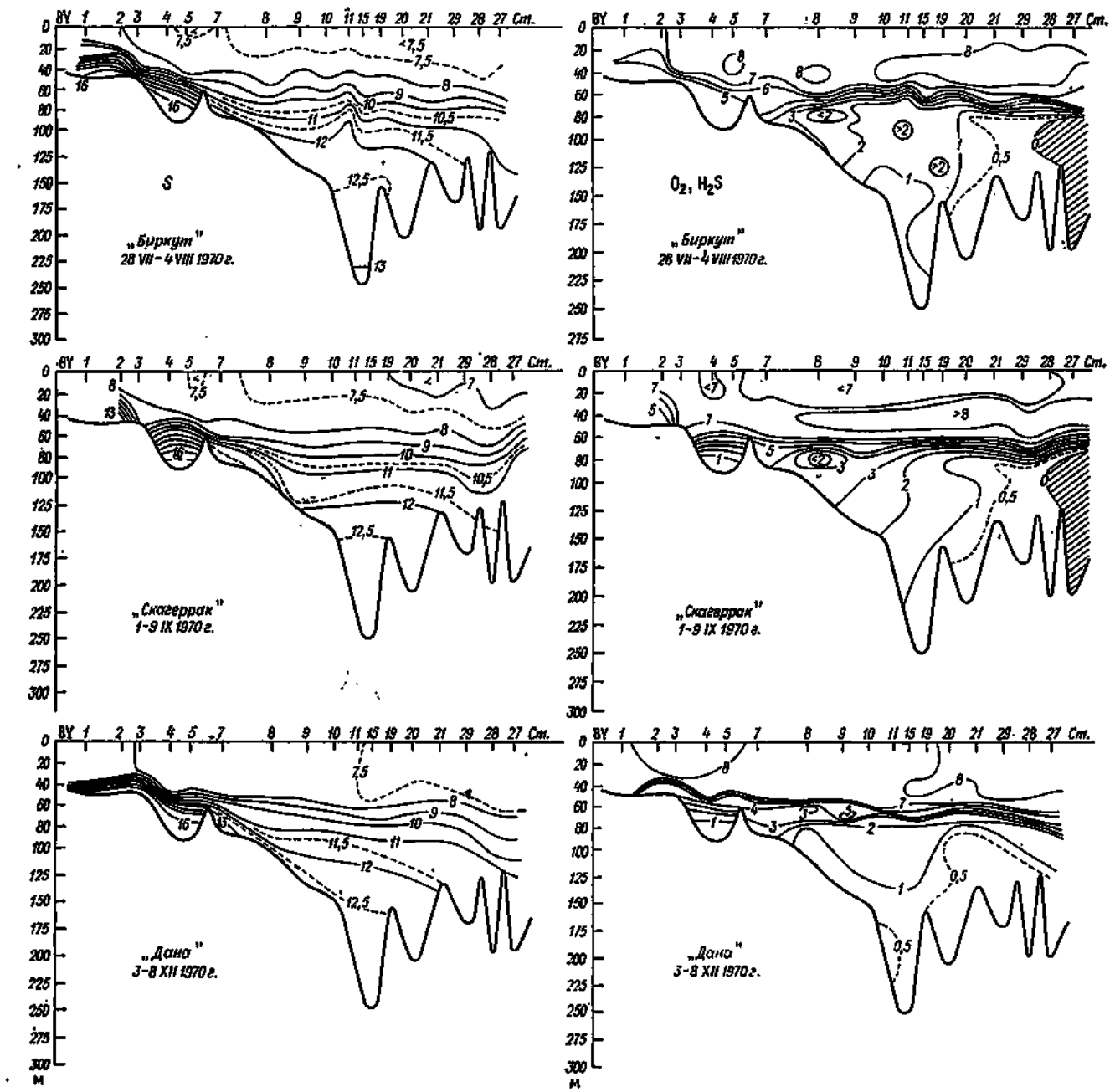

S
„Биркут"
28 VII–4 VIII 1970 г.
O_2, H_2S
„Биркут"
28 VII–4 VIII 1970 г.
„Скагеррак"
1–9 IX 1970 г.
„Скагеррак"
1–9 IX 1970 г.
„Дана"
3–8 XII 1970 г.
„Дана"
3–8 XII 1970 г.
м
м

Рис. 12.28.

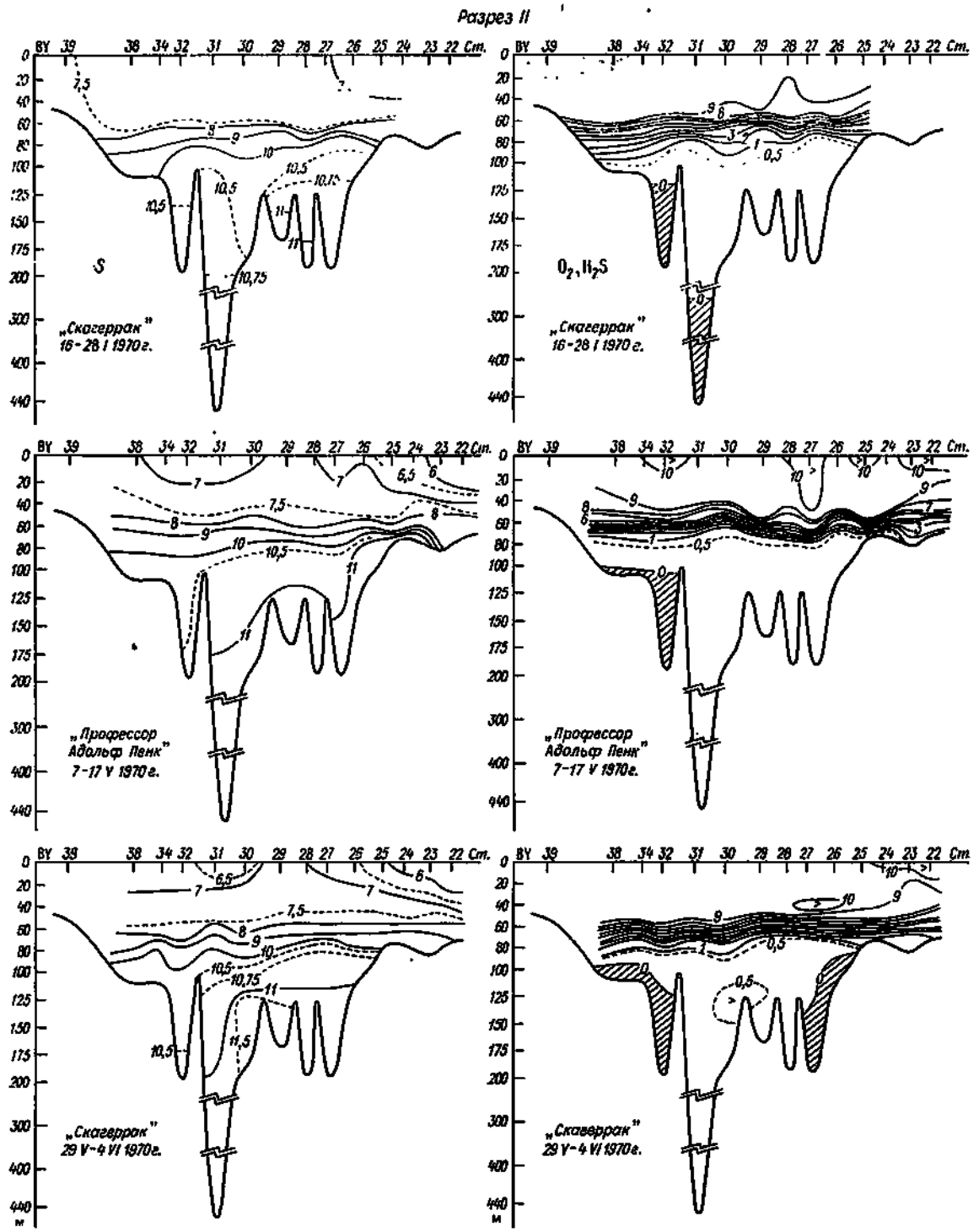
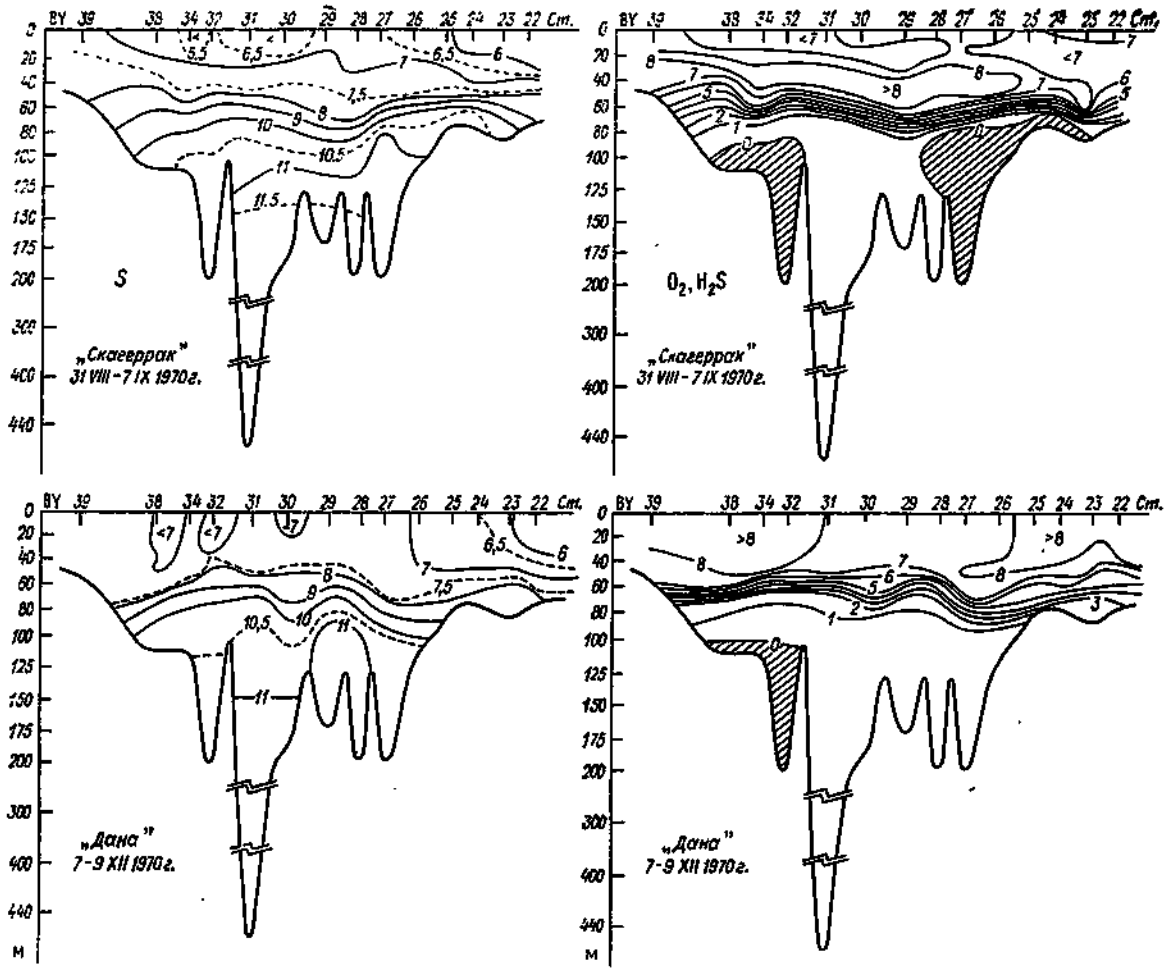

Разрез II
BY 39 38 34 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 Cm.
S
„Скагеррак"
16-28 I 1970 г.
O_2, H_2S
„Скагеррак"
16-28 I 1970 г.
„Профессор
Адольф Пенк"
7-17 V 1970 г.
„Профессор
Адольф Пенк"
7-17 V 1970 г.
„Скагеррак"
29 V-4 VI 1970 г.
„Скагеррак"
29 V-4 VI 1970 г.
м

Рис. 12.28.


S
„Скагеррак"
31 VIII – 7 IX 1970 г.
O_2, H_2S
„Скагеррак"
31 VIII – 7 IX 1970 г.
„Дана"
7–9 XII 1970 г.
„Дана"
7–9 XII 1970 г.

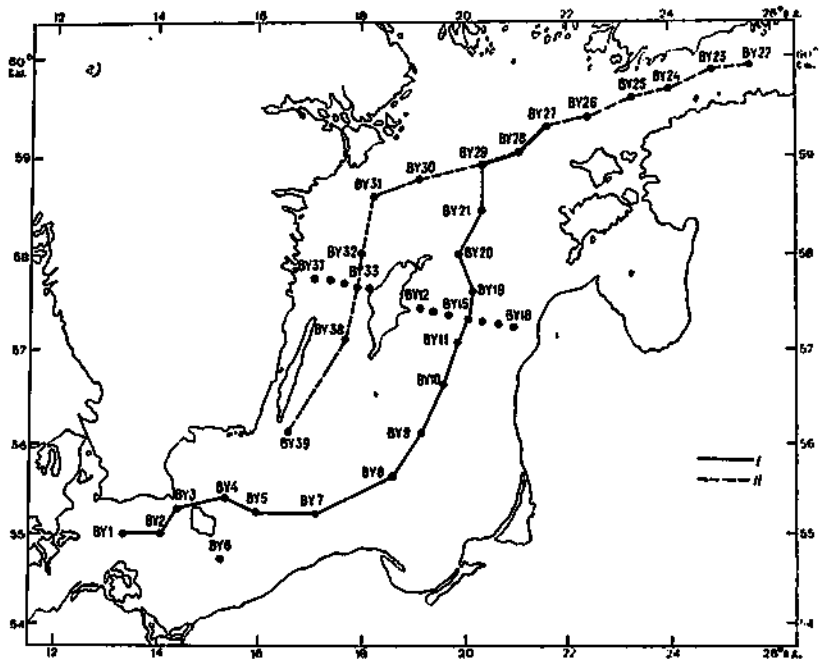

а)
BY1
BY2
BY3
BY4
BY5
BY6
BY7
BY8
BY9
BY10
BY11
BY12
BY15
BY16
BY18
BY19
BY20
BY21
BY23
BY24
BY25
BY26
BY27
BY28
BY29
BY30
BY31
BY32
BY33
BY37
BY38
BY39
I
II

Рис. 12.28.

Рис. 12.29. Сероводородные зоны (*1*) и зоны с дефицитом кислорода (менее 2 ‰) у дна (*2*) по наихудшим ситуациям для каждого года в 1963—1977 гг. (*а*) и 1978—1987 гг. (*б*) (Andersin et al., цит. по [129, 136, 142]).

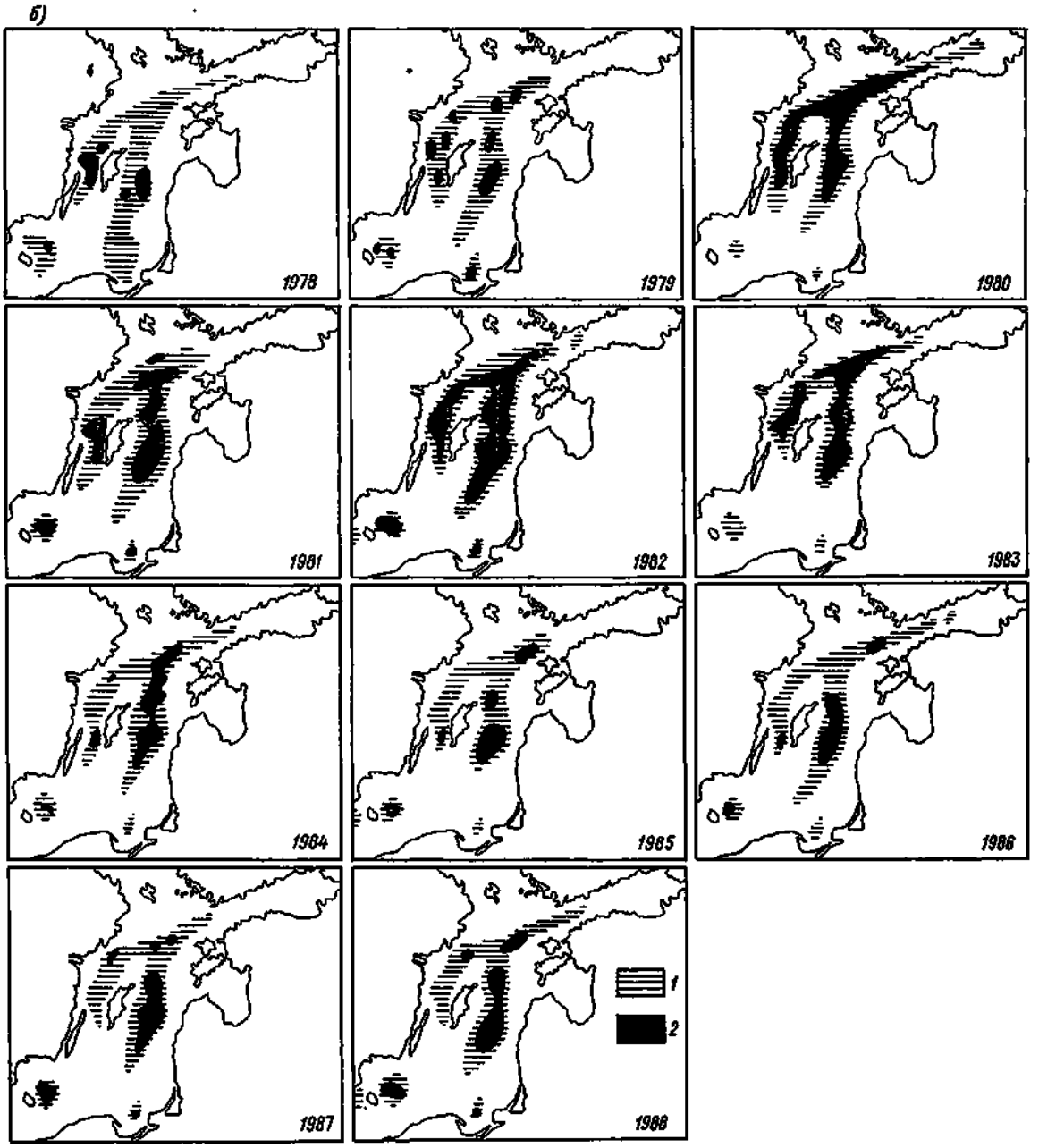


Рис. 12.29.

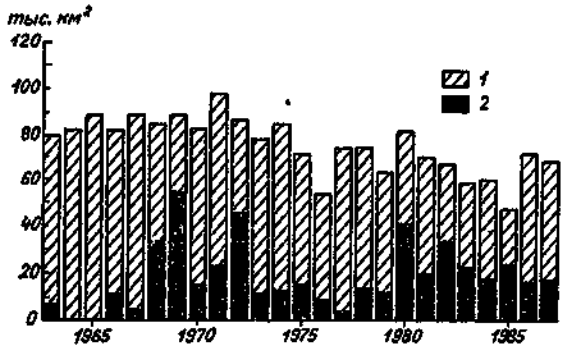


Рис. 12.30. Площади придонных сероводородных зон и зон с дефицитом кислорода (менее 2 ‰), критическим для придонной фауны [123].

и глубинного слоев (рис. 12.41 *б*), благоприятствующего аэрации верхней части глубинного слоя, так и снижения температуры (рис. 12.40 *б*), замедляющего скорость биохимического потребления кислорода, окажут положительное воздействие на формирование кислородных условий верхней части глубинного слоя. Однако небывалый в течение века по длительности период анаэробных условий в придонном слое, продолжающийся свыше 15 лет, может быть прерван только радикальным обновлением глубинного слоя эффективными вторжениями каттегатских вод.

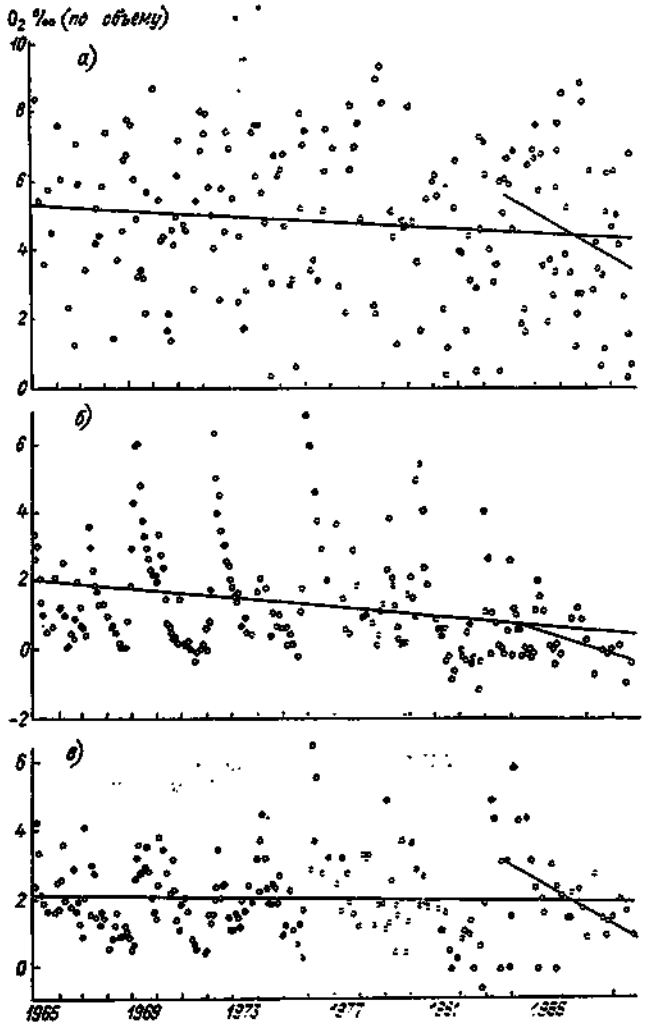


Рис. 12.31. Многолетние тенденции изменения содержания кислорода и сероводорода (отрицательные значения) по средним месячным значениям в 1965—1988 гг. в придонном слое юго-западной и юго-восточной частей моря в Арконской впадине (ст. BY 2) (*а*), в Борнхольмской впадине (станции BY 4 и BY 5) (*б*) и в южной части Восточной Готландской впадины (станции BY 8 и BY 9) (*в*) [411].

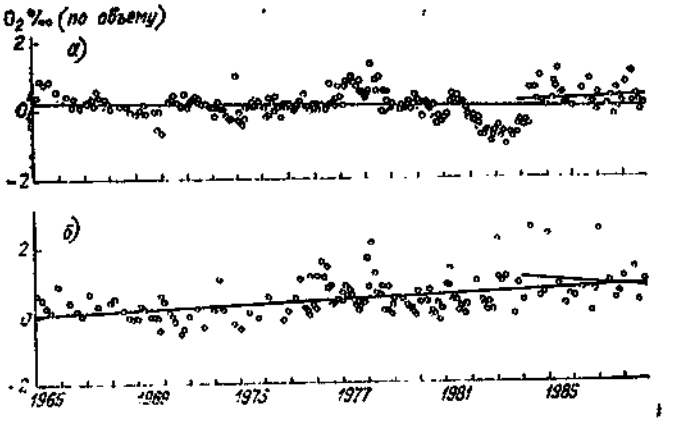


Рис. 12.33. Многолетние тенденции изменения содержания кислорода и сероводорода (отрицательные значения) по средним месячным значениям в придонном слое западной части моря в Ландсортской впадине (ст. BY 31) (*а*) и в Западной Готландской впадине (станции BY 34, BY 35 и BY 39) (*б*) [411].

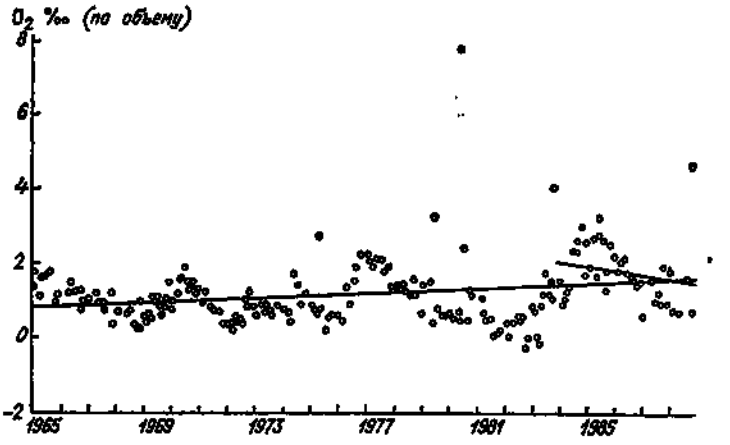


Рис. 12.34. Многолетние тенденции изменения содержания кислорода по средним месячным значениям в 1965—1988 гг. в активном глубинном слое (95—100 м) Готландской впадины (ст. BY 15) [411].

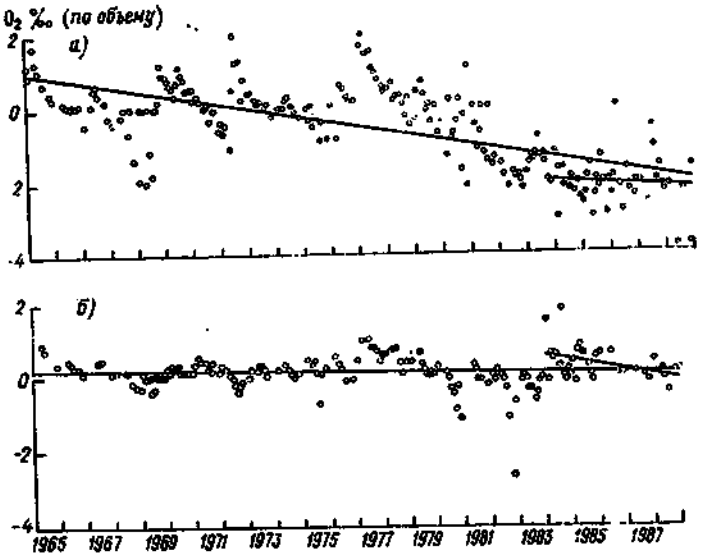


Рис. 12.32. Многолетние тенденции изменения содержания кислорода и сероводорода (отрицательные значения) по средним месячным значениям в придонном слое Готландской впадины (ст. BY 15) (*а*) и северной части моря (станции BY 27, BY 28 и BY 29) (*б*) [411].

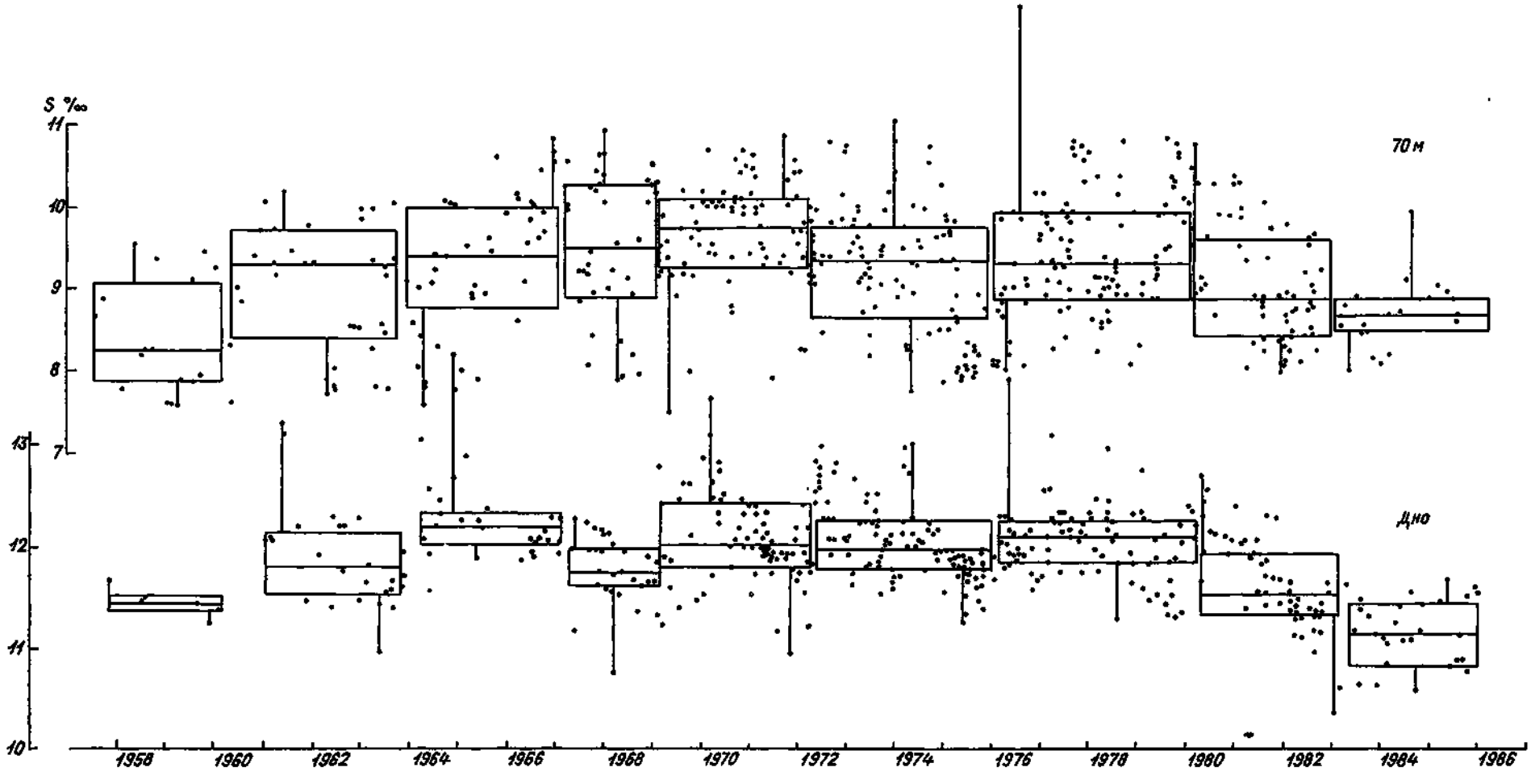


Рис. 12.35. Многолетние изменения квартильных оценок солености в 1958—1985 гг. в глубинных водах в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9).

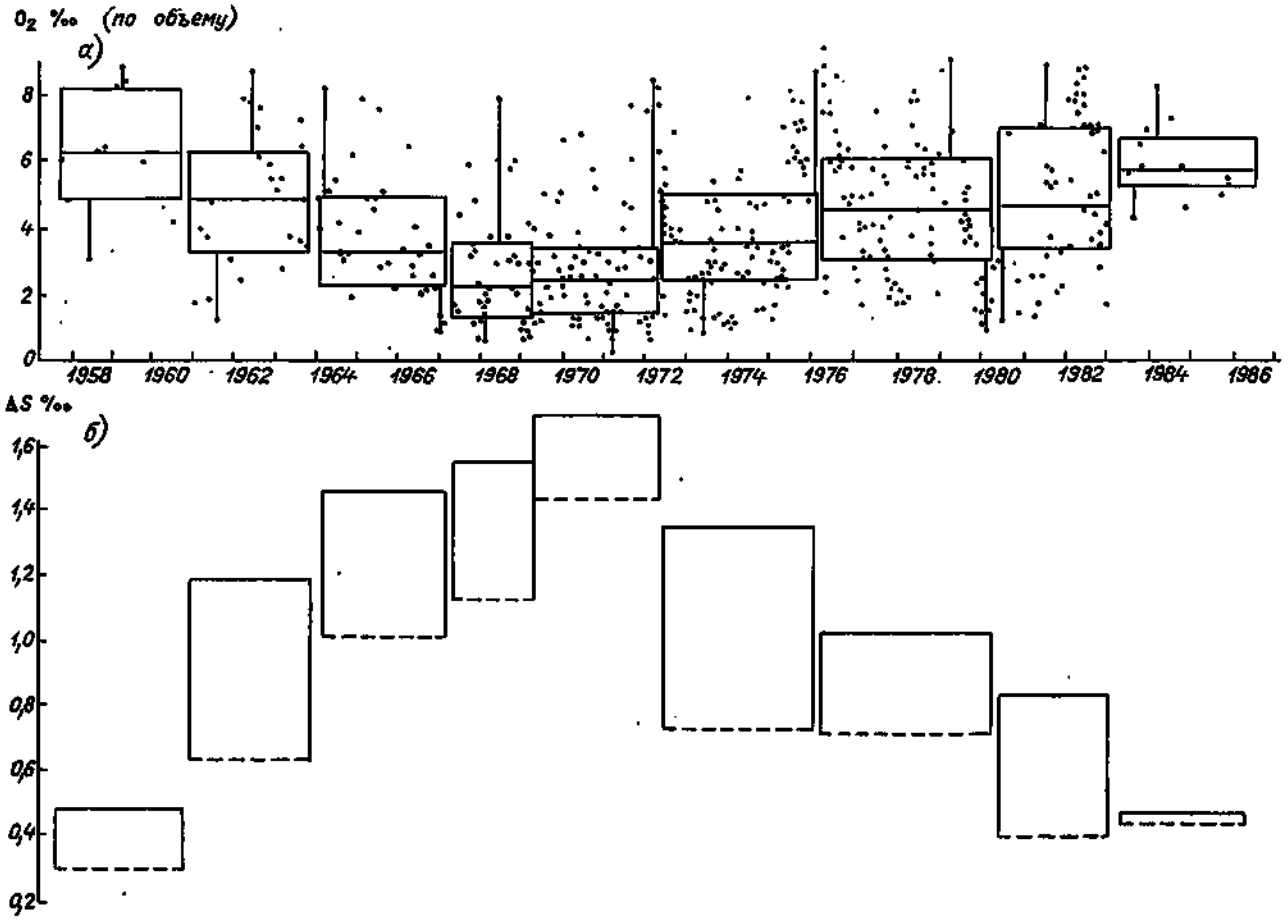


Рис. 12.36. Квартильные оценки концентраций кислорода в галоклине юго-восточной части Готландской впадины (ст. BY 9) (*а*) и градиентов солености ΔS в слое 60—70 м в 1958—1986 гг. (*б*).
Сплошная линия — значения $x_{0,5}$; пунктир — значения $x_{0,25}$.

13. КАРБОНАТНАЯ СИСТЕМА

13.1. Карбонатная система

Карбонатная система представляет собой комплекс неорганических соединений углерода, связанных последовательной системой физико-химических и химических равновесий. Данная система — одна из важнейших и наиболее сложных равновесных систем в море, которая стабилизируется на границе с атмосферой содержанием в воздухе двуокиси углерода (углекислого газа), а на поверхности раздела водных масс с донными отложениями — малой растворимостью карбоната кальция, составляющего главную часть минеральных отложений на дне моря — кальцитов, арагонитов и др.

Исходя из регулирования процессами растворения и гидролиза карбоната кальция, систему можно представить схемой

$$\begin{array}{c} CaCO_{3(тв)} \\ \downarrow\uparrow \\ CaCO_{3(раств)} \rightleftharpoons Ca^{2}+CO_3^{2-} \overset{H_2O}{\rightleftharpoons} \\ \rightleftharpoons HCO_3^- + OH^- \overset{H_2O}{\rightleftharpoons} H_2CO_3 + OH^- \rightleftharpoons \\ \rightleftharpoons H_2O + CO_2. \end{array} \qquad (13.1)$$

Учитывая регулирование системы газообменом с атмосферой, верхнюю часть, основанную на растворении двуокиси углерода и диссоциации угольной кислоты, можно описать схемой

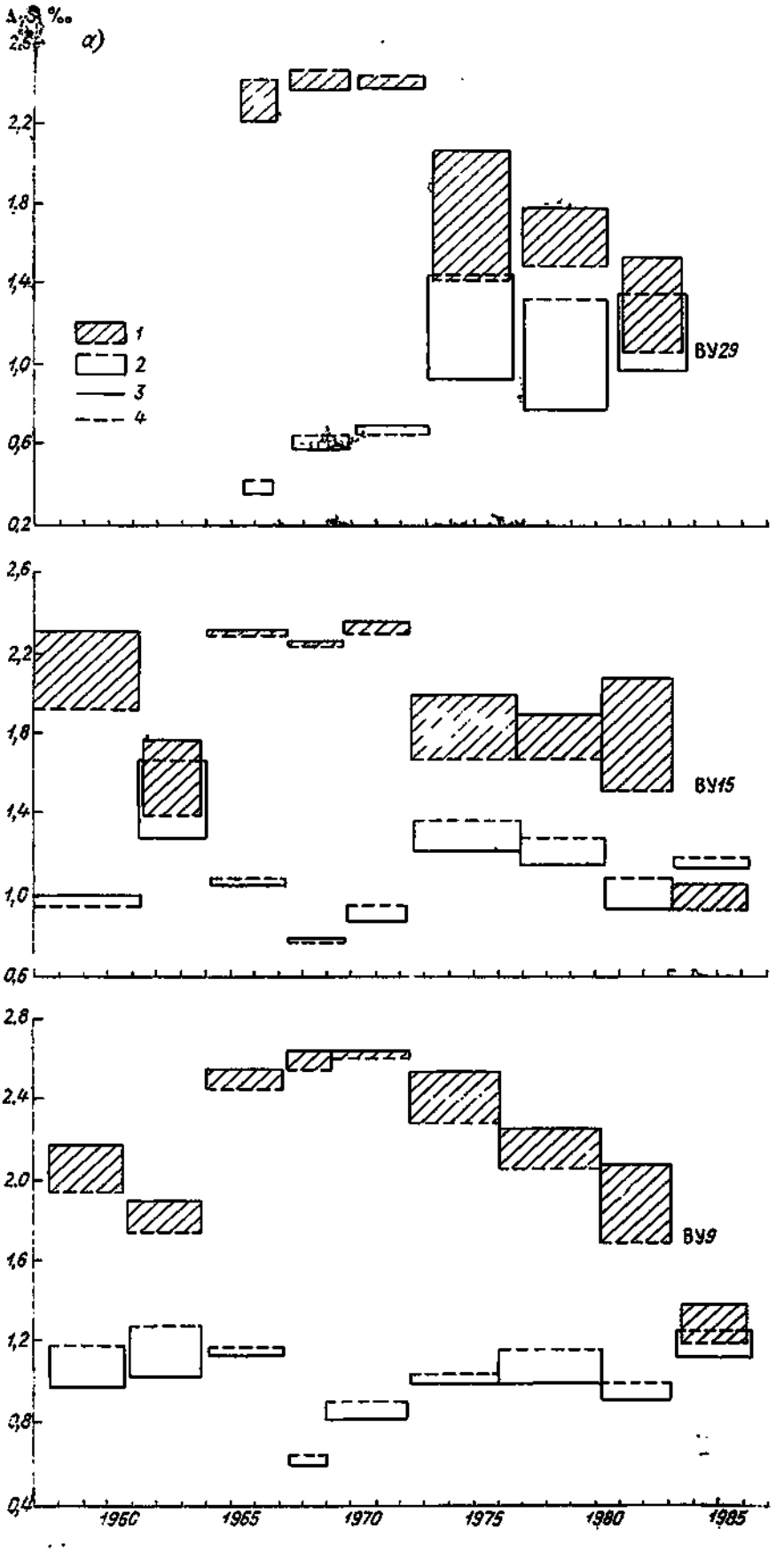
$$\begin{array}{c} CO_{2(атм)} \\ \uparrow\downarrow \\ CO_{2(раств)} + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 \overset{K_1}{\rightleftharpoons} H^+ + HCO_3^- \overset{K_2}{\rightleftharpoons} \\ \overset{+Ca^{2+}}{\rightleftharpoons} H^+ + CO_3^{2-} \rightleftharpoons CaCO_3, \end{array} \qquad (13.2)$$

где K_1 и K_2 — термодинамические константы диссоциации угольной кислоты.

В системе равновесий стадии растворения протекают относительно медленно, но стадии диссоциации — быстро. Учитывая малую долю недиссоциированной формы H_2CO_3 (не более 1 % суммы $CO_2+H_2CO_3$) и невозможность их раздельного анализа в воде, обычно их объединяют, включая концентрацию H_2CO_3 в концентрацию CO_2 и представляя первую стадию диссоциации уравнением

$$CO_2 + H_2O \overset{K_1}{\rightleftharpoons} H^+ + HCO_3^-. \qquad (13.3)$$

В морской воде, как в любом растворе, одновременно существуют все формы карбонатных соединений в соотношении, определяемом константами равновесия и условиями среды. Карбонатная система является одной из важнейших буферных систем моря, поддерживающих кислотно-основное равновесие в воде в пределах, жизненно необходимых для морских организмов.


Δ, ‰
а)
2,8
2,2
1,8
1,4
1,0
0,6
0,2
1
2
3
4
ВУ29
2,6
2,2
1,8
1,4
1,0
0,6
ВУ15
2,8
2,4
2,0
1,6
1,2
0,8
0,4
ВУ9
1960
1965
1970
1975
1980
1985

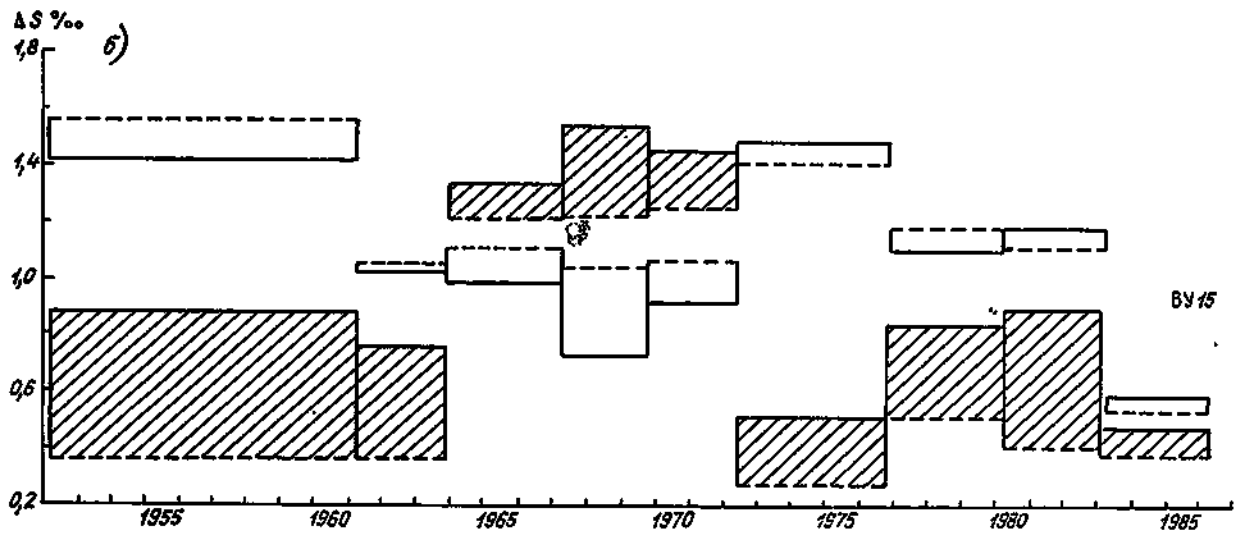


Рис. 12.37. Многолетние изменения градиентов солености для станций BY 29, BY 15 и BY 9 (*а*) в слоях 60—80 м (*1*) и 80—100 м (*2*) и для станции BY 15 (*б*) в слоях 60—70 м (*1*) и 70—80 м (*2*) по медианным (*3*) и нижнеквартильным (*4*) значениям выборок.

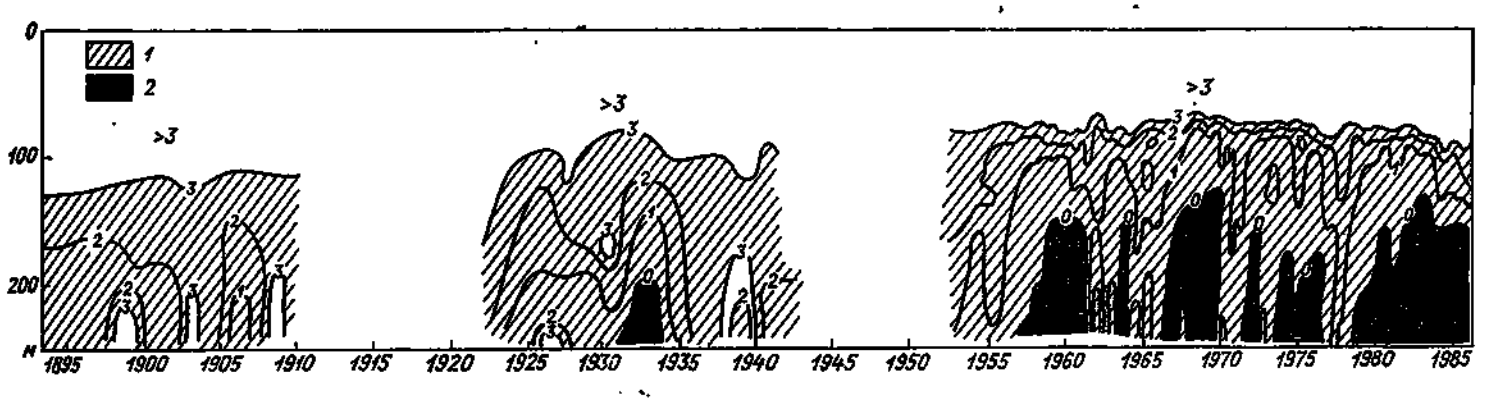


Рис. 12.38. Кислородные (*1*) и сероводородные (*2*) условия в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) с начала наблюдений по 1985 г. [410].

Аналитическое определение концентраций всех компонентов карбонатного равновесия невозможно, поскольку при химическом анализе оно нарушается. Наблюдаемые показатели состояния карбонатной системы в природных водах — общая щелочность и водородный показатель pH (отрицательный логарифм концентрации водородных ионов). В морской воде общая щелочность характеризует главным образом содержание гидрокарбонат- и карбонат-ионов, водородный показатель pH — количество растворенной двуокиси углерода. Эти показатели входят в программу систематических наблюдений (щелочность в настоящее время — лишь в некоторые из них, см. п. 9.1). В работах зарубежных исследователей пользуются определениями суммарного содержания неограниченного углерода — CO_2 и парциального давления углекислого газа p_{CO_2}. Однако для их измерения требуется сложная химико-аналитическая техника [потенциометрическое или фотометрическое титрование в закрытой системе (ΣCO_2), газохроматографический или ИК-спектрофотометрический анализ (ΣCO_2 и p_{CO_2})]. Измерения общей щелочности и, особенно, pH производятся с ограниченной точностью.

Концентрации индивидуальных карбонатных соединений могут быть определены лишь с помощью расчетов, основанных на теории, разработанной в трудах Буха [166—168], Харвея, Ваттенберга и Грипенберг (цит. по [1]), позволяющей применить принципы химического равновесия и закона действия масс для процессов, протекающих в природных водах. С этой целью предложено использовать вместо термодинамических констант концент-

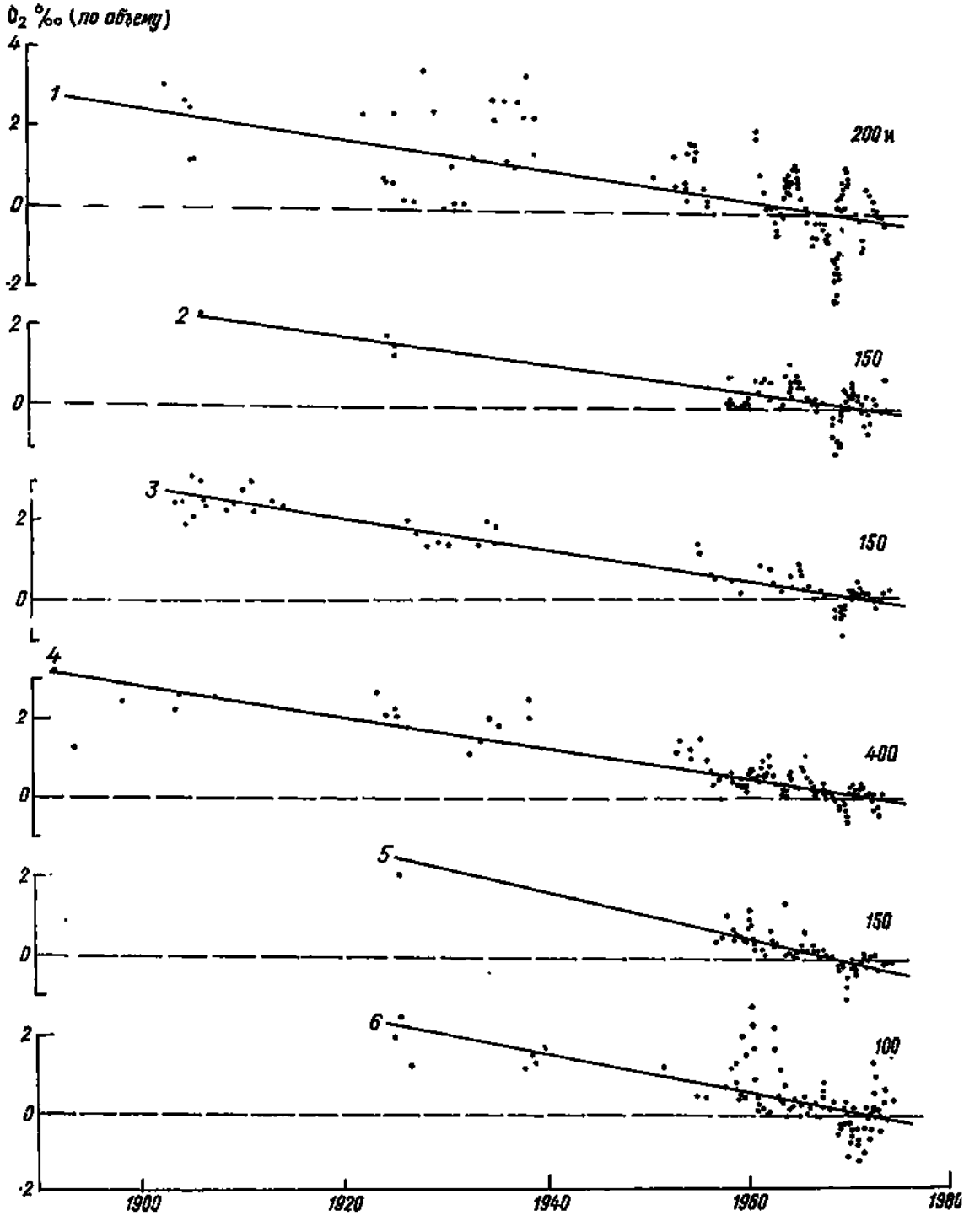


Рис. 12.39. Многолетние изменения содержания кислорода в глубинном слое различных районов моря [346].

1 — Готландская впадина; *2* — впадина Форе; *3* — северная часть Готландской впадины [363]; *4* — Ландсортская впадина; *5* — впадина Норчепинг; *6* — впадина Карлсё.

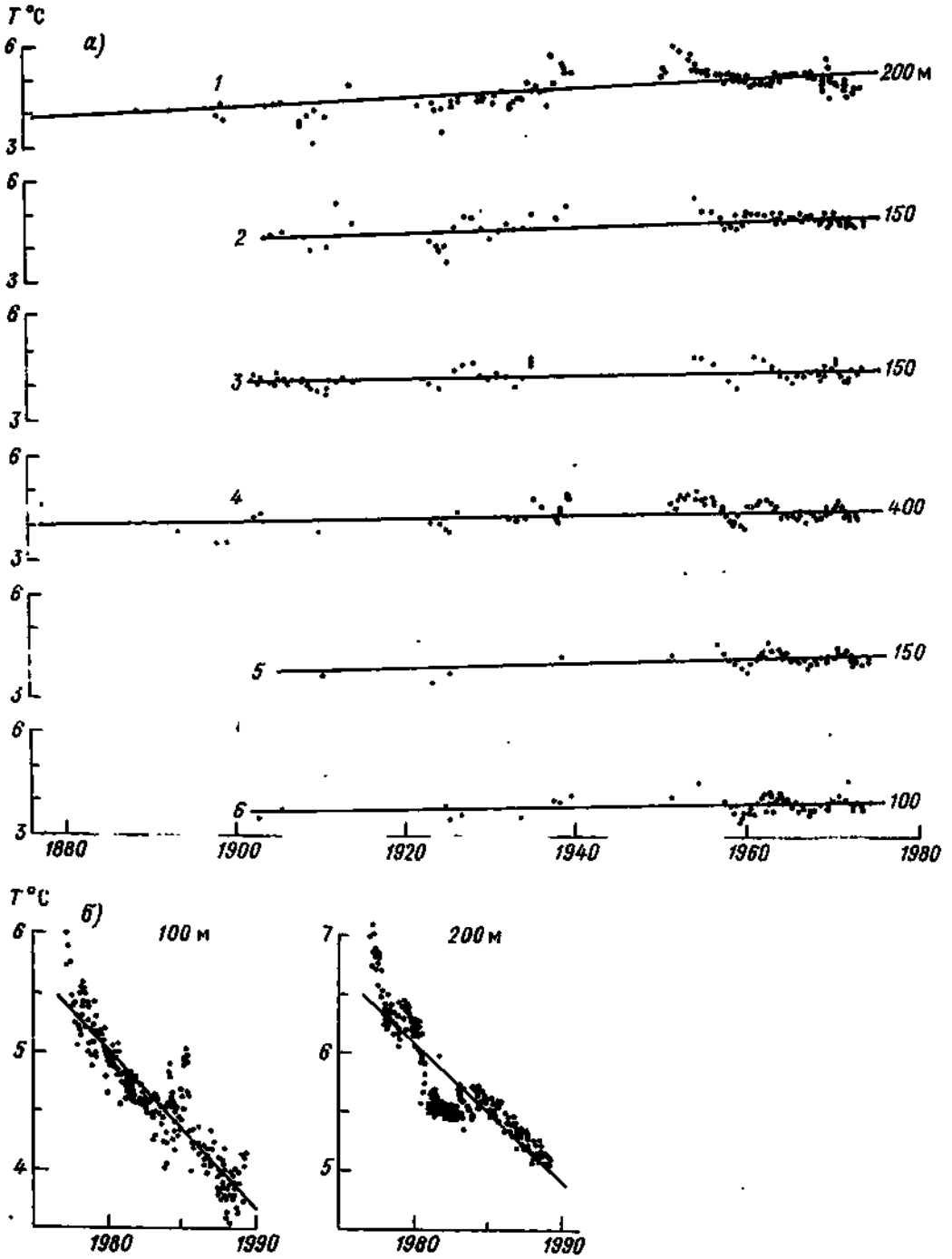


Рис. 12.40. Многолетние изменения температуры в придонном слое различных районов моря [346] (*а*) в Готландской впадине в 1977—1989 гг. [142] (*б*).

1 — Готландская впадина; *2* — впадина Форе; *3* — северная часть Готландской впадины; *4* — Ландсортская впадина; *5* — впадина Норчепинг; *6* — впадина Карлсё.

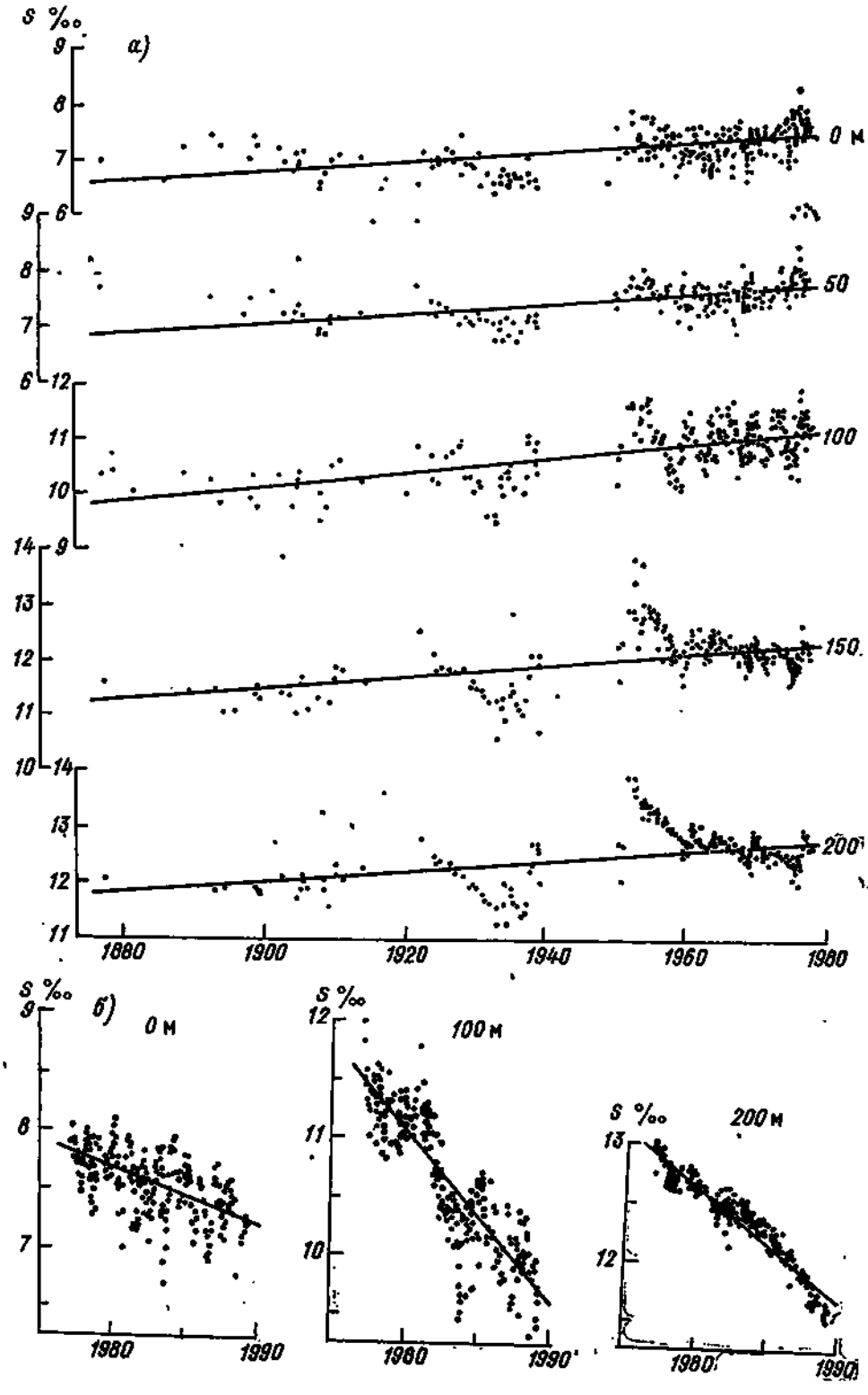


Рис. 12.41. Многолетние изменения солености на различных глубинах Готландской впадины [361] (*а*) и изменения в 1977—1989 гг. [142] (*б*).

рационные или смешанные константы диссоциации, экспериментально определив их зависимости от температуры и солености [1].

Состояние карбонатной системы в природных водах характеризуют концентрации свободной двуокиси углерода $CO_2+H_2CO_3$, ионов HCO_3^- и CO_3^{2-}, их суммарное содержание ΣCO_2 и процентное соотношение. Для их расчета по приведенным в литературе уравнениям на основе данных по общей щелочности, pH, температуре и солености рассчитывают концентрационные константы равновесия, а затем концентрации карбонатных соединений. Содержание двуокиси углерода как газа, растворенного в воде, характеризуется также парциальным давлением p_{CO_2} — показателем, учитывающим растворимость CO_2 при данной температуре и солености.

Исследования состояния карбонатной системы Балтийского моря были довольно интенсивными в довоенный период, в 50-х и 60-х годах. Их результаты содержатся в работах Буха, Грипенберг [169—171, 266] и Шульца [447, 449]. Обобщенное описание режима pH, щелочности и двуокиси углерода в Балтийском море на базе зарубежных и отечественных наблюдений содержится в монографии [91]. В последующие годы обобщения по динамике этих показателей в литературе не встречались. Оценки трендов многолетних изменений pH и щелочности, приведенные во «Второй оценке состояния среды Балтийского моря» [142], являются признаком проявления внимания исследователей к этой важной системе в характеристике гидрохимических условий Балтики. В данной монографии рассмотрена динамика полного комплекса показателей состояния карбонатной системы — pH, щелочности и перечисленных выше расчетных элементов.

13.2. Активная реакция (pH)

13.2.1. Общая характеристика факторов, формирующих изменчивость pH

Концентрация водородных ионов определяется режимом растворенной двуокиси углерода и состоянием карбонатного равновесия, представленного формулами (13.1) и (13.2): при растворении карбонатов, содержащихся в донных отложениях, pH морской воды повышается, а при поступлении двуокиси углерода — понижается. На pH влияют изменения температуры как непосредственно, так и косвенно за счет уменьшения растворимости двуокиси углерода. Влияние температуры на pH учитывается введением поправок на разность температуры в момент измерения и *in situ*, которые могут быть значительными. Так, при разности 10 °C к измеренным значениям прибавляется около 0,1, а при разности 20 °C — около 0,2 в диапазоне значений pH 7,6—8,4 [1]. Повышение температуры вызывает уменьшение pH тем более сильное, чем больше соленость, и, особенно, при увеличении щелочности. При увеличении давления pH почти пропорционально уменьшается, что учитывается введением соответствующих поправок [1].

Поскольку значение pH отражает содержание двуокиси углерода, потребляемой в процессах фотосинтеза и выделяющейся при биохимической деструкции, динамика pH в фотической зоне океанов характеризуется сезонной и нередко суточной изменчивостью. В целом диапазон изменений pH в современном океане относительно узок — от 7,6 до 8,4 [1].

Режим pH в Балтийском море, как и в других полуизолированных морях, характеризуется гораздо большей изменчивостью. Диапазон изменений, приведенный в [1], составляет 7,0—8,6, по нашим обобщениям он несколько больше — максимальные значения в верхнем слое достигают 8,7, а минимальные снижаются до 6.8, что свидетельствует о слабокислой среде, наблюдающейся иногда в глубинном слое.

Как и для всех остальных компонентов гидрохимического режима, динамика pH и размах изменений различны для верхнего квазиоднородного слоя и глубинных вод и определяются доминирующими в этих слоях диапазонами временной изменчивости. В верхнем слое годовой ход pH, характерный для всей его толщи, отличается по направленности от годового хода в фотической зоне и под ней. Динамика pH в глубинном слое в глубоководной части моря определяется межгодовой изменчивостью, обусловленной апериодическими обновлениями глубинного слоя и химическими процессами, протекающими у дна. В водах галоклина и активного глубинного слоя на фоне межгодовых колебаний проявляются и сезонные изменения.

13.2.2. Динамика pH в верхнем слое

Внутригодовая изменчивость pH, характерная для верхнего слоя, была описана еще по данным наблюдений 1958—1962 гг. (Н. М. Пастухова, цит. по [19]). Короткий период измерений и ежесезонная дискретность позволили отметить лишь главные особенности сезонных изменений, наиболее отчетливо выраженные в слое 0—20 м: повышение значений pH весной и летом в связи с интенсивным потреблением CO_2 в процессе фотосинтеза и снижение осенью и зимой. Указанный в [19] диапазон сезонных колебаний от 7,8—7,9 зимой до 8,3—8,4 весной ближе к современным оценкам, полученным на основе статистического анализа многолетних данных 1958—1985 гг., чем более поздние сведения (8,0—8,2) по данным [54].

Исследование годового хода pH, проведенное в данной монографии, существенно расширило представление о внутригодовой изменчивости данного показателя: обнаружен более сложный характер изменений в фотическом слое в весенне-летний период и показано наличие сезонных изменений противоположной направленности в водах под ним.

Годовая ритмика колебаний pH в верхнем слое обусловлена главным образом влиянием факторов, формирующих внутригодовую изменчивость гидрохимических условий в целом. Однако статистический анализ выявил особенности годового хода, обусловленные более сложным комплексом абиотических и биотических факторов, определяющих содержание двуокиси углерода и состояние карбонатного равновесия.

Годовой ход pH в фотическом слое, как показывают данные для поверхности (рис. 13.1), характеризуется низкими значениями в осенне-зимних условиях с последующим возрастанием, начинающимся с весенней вспышкой фитопланктона и достигающим максимума в июне, с некоторым сниже-

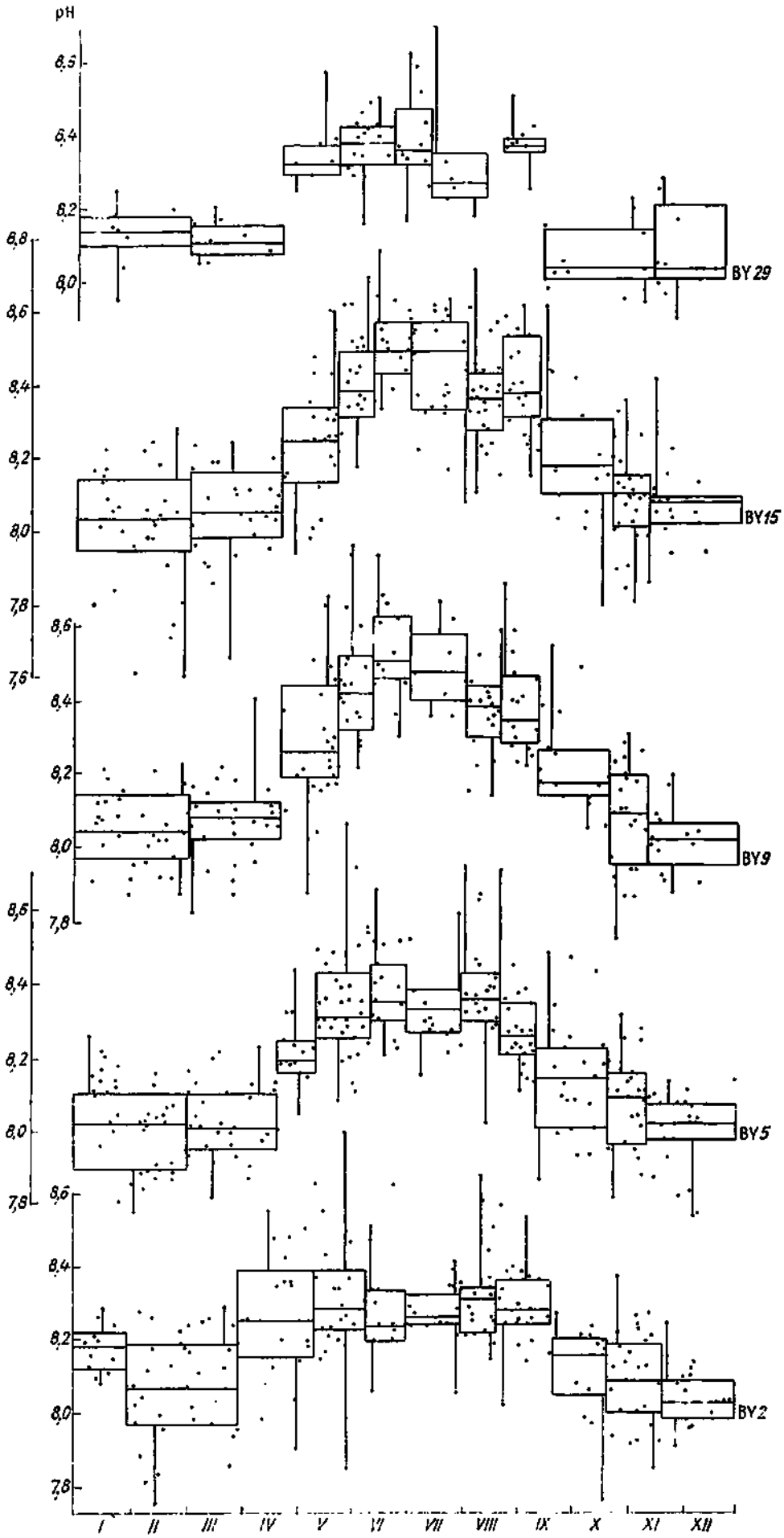


Рис. 13.1. Годовой ход значений pH на поверхности по данным квартильного анализа для базовых станций.

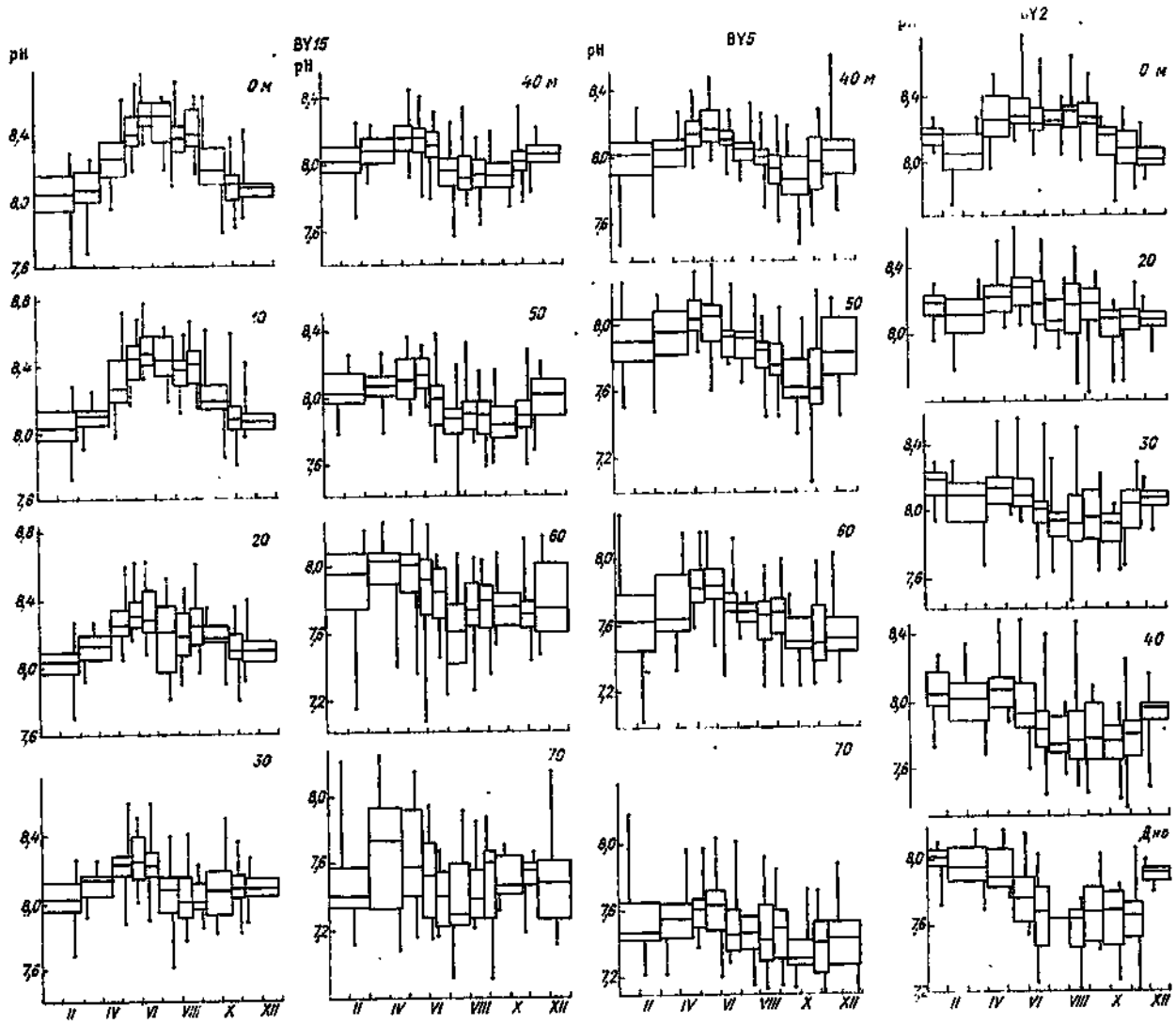


Рис. 13.2. Годовой ход значений pH на стандартных горизонтах Готландской (ст. BY 15), Борнхольмской (BY 5) и Арконской (ст. BY 2) впадин.

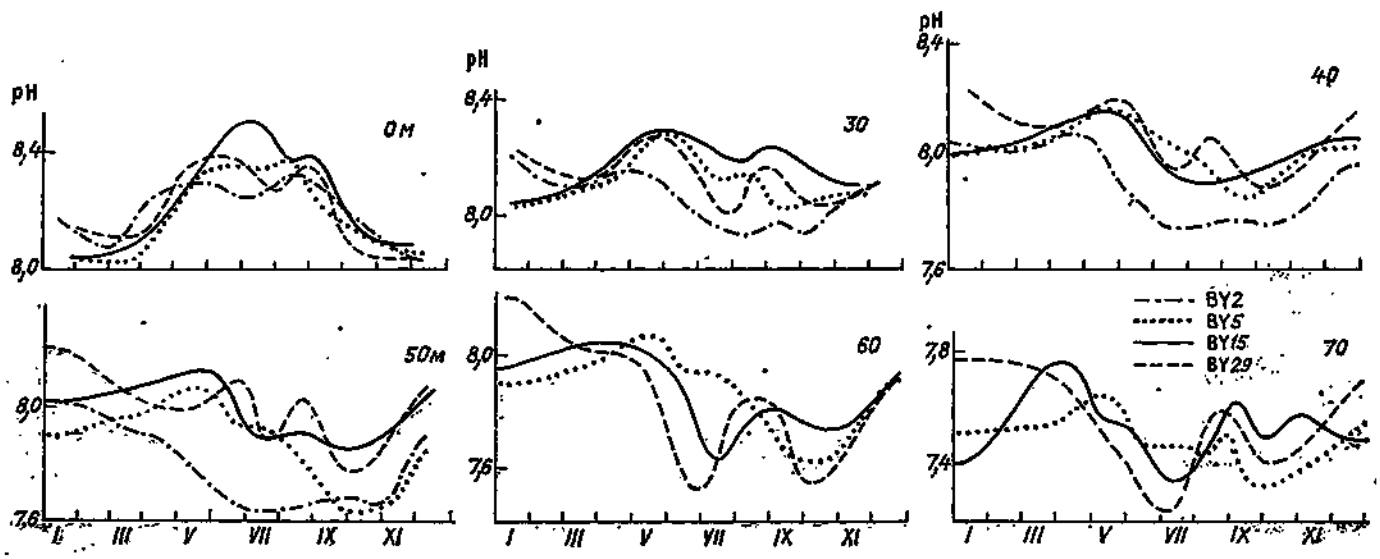


Рис. 13.3. Годовой ход значений pH на различных глубинах базовых станций.

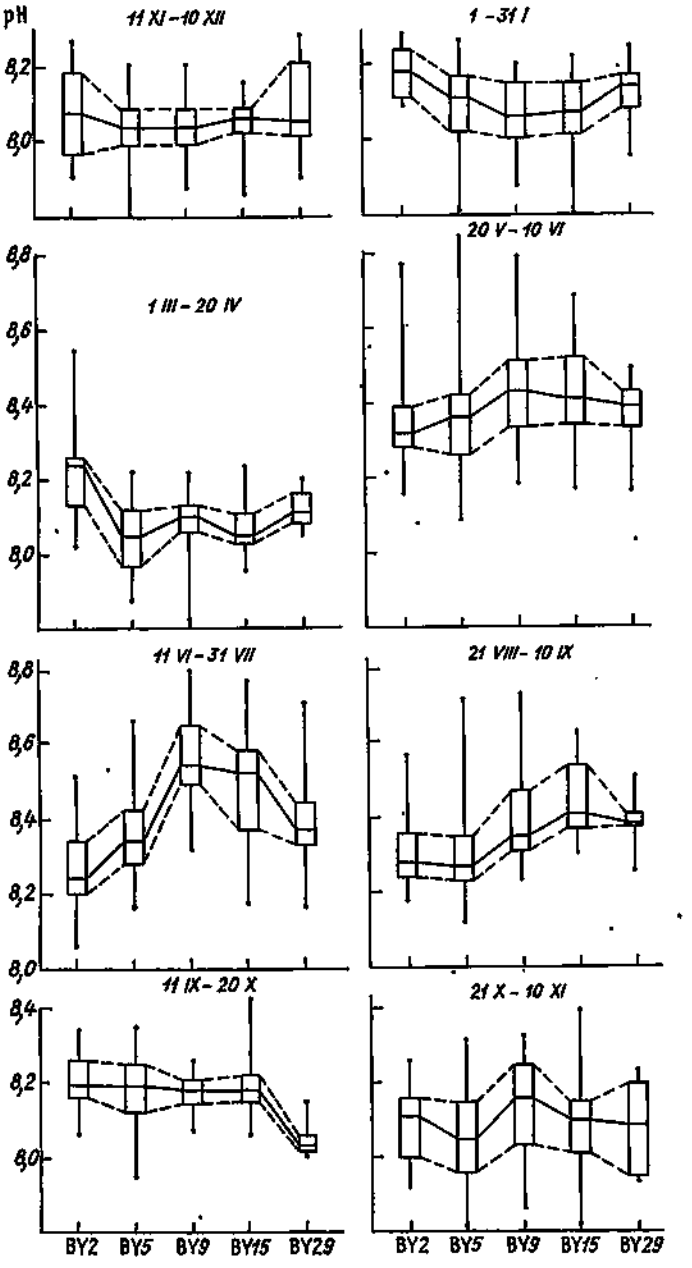


Рис. 13.4. Квартильные оценки распределения значений pH на поверхности на восточном продольном разрезе для базовых станций для характерных фаз годового цикла.

нием в середине лета и вторым максимумом в августе.

Особенность годового хода pH по сравнению с другими гидрохимическими показателями, режим которых в верхнем слое определяется цикличностью биологических процессов, заключается в некотором сдвиге средних многолетних границ сезонных изменений во времени. Так, в период возрастания pH эти границы сдвинуты по крайней мере на декаду по сравнению к изменениям содержания кислорода и биогенных элементов. В частности, ранней весной в начальной стадии активизации фотосинтеза значения pH, как правило, сохраняются еще на уровне зимних (в Арконской впадине — в марте, в остальной части моря — в течение первых двух декад апреля), а повышение pH происходит на декаду позднее. Главный летний максимум pH наблюдается во 2-й—3-й декадах июня (станции BY 5, BY 9 и BY 15) (см. рис. 13.1), в то время как снижение концентраций фосфатов до летнего минимума и возрастание насыщения поверхностных вод кислородом до максимума повсеместно приходится на первые две декады июня.

Эти различия иллюстрируют более медленную убыль двуокиси углерода в фотической зоне по сравнению с уменьшением содержания биогенных элементов и относительно возрастания насыщения кислородом, образующимся в процессе фотосинтеза. Причиной может быть компенсация убыли двуокиси углерода либо за счет поступления из атмосферы, либо в результате высокой интенсивности процессов ее регенерации при биохимической деструкции.

Снижение pH осенью в фотической зоне также происходит раньше, чем возрастание концентраций биогенных элементов в результате затухания фотосинтеза. Оно начинается в начале сентября, а в Арконской впадине — в последней его декаде (см. рис. 10.15 и 13.1). В принципе уменьшение pH начинается еще летом — в июле, но прерывается отчетливо выраженным вторым максимумом в августе, обусловленным, по-видимому, летним пиком развития сине-зеленых водорослей. В Арконской впадине все изменения pH, как и показателя насыщения воды кислородом, в весенне-летний период значительно сглажены.

Годовой ход pH в различных районах моря представлен на рис. 13.1—13.5. Размах годовых изменений в фотическом слое наибольший в центральной части моря и уменьшается в направлении на юг и север (см. рис. 13.1 и 13.3): разность средних показателей для интервалов максимумов и минимумов в годовом ходе pH на поверхности составляет в Готландской впадине (ст. BY 15) 0,45, в Борнхольмской впадине (ст. BY 5) 0,35, в Арконской впадине (ст. BY 2) 0,25, в северной части моря (ст. BY 29) 0,30.

Диапазон колебаний pH целесообразно охарактеризовать, обобщив статистические данные для интервалов высоких и низких значений в годовом ходе pH. Период низких значений в поверхностном слое Арконского бассейна наблюдается с последней декады ноября по март. В направлении на север продолжительность этого интервала возрастает: 20 ноября—20 апреля в Борнхольмской впадине и в Восточной Готландской котловине и начало октября—апрель (наибольшая продолжительность) в северной части моря.

Характерная черта пространственного распределения pH в поверхностном слое моря в конце осени и зимой — несколько повышенный уровень значений в Арконской впадине и в северной части моря по сравнению с центральной (см. рис. 13.4): преобладающий диапазон значений, характеризуемый показателями $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$, для станций BY 2 и BY 29 составляет 8,0—8,2, в Готландской впадине (ст. BY 15) — от 8,0 до 8,15. Общий размах значений в холодный период года центральной части моря — от 7,6 до 8,4; в Арконской впадине и в северной части минимальные значения выше и составляют 7,9 и 7,8 соответственно.

В отличие от низких, период высоких значений самый длительный в Арконской впадине — с начала апреля по 2-ю декаду сентября, в Борнхольмской впадине он сокращается до сроков 10 мая—10 сентября и еще более в центральной части моря, где он начинается с 10 июня. В этом же направ-

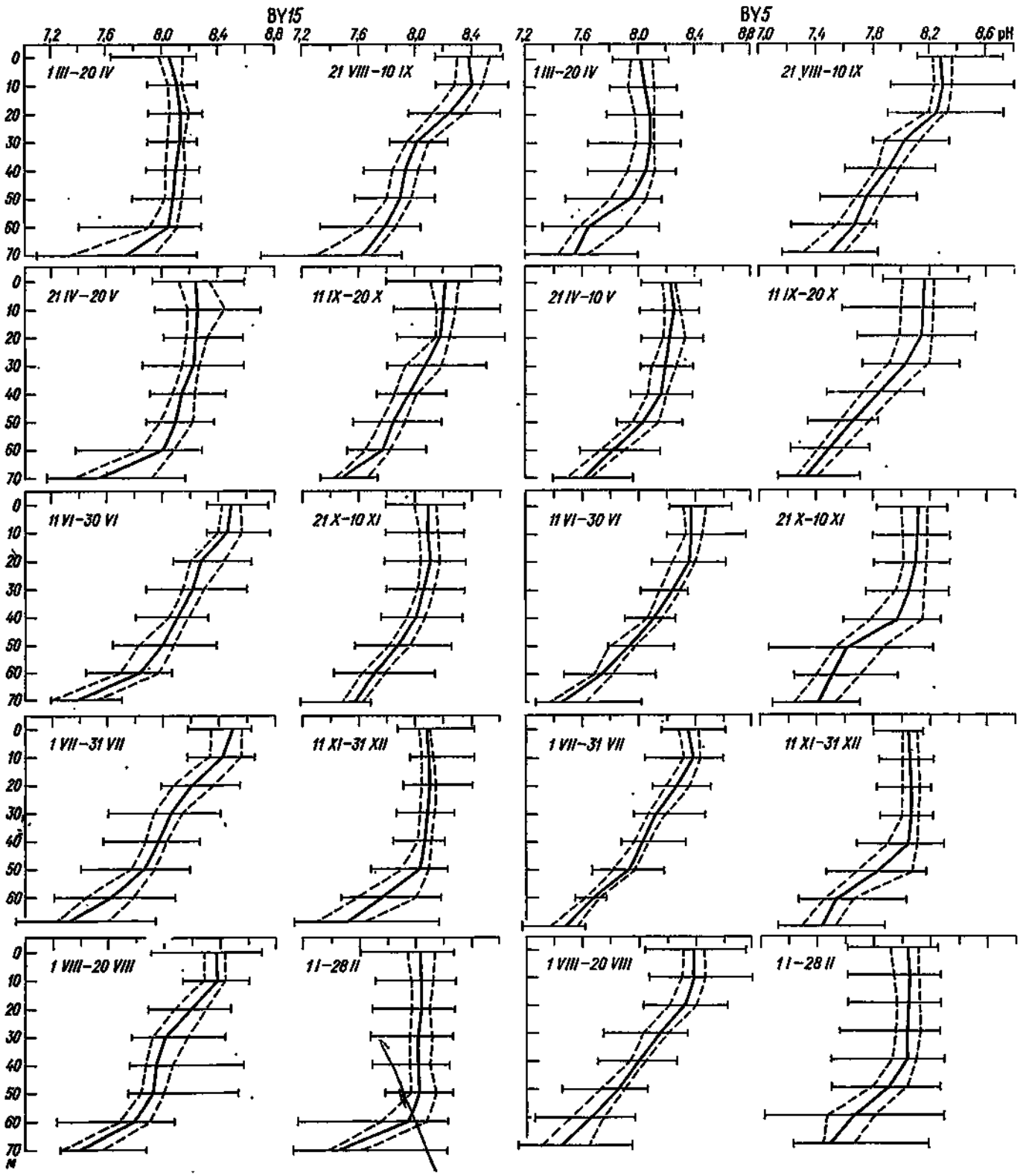


Рис. 13.5. Вертикальное распределение квартильных оценок значений pH в Готландской (ст. BY 15), Борнхольмской (ст. BY 5) и Арконской (ст. BY 2) впадинах.

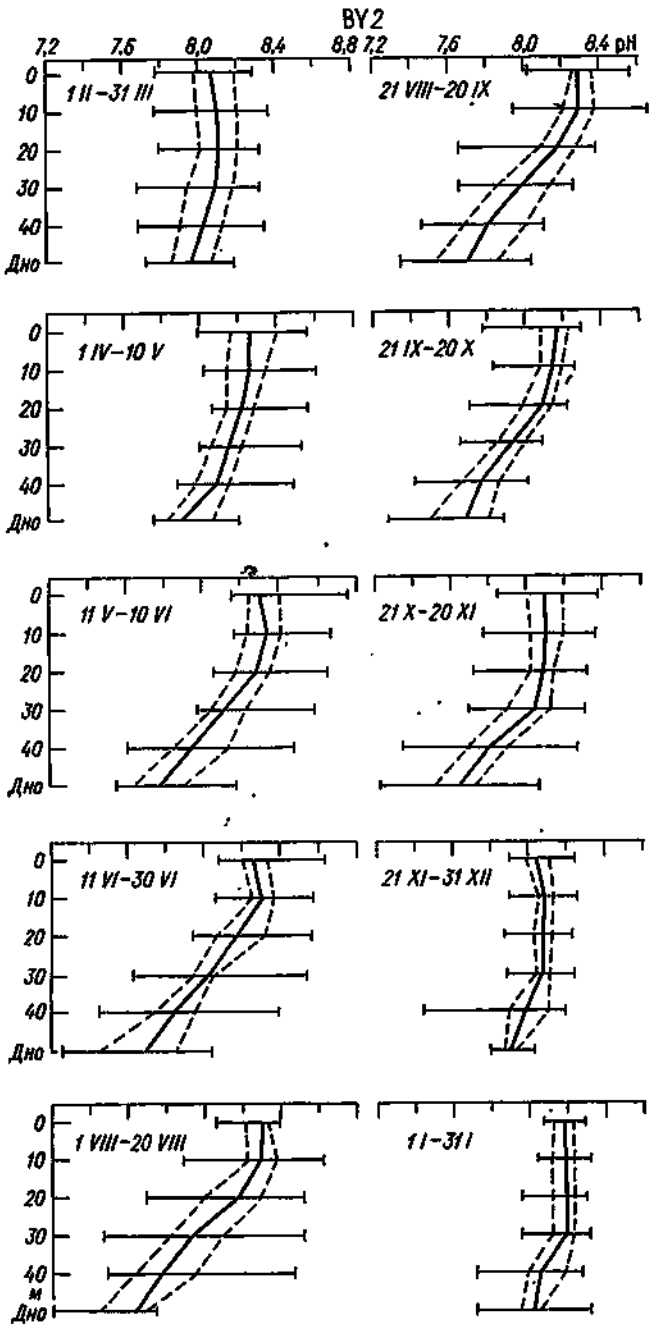


Рис. 13.5. Вертикальное распределение квартильных оценок значений pH в Готландской (ст. BY 15), Борнхольмской (ст. BY 5) и Арконской (ст. BY 2) впадинах.

лении возрастают и характерные значения pH: в отличие от холодного периода года, наиболее высокий их уровень наблюдается в Готланской впадине, где значения показателей $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$ составляют соответственно 8,3 и 8,6, в Арконской впадине (ст. BY 2) — 8,2 и 8,4, в северной части моря (ст. BY 29) — 8,2 и 8,5. Общий размах значений для данного периода в слое 0—10 м составляет 8,0—8,7, в Арконской впадине минимальные значения ниже — 7,8.

Возрастание pH от юга к центру особенно показательно для июня — периода летнего максимума (см. рис. 13.4). Различия характеристик для Арконской и Готландской впадин согласуются с аналогичными различиями для максимума годового хода насыщения поверхностного слоя кислородом и с оценками первичной продукции (см. пп. 10.2.4 и 12.2.2). Это дает основание предполагать, что причиной пространственных различий pH в фотическом слое в летний период являются различия в интенсивности фотосинтетической деятельности. Пространственные различия, аналогичные рассмотренным выше, характеризуют и статистические показатели для второго летнего максимума (см. рис. 13.3 и 13.4).

Представленные на рис. 13.4 данные иллюстрируют также пространственные различия, связанные со сдвигом временны́х границ сезонных изменений pH в направлении с юга на север.

Внутригодовая изменчивость с размахом, не меньшим, чем в фотической зоне, характерна и для остальной части ВКС, где направленность сезонных изменений, как отмечалось, противоположна по отношению к наблюдаемым на поверхности и годовой ход pH трансформируется с глубиной (см. рис. 13.2 и 13.3). Различия процессов, определяющих изменения содержания двуокиси углерода в летний период в фотической зоне и под ней, формируют и сезонную динамику вертикального распределения pH в верхнем слое (см. рис. 13.5).

В начальной стадии сезонных изменений — в течение весенней вспышки фитопланктона — убыль двуокиси углерода и повышение pH происходят во всей толще верхнего слоя до галоклина, поскольку зарождающийся термоклин не препятствует вертикальному обмену (см. рис. 13.2 и 13,5). Однако после вспышки уменьшение содержания CO_2 из-за затрат в процессе фотосинтеза не проявляется глубже 30 м в связи с компенсацией убыли за счет биохимической деструкции органического вещества.

По окончании вспышки фитопланктона и массового его отмирания накопление и минерализация образующихся взвешенных веществ происходят главным образом на границе верхнего слоя с галоклином. Эти процессы приводят к увеличению содержания CO_2 и снижению значений pH в слое от 40 м до галоклина уже в июне (в фотическом слое в это время наблюдается максимум pH). В июле, когда увеличивающийся термоклин в значительной мере препятствует вертикальному обмену, регенерация CO_2 происходит, по-видимому, главным образом в фотическом слое и на его границе с термоклином. В результате в холодном промежуточном слое Готландской впадины содержание двуокиси углерода стабилизируется на уровне максимума, а pH — на уровне минимума. Эти значения сохраняются вплоть до осеннего заглубления термоклина и его последующего разрушения. По мере усиления осенней конвекции значения pH в слое 30—60 м увеличиваются за счет перемешивания с водами верхнего слоя, обедненными двуокисью углерода.

Таким образом, в отличие от фотической зоны, в слое 30—50 м Готландской котловины (станции BY 9 и BY 15) (см. рис. 13.2) и 20—40 м в северной части моря (ст. BY 29) пониженные значения pH характерны для летнего периода, начиная с июля, а повышенные — для осенне-зимних условий с последующим максимумом в период весенней вспышки фитопланктона. На границе верхнего слоя с галоклином — 60 м в Готландской впадине и 50—60 м в северной части моря — весенний максимум pH не выделяется. Аналогичный годовой ход pH характерен для слоя 30 м — дно Арконской впадины (см. рис. 13.2, ст. BY 2). В Борнхольмской

впадине (ст. BY 5) в годовом ходе pH на глубине 40—50 м проявляется влияние адвекции летних вод по этому слою, в результате которой вместо «плато» низких значений наблюдается их уменьшение до четко выраженного внутригодового минимума в сентябре—октябре (см. рис. 13.2).

Следует обратить внимание на незначительный в количественном отношении, но важный эффект увеличения значений pH в течение зимнего сезона, наблюдаемый для всей толщи верхнего слоя Готландской впадины (см. рис. 13.2, ст. BY 15) и менее четко выраженный для остальных районов моря, и отсутствие его для Арконской впадины (ст. BY 2). Причины этих изменений и различий рассматриваются далее в п. 13.4.

Размах годового хода pH в слое 30—50 м увеличивается с глубиной: наименьшее его значение отмечается для горизонта 30 м, нижней границы термоклина, и по разности средних показателей для интервалов максимума и минимума годового хода составляет 0,20—0,25, а наибольшее — на глубинах, соответствующих границе верхнего слоя и галоклина: 0,45 в Борнхольмской впадине (50 м), 0,40 в Готландской (60 м), 0,64 в северной части моря (60 м). В глубинном слое Арконской впадины размах годовых колебаний также превышает характерный для фотического слоя и составляет на глубине 40 м и у дна 0,30 и 0,36 соответственно. В холодном промежуточном слое глубоководных бассейнов размах годового хода pH несколько меньше, чем в фотическом слое: около 0,30 для станций BY 5 и BY 9 и 0,22 и 0,24 для станций BY 15 и BY 29 соответственно. Увеличение размаха годового хода вблизи галоклина в глубоководной части моря и у дна Арконской впадины до значений, превышающих или сопоставимых с его значениями в фотическом слое, связано с усилением влияния биохимической деструкции в зонах накопления органических взвешенных веществ.

Обобщение статистических данных, характеризующих диапазон колебаний pH под фотическим слоем, как и для самого слоя, целесообразно дать для интервалов повышенных и пониженных значений.

Диапазон преобладающих значений pH, характеризуемый показателями $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$, в период повышенных значений в слое 30—50 м (в Борнхольмской впадине 30—40 м) составляет 8,1—8,3. При этом имеется тенденция уменьшения значений с глубиной, которая отражается в значениях верхнеквартильного показателя. Вблизи галоклина указанные показатели составляют повсеместно 7,9—8,1 (см. рис. 13.2 и 13.5) и лишь в северной части моря — 8,0—8,2. Общий размах pH в слое 30—60 м в период повышенных значений, наблюдаемых в осенне-зимние месяцы, составляет 7,6—8,6.

Летом, когда pH под фотическим слоем повсеместно снижается, становятся более значительными и уменьшение его с глубиной, и пространственные различия. В период минимума pH в холодном промежуточном слое диапазон пребладающих значений ($x_{0,25}$—$x_{0,75}$) составляет 7,9—8,1 в верхней его части, снижается до 7,8—8,0 в нижней и до 7,5—7,9 на границе с галоклином (в северной части моря — до 7,4—7,7, у дна Арконской впадины — от 7,5 до 7,8). Общий размах снижается до 7,2—8,0 на глубинах с наименьшими значениями pH.

Изменения статистических характеристик pH в течение года в толще верхнего слоя в целом представляют ансамбли вертикальных профилей (см. рис. 13.5). Вертикальное распределение pH, однородное в зимние месяцы, очень четко отражает влияние развития и разрушения термической структуры на фоне снижения pH с глубиной, обусловленного преобладанием накопления двуокиси углерода в слое между термо- и галоклином, где аккумулируется значительная часть органических взвешенных веществ.

13.2.3. Динамика pH в глубинном слое

Комплекс факторов, определяющих динамику pH в глубинном слое Балтийского моря, по-видимому, более сложен, чем в верхнем, поскольку включает наряду с процессами, протекающими в водной толще, специфические процессы на поверхности донных отложений и на границе раздела вода—грунт. В их числе — биохимическая деструкция органического вещества в кислородных и аноксических условиях, сопровождающаяся накоплением двуокиси углерода, изменение состояния физико-химических равновесий, гидродинамические процессы. При этом изменения pH являются как индикатором сдвигов в соотношении этих факторов, так и условием, вызывающим изменения состояния равновесных систем, в частности «нижней» части карбонатного равновесия (13.1).

Относительно небольшие значения pH в сочетании с недостаточной точностью наблюдений, известной исследователям карбонатной системы [16], осложняют изучение динамики этого показателя, важного для получения информации о состоянии процессов в глубинном слое Балтийского моря.

Представленные в данном разделе результаты статистического анализа позволили выделить некоторые наиболее устойчиво проявляющиеся особенности режима pH в глубинных водах моря, ранее не освещенные в литературе. Это относится к пространственному распределению pH, особенностям межгодовой изменчивости, сезонной изменчивости в галоклине и активном глубинном слое.

Многолетние статистические характеристики (табл. 13.1) не подтверждают мнение о стабильности режима pH в глубинном слое [19], так как межгодовая изменчивость здесь, по-видимому, не меньше, чем в верхнем слое.

Данные табл. 13.1 иллюстрируют довольно однородное вертикальное распределение pH в толще вод ниже галоклина с небольшим монотонным уменьшением значений с глубиной. Это не исключает появления каких-либо отклонений, встречающихся в конкретных наблюдениях, как, например, слабого минимума pH ниже галоклина [54]. В отличие от этого эффекта, отмеченное Нерингом небольшое повышение значений pH у дна, наблюдаемое как в аноксических условиях, так и при наличии кислорода [54], для некоторых районов, и в частности для Восточной Готландской котловины, является характерным. Об этом свидетельствуют повышенные значения всех статистических характеристик у дна как в южной части котловины (ст. BY 9), где отсутствие кислорода встречается редко, так и в Готландской впадине (ст. BY 15), где анаэробные условия преобладают (см. п. 12.3.1). Данный эффект, однако, не является характерным для Борн-

Таблица 13.1

Многолетние статистические характеристики pH в глубинном слое

Горизонт, м	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
			Ст. BY 5				
60	7,65	7,02	7,51	7,66	7,80	8,27	262
70	7,49	6,95	7,34	7,49	7,63	8,19	185
80	7,42	6,93	7,29	7,41	7,56	8,22	262
Дно	7,41	7,03	7,29	7,40	7,55	8,17	225
			Ст. BY 9				
60	7,83	7,01	7,68	7,84	7,98	8,49	197
70	7,45	7,00	7,31	7,42	7,64	8,22	128
80	7,37	6,98	7,23	7,37	7,51	8,21	196
90	7,35	6,96	7,23	7,35	7,56	8,19	191
100	7,34	6,97	7,25	7,35	7,44	8,17	195
Дно	7,37	6,95	7,29	7,35	7,48	8,16	114
			Ст. BY 15				
60	7,83	7,07	7,65	7,83	8,01	8,29	252
70	7,48	6,91	7,30	7,48	7,68	8,25	170
80	7,32	6,83	7,20	7,32	7,46	8,12	247
90	7,28	6,84	7,18	7,27	7,39	7,92	240
100	7,26	6,84	7,17	7,26	7,37	7,77	240
125	7,24	6,86	7,14	7,24	7,33	7,57	158
150	7,23	6,88	7,14	7,23	7,32	7,56	222
175	7,22	6,88	7,12	7,23	7,32	7,54	144
200	7,25	6,88	7,15	7,25	7,34	7,55	224
220	7,27	6,88	7,17	7,27	7,36	7,58	174
Дно	7,29	6,89	7,21	7,29	7,39	7,63	131
			Ст. BY 29				
60	7,79	7,20	7,57	7,82	8,03	8,39	91
70	7,52	7,02	7,26	7,47	7,73	8,21	91
80	7,32	6,92	7,16	7,27	7,43	8,17	88
90	7,29	6,99	7,17	7,32	7,38	7,67	55
100	7,23	6,86	7,12	7,20	7,33	7,54	88
125	7,23	6,86	7,13	7,21	7,33	7,49	88
150	7,23	6,87	7,14	7,22	7,34	7,50	87
Дно	7,22	6,82	7,12	7,20	7,33	7,52	86

хольмской впадины (ст. BY 5) и северной части моря (ст. BY 29) (см. табл. 13.1). Более подробное рассмотрение этого явления и его причин приведено далее.

Статистические данные свидетельствуют о типичных пространственных различиях — снижении pH в глубинных водах в направлении от южной части моря к центральной: значения показателей $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$ в слое 70 м — дно Борнхольмской впадины (ст. BY 5) составляют соответственно 7,30 и 7,63, в слое 80 м — дно юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) — 7,23 и 7,50, в толще вод от 90 м Готландской впадины — 7,14 и 7,40 (см. табл. 13.1). При сохранении этих же особенностей пространственных различий в галоклине диапазон колебаний pH, характеризуемый показателями $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$, несколько шире, чем в глубинном слое, что отражает большую изменчивость условий.

Временная изменчивость pH в глубинных водах моря не исследована. В обобщении данных наблюдений 1957—1962 г. отмечается не только отсутствие сезонных изменений, но и независимость значений от обновлений глубинного слоя, связанных с вторжениями каттегатских вод [19].

Исследование динамики на основе статистического анализа показало наличие достаточно четко выраженных сезонных колебаний pH в глубинных водах Борнхольмской впадины и юго-восточной части Готландской котловины, а также в галоклине и активном глубинном слое Готландской впадины и северной части моря (рис. 13.6). Общей особенностью этих колебаний при различии их характера является согласованность с соответствующими изменениями содержания кислорода, периоды повышения pH совпадают с интервалами сравнительно лучших кислородных условий по многолетним статистическим данным, и наоборот. Это дает основание для объяснения характера сезонных изменений pH влиянием факторов, формирующих и годовой ход кислорода в глубинных водах рассматриваемых районов.

Согласованность изменений pH и содержания кислорода в целом в водной толще является естественной и проявляется в вертикальном распределении этих показателей. Сезонные изменения в глубинном слое Борнхольмской впадины и юго-восточной части Готландской котловины формируются соответствующими изменениями адвекции вод. В зимний период повышение pH связано с притоками холодных аэрированных вод с более низким содержанием двуокиси углерода, поступающих в Борнхольмскую впадину (ст. BY 5) из глубинного

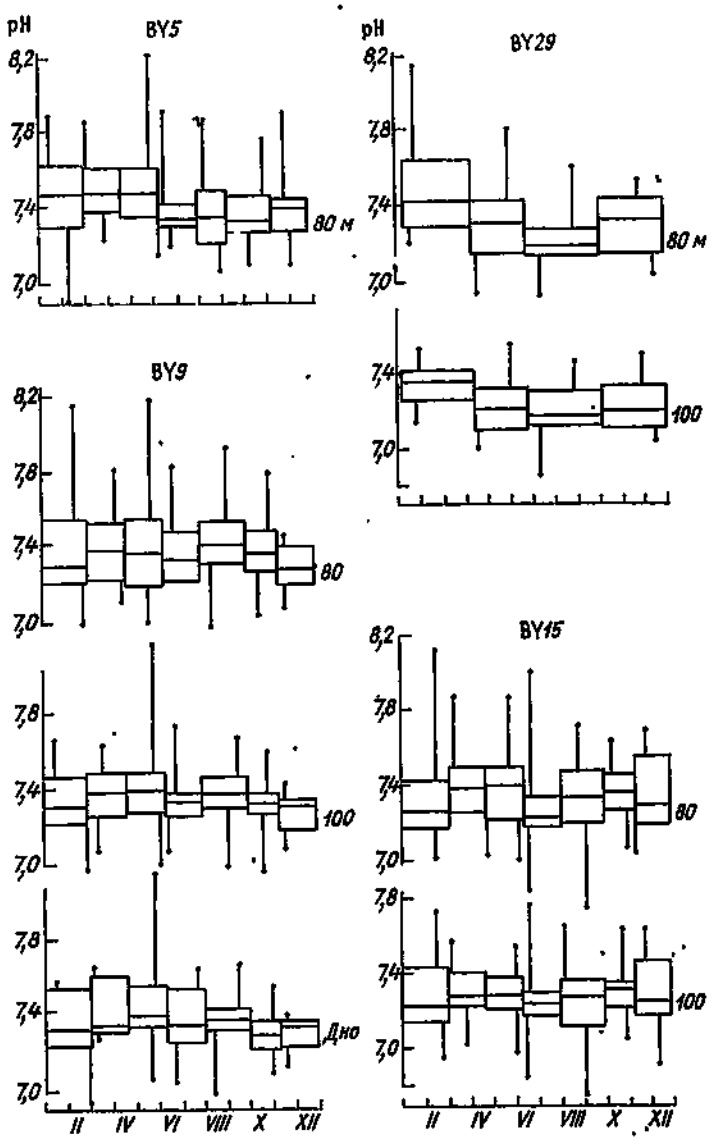


Рис. 13.6. Годовой ход значений pH в глубинном слое по данным квартильного анализа для базовых станций.

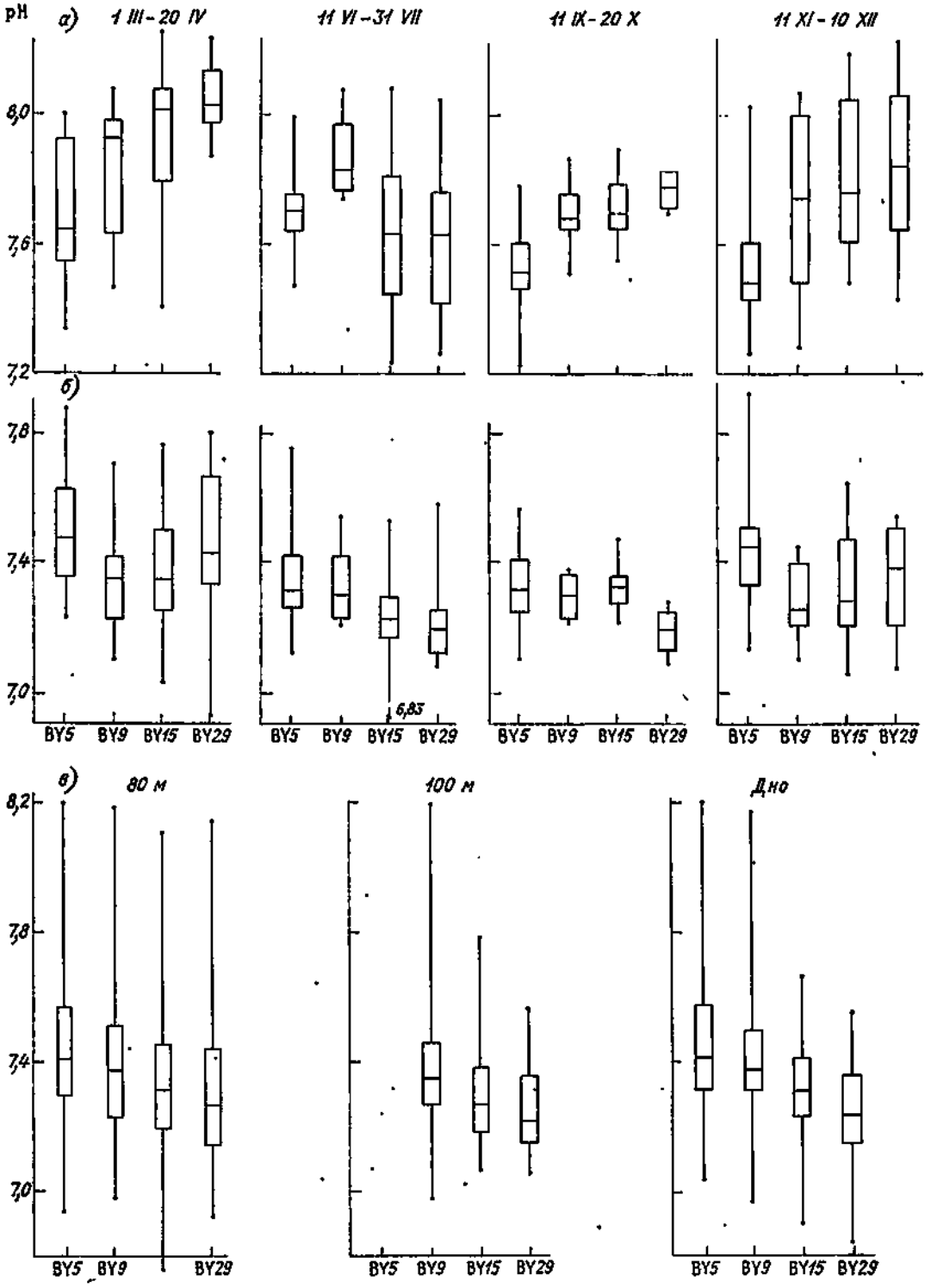


Рис. 13.7. Квартильные оценки значений pH в глубинном слое на восточном продольном разрезе для базовых станций для характерных фаз годового цикла.

а — на глубине 60 м; *б* — на глубине 80 м; *в* — по обобщенным данным всех наблюдений 1958—1986 гг. на глубинах 80, 100 м и у дна.

слоя Арконской впадины (ст. BY 2) в результате усиления входных потоков в Датских проливах. В Арконской впадине с января по апрель в глубинных водах значения pH максимальны (см. рис. 13.2). Притоки этих вод по галоклину Борнхольмской впадины формируют и наибольшие значения pH с марта по май на глубине 70 м (см. рис. 13.2). Повышенные значения pH в придонном слое этого района в январе—феврале (см. рис. 13.6) связаны еще и с влиянием притоков по дну, вызванных осенне-зимними штормовыми нагонами в проливах.

Связанное с аналогичным влиянием адвекции вод повышение pH в галоклине и глубинном слое юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) наблюдается с марта по сентябрь (см. рис. 13.6). Наряду с этим фактором оказывает влияние и зимняя конвекция, с которой связано, по-видимому, повышение pH на глубине 80 м, нередко наблюдаемое в январе—феврале.

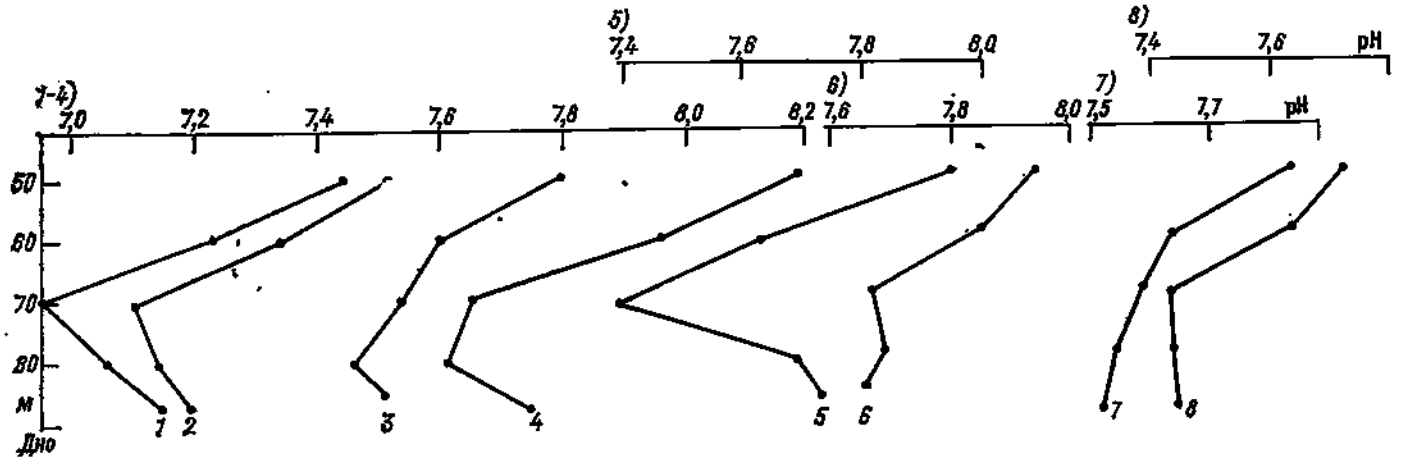


Рис. 13.8. Изменения значений pH в слое 50 м — дно Борнхольмской впадины (ст. BY 5) по мере обновления глубинных вод в период 1968—1969 гг.:

1) 3 IX 1968 г.; *2*) 5 XI 1968 г.; *3*) 22 I 1969 г.; *4*) 19 III 1969 г.; *5*) 15 IV 1969 г.; *6*) 19 VI 1969 г.; *7*) 2 IX 1969 г.; *8*) 18 X 1967 г.

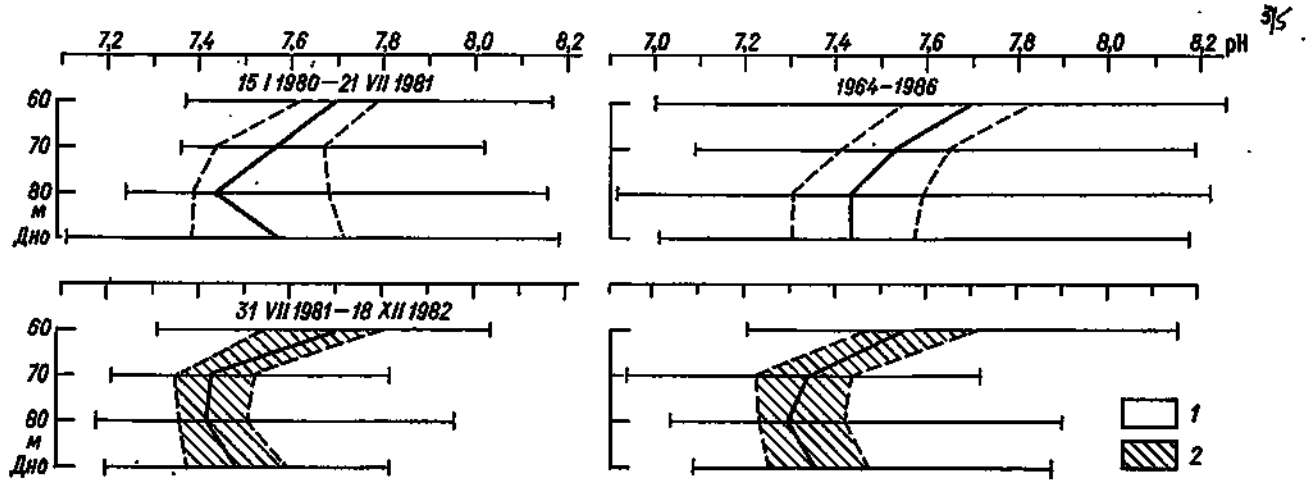


Рис. 13.9. Вертикальное распределение квартильных оценок значений pH в глубинном слое Борнхольмской впадины при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна для цикла 1980—1982 гг. и по обобщенным данным 1964—1986 гг.

В Готландской впадине изменения pH в галоклине (на глубине 70 м) в большей степени определяются значительными межгодовыми и многолетними изменениями стратификации глубинных вод. При этом в изменениях статистических характеристик на горизонтах 80—100 м довольно четко выражен повышенный уровень значений pH с марта по октябрь—ноябрь (в ходе медианных и нижнеквартильных значений).

Для всех рассмотренных районов характерно снижение pH в слое 80—100 м в первой половине лета — в июне—июле. Этот эффект, возможно, вызван усилением процессов биохимической деструкции органических взвешенных веществ, обусловленных поступлением их на эти глубины по окончании весенней вспышки цветения фитопланктона. Попадание их в галоклин и дальнейший перенос вглубь, по-видимому, более интенсивны до максимального развития термоклина, перекрывающего этот поток во второй половине лета.

Снижение значений pH, которое происходит в глубинном слое Борнхольмской впадины в августе—декабре, в юго-восточной части Готландской котловины с октября по февраль, а в Готландской впадине с ноября по февраль, связано с адвекцией теплых вод, обедненных кислородом и обогащенных двуокисью углерода.

В северной части моря сезонные изменения pH, как и других показателей, вызваны исключительно влиянием осенне-зимней конвекции. Глубина осеннего конвективного перемешивания ограничена галоклином, а эффективность зимних процессов вертикального обмена столь высока, что изменяет состояние вод в глубинном слое почти до дна.

Различия факторов, определяющих сезонную динамику pH в промежуточном слое Балтики, формируют и сезонные различия пространственного распределения pH (рис. 13.7). Так, для зоны, граничащей с верхним слоем, в осенних и зимних условиях наблюдается возрастание pH в направлении от Борнхольмской впадины к северной части моря, отражающее усиление влияния конвективного перемешивания (см. рис. 13.7 *а*). В летних условиях распределение аналогично характерному для глубинных вод — уменьшение pH в направлении к северу. Исключение составляет Борнхольмская впадина, где более высокий уровень значений pH в летних условиях на глубинах 50—60 м (см. рис. 13.2

вости отражается в соответствии области повышенных значений pH начальной фазе циклов, а области пониженных значений — их окончанию. Над придонным слоем размах сезонных изменений нередко соизмерим с вызванными обновлениями (см. рис. 13.10, горизонт 60 м).

За пределами Борнхольмской впадины данный характер изменчивости pH в глубинном слое в целом сохраняется, но проявляется не столь четко. В юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) повышенные значения pH соответствуют начальным отрезкам циклов, а пониженные — их окончанию, хотя экстремальные значения не всегда расположены в этих интервалах (рис. 13.11). Общая направленность уменьшения pH после обновлений глубинных вод заметно сглаживается за счет сезонных колебаний. Причиной некоторого увеличения многолетних статистических характеристик у дна, отмеченного выше (см. табл. 13.1), является, по-видимому, рассмотренная при анализе вертикального распределения кислорода в этом районе адвекция каттегатских вод по придонному слою и циркуляция над ними «старых» вод, поступающих из Готландской впадины противотечением [37]. С этой же причиной связаны, вероятно, и более высокие значения сезонных характеристик у дна по сравнению с характеристиками для горизонта 100 м для интервала повышенных значений pH в годовом ходе (см. рис. 13.6).

В Готландской впадине циклический характер изменчивости сглажен еще более (см. рис. 13.10). Поступление свежих вод в придонный слой в большинстве случаев не проявляется в повышении pH, особенно, когда обновление происходит после длительных анаэробных условий. Однако сразу после притоков при сохранении кислорода и низких концентрациях сероводорода происходит снижение pH и лишь при более развитых анаэробных условиях значения возрастают. Характерно, что при длительной стагнации в Готландской впадине в течение последних 15 лет уровень значений pH стабилизируется.

Естественно, что при таком характере изменений pH в Готландской впадине, в отличие от Борнхольмской, значения статистических характеристик для анаэробных условий не ниже, чем для аэробных (см. табл. 13.2). В вертикальном распределении повышение значений pH в придонном слое (150 м — дно) в направлении ко дну типично и в том, и в другом случае (см. табл. 13.2).

В активном глубинном слое Готландской впадины (см. рис. 13.10, горизонт 100 м), где анаэробные условия практически не наблюдаются, характерная для межгодовых циклов изменчивость вы-

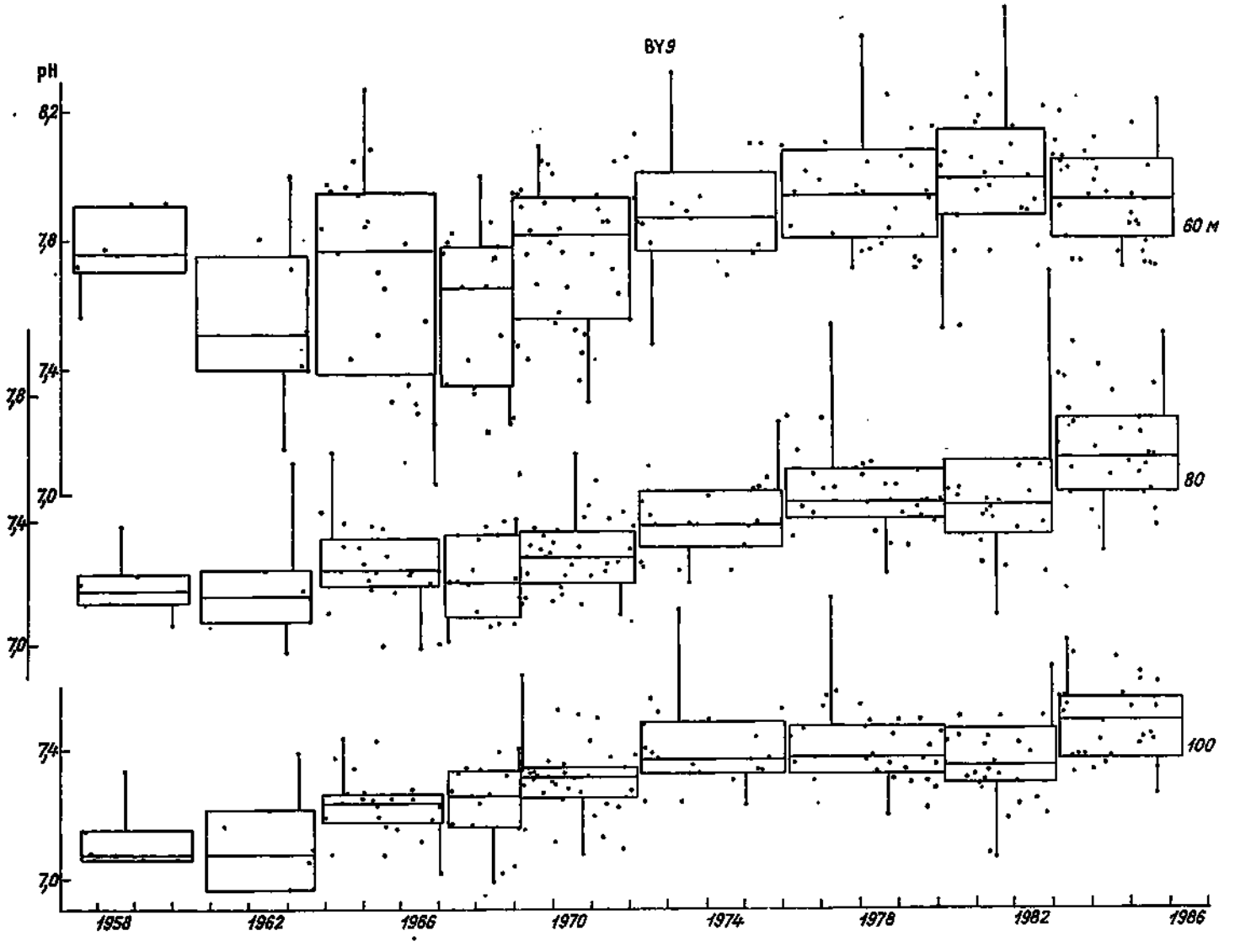


Рис. 13.11. Квартильные оценки значений pH в глубинном слое юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и северной части моря (ст. BY 29).

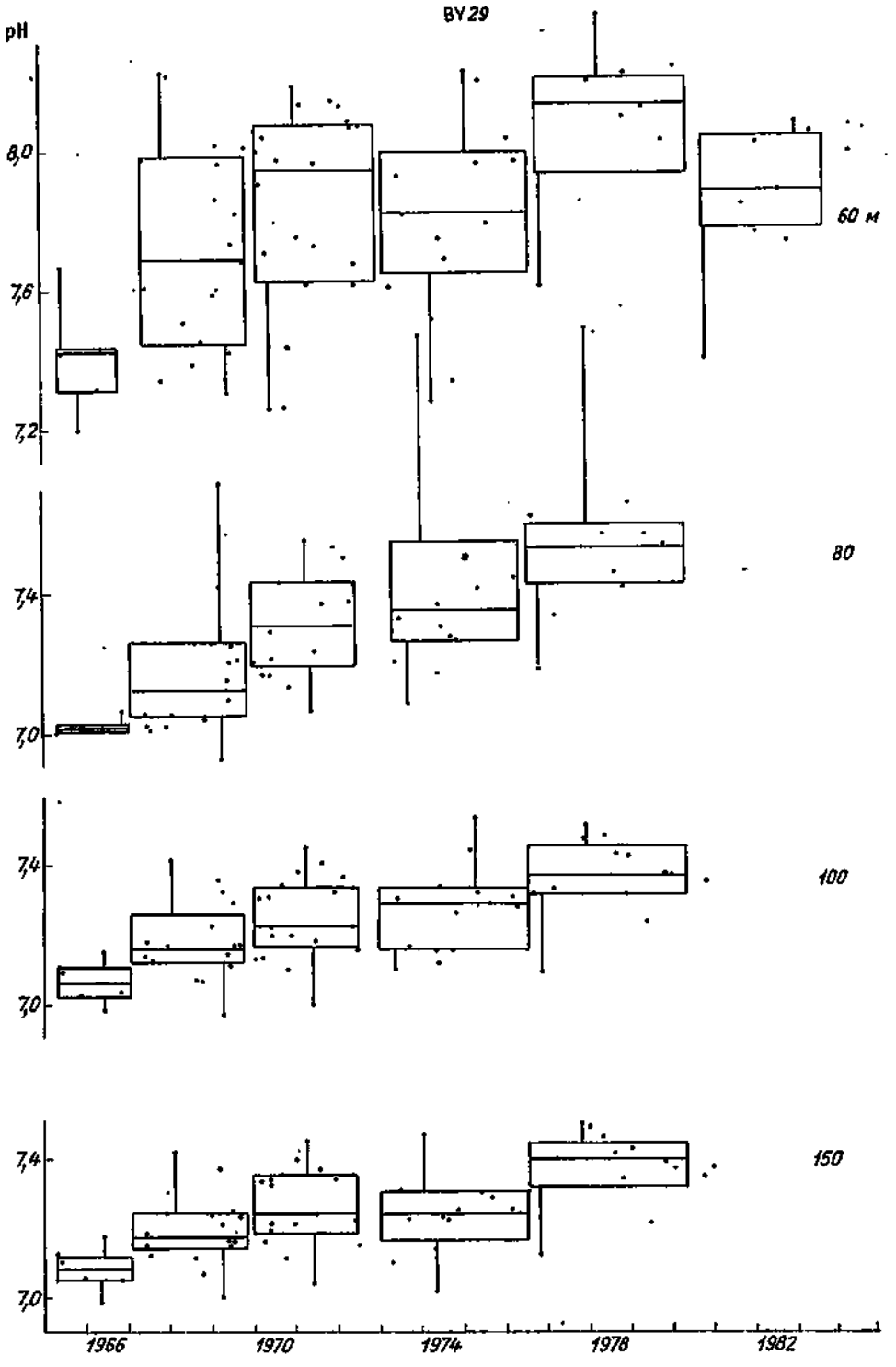


Рис. 13.11.

ражена более четко, чем в придонном: в начальных их фазах наблюдаются повышенные значения pH, а в заключительных — пониженные, если в этом интервале не происходит адвекции значительных притоков по данному слою. Влияние последних демонстрирует повышение pH в последнем цикле, когда мощный приток 1983 г. поступил в Готландскую впадину по активному глубинному слою, не изменив условий в придонных водах.

В изменчивости pH в глубинном слое северной части моря (см. рис. 13.11, ст. BY 29) циклические межгодовые колебания, обусловленные обновлениями вод, выражены еще слабее, чем в Готландской впадине, хотя анаэробные условия здесь встречаются значительно реже. Обновления глубинных вод сопровождаются, как правило, повышением pH, но в колебаниях значений в последующий период не проявляется какой-либо четкой направленности. В этом районе значительное влияние оказывает вертикальное перемешивание и, в частности, формирующая сезонные колебания pH зимняя конвекция (см. рис. 13.6), проникающая до 120 м. Влия-

Таблица 13.3

Статистические характеристики pH на станциях BY 5, BY 9, BY 15 и BY 29 по циклам межгодовой изменчивости у дна и на глубинах 100 и 80 м

Характеристика	Дно *				100 м			80 м		
	BY 5	BY 9	BY 15	BY 29	BY 9	BY 15	BY 29	BY 9	BY 15	BY 29
					1961—1964 гг.					
T	7,28	7,07	7,04	—	7,09	7,10	—	7,16	7,23	—
$x_{0,25}$	7,22	7,05	6,99	—	6,97	7,03	—	7,07	7,13	—
Me	7,25	7,07	7,03	—	7,08	7,11	—	7,16	7,19	—
$x_{0,75}$	7,40	7,10	7,12	—	7,22	7,13	—	7,23	7,40	—
$x_{мин}$	7,19	6,95	6,90	—	6,97	6,93	—	6,98	7,02	—
$x_{макс}$	7,55	7,38	7,29	—	7,40	7,26	—	7,57	7,61	—
					1964—1967 гг.					
T	7,27	7,31	7,19	7,10	7,23	7,17	7,09	7,25	7,19	7,08
$x_{0,25}$	7,19	7,21	7,16	7,08	7,18	7,09	7,03	7,18	7,13	7,02
Me	7,26	7,33	7,17	7,10	7,24	7,17	7,10	7,23	7,19	7,10
$x_{0,75}$	7,38	7,35	7,26	7,12	7,27	7,23	7,11	7,34	7,25	7,10
$x_{мин}$	7,13	6,98	7,05	6,98	7,02	6,96	6,99	6,98	7,03	7,01
$x_{макс}$	7,83	7,51	7,37	7,13	7,45	7,37	7,15	7,60	7,28	7,15
					1967—1969 гг.					
T	7,30	7,30	7,23	7,18	7,27	7,18	7,18	7,21	7,20	7,19
$x_{0,25}$	7,15	7,26	7,15	7,13	7,17	7,05	7,12	7,08	7,12	7,11
Me	7,34	7,29	7,23	7,17	7,27	7,20	7,17	7,20	7,19	7,20
$x_{0,75}$	7,35	7,35	7,29	7,24	7,35	7,28	7,26	7,34	7,28	7,26
$x_{мин}$	7,12	7,12	6,89	6,86	7,00	6,75	6,86	7,00	6,76	6,92
$x_{макс}$	7,44	7,43	7,49	7,42	7,41	7,48	7,42	7,39	7,45	7,72
					1969—1972 гг.					
T	7,47	7,35	7,35	7,22	7,32	7,32	7,24	7,27	7,30	7,29
$x_{0,25}$	7,36	7,30	7,28	7,16	7,26	7,23	7,17	7,19	7,23	7,19
Me	7,49	7,33	7,35	7,18	7,32	7,32	7,23	7,27	7,27	7,26
$x_{0,75}$	7,55	7,43	7,42	7,35	7,36	7,41	7,34	7,36	7,41	7,43
$x_{мин}$	7,22	7,13	6,88	7,04	7,08	6,90	7,00	7,09	6,85	7,06
$x_{макс}$	7,84	7,62	7,51	7,44	7,64	7,59	7,45	7,59	7,76	7,55
					1972—1976 гг.					
T	7,48	7,41	7,35	7,25	7,39	7,33	7,27	7,38	7,43	7,38
$x_{0,25}$	7,34	7,35	7,31	7,19	7,33	7,27	7,16	7,30	7,27	7,27
Me	7,45	7,38	7,35	7,25	7,37	7,33	7,29	7,37	7,43	7,35
$x_{0,75}$	7,66	7,53	7,40	7,32	7,49	7,38	7,33	7,48	7,57	7,55
$x_{мин}$	7,18	7,29	7,18	6,82	7,23	7,23	7,10	7,19	7,21	7,08
$x_{макс}$	8,01	8,16	7,58	7,45	8,17	7,53	7,54	8,21	7,87	8,15
					1976—1980 гг.					
T	7,53	7,48	7,46	7,40	7,40	7,41	7,38	7,45	7,44	7,51
$x_{0,25}$	7,33	7,38	7,36	7,34	7,34	7,34	7,32	7,39	7,36	7,42
Me	7,56	7,49	7,48	7,40	7,38	7,41	7,37	7,44	7,44	7,53
$x_{0,75}$	7,65	7,56	7,52	7,44	7,49	7,49	7,46	7,54	7,53	7,56
$x_{мин}$	7,12	7,25	7,15	7,12	7,20	7,10	7,09	7,21	7,12	7,17
$x_{макс}$	7,88	7,84	7,53	7,52	7,88	7,64	7,51	7,99	7,91	8,17
					1980—1983 гг.					
T	7,45	7,37	7,30	7,26	7,37	7,27	7,23	7,45	7,33	7,36
$x_{0,25}$	7,33	7,23	7,24	7,21	7,30	7,20	7,19	7,34	7,25	7,29
Me	7,42	7,34	7,29	7,23	7,36	7,28	7,24	7,44	7,32	7,34
$x_{0,75}$	7,61	7,56	7,36	7,36	7,47	7,33	7,35	7,58	7,42	7,45
$x_{мин}$	7,10	7,04	7,13	7,15	7,06	6,99	7,14	7,07	7,05	7,26
$x_{макс}$	8,17	7,59	7,44	7,37	7,66	7,72	7,35	8,16	8,12	7,58
					1983—1986 гг.					
T	7,39	7,44	7,26	—	7,49	7,38	—	7,58	7,58	—
$x_{0,25}$	7,31	7,33	7,23	—	7,38	7,27	—	7,47	7,46	—
Me	7,37	7,44	7,25	—	7,51	7,38	—	7,58	7,59	—
$x_{0,75}$	7,50	7,54	7,30	—	7,57	7,47	—	7,70	7,68	—
$x_{мин}$	7,20	7,19	7,12	—	7,26	7,23	—	7,28	7,35	—
$x_{макс}$	7,88	7,67	7,39	—	7,74	7,77	—	7,97	8,02	—

* Глубина придонного горизонта на ст. BY 5 более 85 м, на ст. BY 9 более 116 м, на ст. BY 15 225 м, на ст. BY 29 более 150 м.

ние анаэробных условий проявляется по-разному — в течение 1969 г. значения pH повысились, а в 1980—1983 гг. наблюдалось снижение pH.

Как показывают статистические характеристики изменений в выделенных циклах межгодовой изменчивости (табл. 13.3), значения pH в глубинном слое северной части моря ниже, чем в центральной. Многолетние характеристики (см. табл. 13.1) не отражают эти различия, вероятно, из-за более коротких рядов наблюдений для ст. BY 29. Рассчитанные для выделенных циклов статистические данные подтверждают общие закономерности про-

странственного распределения pH в глубинных водах — небольшое, но четкое уменьшение значений в направлении с юго-запада до северо-восточной части моря. Пространственные различия более значительны для придонного слоя (см. также рис. 13.7).

13.2.4. Многолетняя изменчивость pH

В материалах «Второй периодической оценки состояния морской среды Балтийского моря» [411] показано наличие значительных линейных трендов, характеризующих увеличение средних годовых значений pH в течение 1965—1987 гг. для глубинного слоя и поверхностных вод (0—10 м) большинства районов Балтийского моря, за исключением Арконского бассейна. В некоторых районах были обнаружены аналогичные тренды и для вод промежуточного слоя.

В качестве причины тенденций возрастания pH в поверхностном слое предполагается возможное влияние эвтрофикации (см. гл. 15), поскольку увеличение первичной продукции может сопровождаться более интенсивной ассимиляцией двуокиси углерода. Причины положительных трендов pH в глубинных водах менее понятны, так как влияние эвтрофикации должно привести к увеличению содержания двуокиси углерода вследствие возрастания количества поступающих из верхнего слоя органических взвешенных веществ и соответствующей интенсификации биохимической деструкции. Тренд pH должен быть в таком случае противоположным обнаруженному.

Для объяснения была предложена другая схема процессов: увеличение продукции и седиментации органического вещества вызывает увеличение потребления кислорода для его деструкции и создает условия для денитрификации, которая сопровождается образованием ионов OH^- и NH_4^+, уменьшением концентраций ионов водорода и возрастанием значений pH. В качестве другой возможной причины рассматривается вымывание карбонатных пород кислотными дождями, сопровождающееся высвобождением двуокиси углерода в атмосферу и выделением окисей щелочно-земельных металлов в воду [141, 411].

В качестве причин тенденций повышения pH в промежуточном слое предполагаются те же, что выдвигались для объяснения улучшения кислородных условий в этих водах — усиление адвекции и улучшение вертикального обмена через галоклин благодаря уменьшению вертикальных градиентов солености и значительному заглублению галоклина [141].

Результаты анализа многолетней изменчивости pH, проведенного в данной работе, позволяют уточнить представленные выше сведения и предложить другие объяснения.

Статистические характеристики, рассчитанные для циклов межгодовой изменчивости, выделенных на основе наиболее мощных вторжений каттегатских вод (см. табл. 13.3, рис. 13.10 и 13.11), подтверждают наличие тенденций возрастания pH во всей толще вод ниже галоклина. Сопоставление с соответствующими изменениями статистических характеристик градиентов солености на границах галоклина (см. горизонты 60—70 м на рис. 12.41 и 60—80 м на рис. 12.42) показывает наличие качественной связи между изменениями pH и этими данными, отражающими условия вертикального обмена через галоклин.

В юго-восточной части Готландской котловины (см. рис. 13.11, ст. BY9) наиболее значительное возрастание pH отмечается с началом цикла, вызванного вторжением каттегатских вод в 1972 г. С этого времени и в течение последующих лет уменьшение вертикальных градиентов солености на горизонтах 60—70 м приводит к улучшению снабжения галоклина кислородом. Усиление вертикального переноса через галоклин должно вызвать и уменьшение содержания двуокиси углерода во всей толще глубинных вод, где парциальное давление CO_2 весьма высоко (см. п. 13.4). При этом наибольшее значение имеет перенос CO_2 на границе галоклина с верхним слоем, где наблюдаются наибольшие вертикальные градиенты pH, в отличие от значительно меньших градиентов на нижней границе (70—80 м).

Улучшение условий вертикального обмена через галоклин, связанное с изменением стратификации, отмечается с 1972 г. во всей глубоководной части моря. Однако данный фактор не является единственным для объяснения увеличения pH в глубинном слое. Мощные вторжения каттегатских вод, существенно обновляющие толщу вод ниже галоклина, также могут быть причиной резкого повышения pH. Так, в Борнхольмской и Готландской впадинах, а также в северной части моря значительное увеличение pH произошло после довольно длительных анаэробных условий в результате мощного вторжения каттегатских вод в 1969 г., вслед за которым последовало меньшее вторжение в 1970 г. (см. рис. 13.10 и 13.11). Последующие изменения условий вертикального обмена после обновления 1972 г., по-видимому, позволили сохранить установившийся уровень содержания двуокиси углерода и pH вплоть до 1980 г., когда аэрация придонного слоя Борнхольмской и Готландской впадин стала ухудшаться.

В ходе данной работы было проведено также исследование многолетних изменений pH на поверхности базовых станций летом, которое подтвердило наличие тенденций повышения pH для всех районов, в том числе и для Арконской впадины в 1964—1982 гг. с последующим некоторым снижением значений в 1983—1985 гг. Анализ данных, полученных для одинаковых сезонных условий, дает лучшие результаты для показателей с большим размахом внутригодовой изменчивости, чем при использовании средних годовых значений, рассчитанных по эпизодическим наблюдениям.

13.3. Щелочность

Щелочность отражает суммарное содержание в морской воде анионов слабых кислот, способных при добавлении сильной кислоты присоединять протон и переходить при этом в недиссоциированную форму. К таким анионам относятся карбонаты, бикарбонаты, бораты, силикаты, фосфаты и др. Под общей щелочностью морской воды понимается количество миллимолей одноосновной сильной кислоты, необходимое для нейтрализации 1 л воды до pH, равного 5,5—5,7 [1]. Выражение общей щелочности имеет следующий вид:

$$Alk_{общ} = [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [H_2BO_3^-] + [HSiO_3^-] + [H_2PO_4^-] + 2[HPO_4^{2-}] + [HS^-] + [OH^-] - [H^+]. \quad (13.4)$$

Разностью $[OH^-]-[H^+]$ обычно пренебрегают, так как при значениях pH, характерных для морской воды, она мала.

Из представленных в (13.4) компонентов главными являются карбонатная и боратная щелочность, а в анаэробных условиях необходимо учитывать также и гидросульфидную. Сумма остальных составляющих близка к погрешности измерений.

Химико-аналитически обычно определяется общая щелочность, в которой щелочность карбонатов и бикарбонатов составляет основную часть, в то время как вклад боратной щелочности не превышает несколько процентов. Карбонатная щелочность может быть определена по разности общей щелочности и рассчитанных по приведенным ниже соотношениям боратной и гидросульфидной составляющих.

Боратная щелочность. Боратную щелочность рассчитывают исходя из двухступенчатой диссоциации борной кислоты

$$H_3BO_3 \rightleftarrows H^+ + H_2BO_3^- \rightleftarrows \rightleftarrows H^+ + HBO_3^{2-}. \quad (13.5)$$

В условиях океана диссоциация по второй ступени пренебрежимо мала, поэтому выражение для смешанной концентрационной константы диссоциации имеет вид

$$K'_B = a_{H^+}[H_2BO_3^-]/[H_3BO_3]. \quad (13.6)$$

Аналитически в воде может быть определена лишь сумма растворенных соединений бора

$$[B] = [H_3BO_3] + [H_2BO_3^-]. \quad (13.7)$$

Исходя из преобразований на основе уравнений (13.6) и (13.7) общее выражение для боратной щелочности имеет вид

$$Alk_{бор} = H_2BO_3^- = [B]/(1 + a_{H^+}/K'_B). \quad (13.8)$$

Для содержания бора в морской воде Бух показал наличие эмпирической связи с хлорностью (в промиллях) [170]:

$$[B] = 2{,}2 \cdot 10^{-5} Cl. \quad (13.9)$$

В соответствии с этим расчет боратной щелочности по Буху производят по формуле

$$Alk_{бор} = 2{,}2 \cdot 10^{-5} Cl/(1 + a_{H^+}/K_B). \quad (13.10)$$

В более поздних исследованиях Дирссен на основе анализа большого массива данных (около 200 проб) нашел для вод Балтийского моря уточненное соотношение содержания бора (млн$^{-1}$ по объему) и хлорности (‰) [204]

$$C_B = 0{,}227\,Cl + 0{,}050. \quad (13.11)$$

Перевод данного соотношения для молярной концентрации соединений бора дает

$$[B] = (0{,}021\,Cl + 0{,}0046)\,10^{-3}. \quad (13.12)$$

В соответствии с этим соотношением для расчета боратной щелочности в данной монографии было использовано более пригодное для балтийских вод выражение

$$Alk_{бор} = (0{,}021\,Cl + 0{,}0046)\,10^{-3}/(1 + a_{H^+}/K'_B). \quad (13.13)$$

Для расчета константы диссоциации K'_B используется какая-либо из формул в общих системах представления концентрационных констант карбонатного равновесия, выраженных в виде зависимостей отрицательных десятичных логарифмов их значений от температуры и солености (хлорности) [1]. В данной монографии использована система констант Эдмонда и Гискеса, в которой используемая для расчета константа диссоциации борной кислоты представлена выражением

$$pK'_B = 2291/T + 0{,}01756\,T - 3{,}3850 - 0{,}32051\,Cl^{1/2}. \quad (13.14)$$

Гидросульфидная щелочность. Поскольку для некоторых глубоководных районов Балтийского моря характерно возникновение анаэробных условий, в данной монографии был проведен расчет гидросульфидной щелочности.

Растворенный в воде сероводород диссоциирует на гидросульфидные HS^- и сульфидные ионы S^{2-}

$$H_2S \overset{K_{1S}}{\rightleftarrows} H^+ + HS^- \overset{K_{2S}}{\rightleftarrows} \rightleftarrows H^+ + S^{2-}. \quad (13.15)$$

При химическом анализе определяется сумма всех форм H_2S, HS^-, S^{2-}, а гидросульфидную щелочность дают ионы HS^-.

Согласно закону действия масс гидросульфидная щелочность может быть представлена выражением

$$HS^- = [\Sigma H_2S]\,a_{H^+}K'_{1S}/(a^2_{H^+} + a_{H^+}K'_{1S} + K'_{1S}K'_{2S}). \quad (13.16)$$

Поскольку K'_{2S} значительно меньше K'_{1S} [$pK_{1S}=6{,}87$ (Головин, 1959); $pK_{2S}=12{,}94$ (Заводнов, Крюков, 1960)], членом $K'_{1S}K'_{2S}$ можно пренебречь [83] и тогда

$$HS^- = [\Sigma H_2S]/(1 + a_{H^+}/K'_{1S}). \quad (13.17)$$

Из-за отсутствия общих выражений зависимости K_{1S} от температуры и солености [1] были использованы установленные Скопинцевым и Максимовой [83] эмпирические зависимости, полученные для черноморских вод.

Зависимость K_{1S} от температуры установлена авторами по значениям pK_{1S}, найденным ими при температуре 20 и 9 °C и хлорности 11—12 ‰, которые составили соответственно 6,87 и 7,23:

$$K_{1S} = (0{,}063\,T + 0{,}02)\,10^{-7}. \quad (13.18)$$

Выражение для концентрационных констант, отражающих влияние хлорности, представлено в виде

$$pK'_{1S} = pK_{1S} - 0{,}4\sqrt{\mu}, \quad (13.19)$$

где μ — ионная сила, связь которой с хлорностью (‰) для черноморских вод выражается зависимостью

$$\mu = 0{,}036\,Cl. \quad (13.20)$$

По данным Кремлинга, по ионному составу вод Балтийского моря (37 проб для 10 станций в открытой части моря) [326] нами была рассчитана зависимость ионной силы от хлорности (‰) для балтийских вод

$$\mu = 0{,}0365\,Cl. \quad (13.21)$$

На основе выражений (13.17), (13.18) и (13.20) получена итоговая формула для расчета K'_{1S}

Таблица 13.4

Статистические характеристики щелочно-хлорного коэффициента по данным 1958—1984 гг.

Горизонт, м	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
			Ст. BY 2				
0	0,35	0,28	0,33	0,35	0,35	0,41	91
10	0,35	0,28	0,34	0,35	0,36	0,41	91
20	0,34	0,18	0,33	0,34	0,35	0,40	90
30	0,32	0,18	0,29	0,33	0,35	0,38	91
40	0,24	0,15	0,21	0,24	0,27	0,37	88
Дно	0,20	0,14	0,19	0,20	0,22	0,25	72
			Ст. BY 5				
0	0,36	0,31	0,35	0,36	0,36	0,43	86
10	0,36	0,31	0,35	0,36	0,37	0,40	88
20	0,36	0,32	0,35	0,36	0,36	0,39	86
30	0,36	0,32	0,35	0,36	0,37	0,39	83
40	0,35	0,28	0,34	0,35	0,36	0,38	84
50	0,33	0,24	0,30	0,33	0,35	0,38	83
60	0,25	0,21	0,23	0,25	0,27	0,35	85
70	0,22	0,19	0,21	0,22	0,23	0,31	80
80	0,21	0,18	0,20	0,21	0,22	0,24	86
Дно	0,20	0,18	0,19	0,21	0,21	0,24	79
			Ст. BY 9				
0	0,37	0,33	0,36	0,37	0,38	0,40	72
10	0,37	0,33	0,36	0,37	0,38	0,40	74
20	0,37	0,33	0,36	0,37	0,38	0,40	75
30	0,37	0,34	0,36	0,37	0,38	0,40	74
40	0,37	0,33	0,36	0,37	0,37	0,40	70
50	0,36	0,31	0,36	0,36	0,37	0,40	70
60	0,35	0,29	0,34	0,35	0,36	0,39	71
70	0,31	0,27	0,30	0,31	0,33	0,39	64
80	0,29	0,26	0,28	0,29	0,30	0,32	68
90	0,28	0,25	0,27	0,28	0,28	0,30	68
100	0,27	0,25	0,26	0,27	0,28	0,31	68
Дно	0,26	0,23	0,25	0,26	0,27	0,29	53
			Ст. BY 15				
0	0,37	0,32	0,36	0,37	0,38	0,43	111
10	0,37	0,32	0,36	0,37	0,38	0,42	111
20	0,37	0,31	0,36	0,37	0,38	0,42	109
30	0,37	0,31	0,36	0,37	0,38	0,41	109
40	0,37	0,31	0,36	0,37	0,38	0,40	111
50	0,37	0,33	0,36	0,37	0,37	0,39	90
60	0,36	0,31	0,35	0,36	0,37	0,40	107
70	0,32	0,03	0,31	0,32	0,34	0,39	91
80	0,30	0,26	0,29	0,30	0,31	0,36	111
90	0,29	0,24	0,28	0,29	0,29	0,34	111
100	0,28	0,24	0,27	0,28	0,28	0,31	110
125	0,26	0,24	0,26	0,26	0,27	0,29	90
150	0,26	0,24	0,25	0,26	0,26	0,28	106
175	0,26	0,24	0,25	0,26	0,26	0,29	90
200	0,25	0,23	0,25	0,25	0,26	0,29	85
220	0,25	0,22	0,25	0,25	0,26	0,28	76
Дно	0,26	0,24	0,25	0,26	0,26	0,29	53
			Ст. BY 29 *				
0	0,38	0,31	0,37	0,38	0,39	0,43	60
10	0,38	0,35	0,37	0,38	0,39	0,41	60
20	0,38	0,33	0,37	0,38	0,39	0,41	60
30	0,38	0,33	0,37	0,38	0,38	0,41	59
40	0,37	0,33	0,37	0,37	0,38	0,40	57
50	0,37	0,31	0,36	0,37	0,38	0,41	57
60	0,36	0,28	0,35	0,36	0,37	0,40	57
70	0,33	0,27	0,31	0,33	0,35	0,38	57
80	0,31	0,27	0,29	0,30	0,32	0,38	57
90	0,29	0,26	0,29	0,29	0,30	0,36	48
100	0,29	0,26	0,28	0,29	0,30	0,32	56
125	0,28	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	56
150	0,27	0,25	0,27	0,27	0,28	0,30	53
Дно	0,27	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	45

* Характеристики рассчитаны по данным 1968—1984 гг.

$$pK'_{1S} = 7 - \log(0{,}063\,T + 0{,}02) - 0{,}4\sqrt{0{,}0365\,Cl}. \qquad (13.22)$$

Гидросульфидная щелочность рассчитывалась по аналитическим данным концентраций сероводорода и уравнениям (13.17) и (13.22).

Общая щелочность как гидрохимический показатель в обычных условиях не только характеризует гидрокарбонатные, карбонатные и боратные компоненты солевого состава, но отражает также и процессы, меняющие состав воды: биологическое удаление или растворение карбоната кальция; поступление материковых вод с соотношением ионов, отличающимся от океанического; образование и таяние льдов. Общая щелочность зависит от солености воды. Для сравнительных целей применяется отношение общей щелочности к хлорности (щелочно-хлорный коэффициент) или удельной щелочности к солености (щелочной коэффициент).

Режим щелочности в Балтийском море изучался в работах Буха, Грипенберг [166, 169, 171, 266] и других, относящихся к этапу исследований до 60-х годов, библиография которых приведена в [14]. Исследование изменчивости и распределения щелочности в Балтийском море по данным наблюдений 1957—1962 гг., охватывающих главные районы Балтийского моря и Финского залива, а также на основе данных финских наблюдений проведено А. Г. Буйневичем [14].

В Балтийском море, как и в других внутренних морях, подверженных сильному влиянию речного стока, щелочные коэффициенты более чем в 2 раза превышают океанические (см. табл. 11.2). Пространственные различия в распределении щелочности и щелочных коэффициентов как показатели распространения вод различного происхождения весьма значительны. Для открытой части моря характерно увеличение щелочности с севера на юг при одновременном уменьшении в этом направлении щелочных коэффициентов, что связано с поступлением с юга североморских вод с относительно высокой щелочностью. У берегов щелочность и щелочные коэффициенты обычно выше, чем в открытой части моря, из-за влияния речного стока и процессов образования и таяния льда в прибрежных областях [14].

Пространственные различия в распределении щелочности зависят также от щелочности рек, впадающих в Балтийское море. Областями с повышенной щелочностью являются предустьевые участки Луги, Венты, Даугавы, Вислы, в то время как в восточных районах Финского залива сток Невы определяет наименьшую щелочность [14].

В данной монографии режим щелочности представлен на основе результатов анализа изменчивости непосредственно самой щелочности, а не щелочно-хлорных коэффициентов, так как они подвержены большим колебаниям из-за различий солености, чрезвычайно значительных в Балтийском море. Однако статистические данные получены и для щелочно-хлорных коэффициентов и представлены в табл. 13.4, а также на рис. 13.12—13.14.

Исследование режима щелочности базируется на результатах статистического анализа относительного небольшого, но однородного с химико-аналитической точки зрения массива, состоящего главным образом из данных шведских наблюдений. Как показал анализ, временная изменчивость ще-

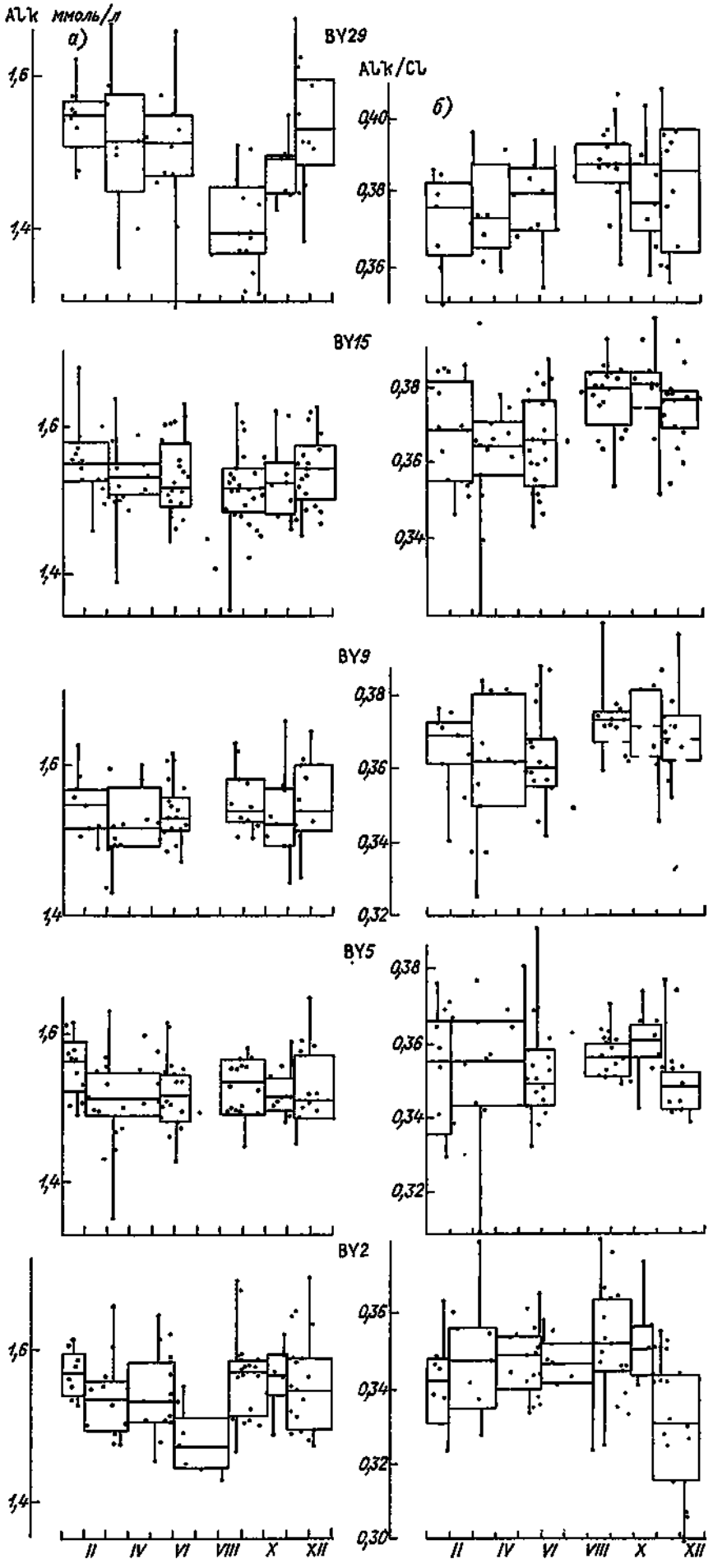


Рис. 13.12. Годовой ход общей щелочности (*а*), щелочно-хлорного коэффициента (*б*), боратной (*в*) и карбонатной щелочности (*г*) на поверхности по данным квартильного анализа для базовых станций.

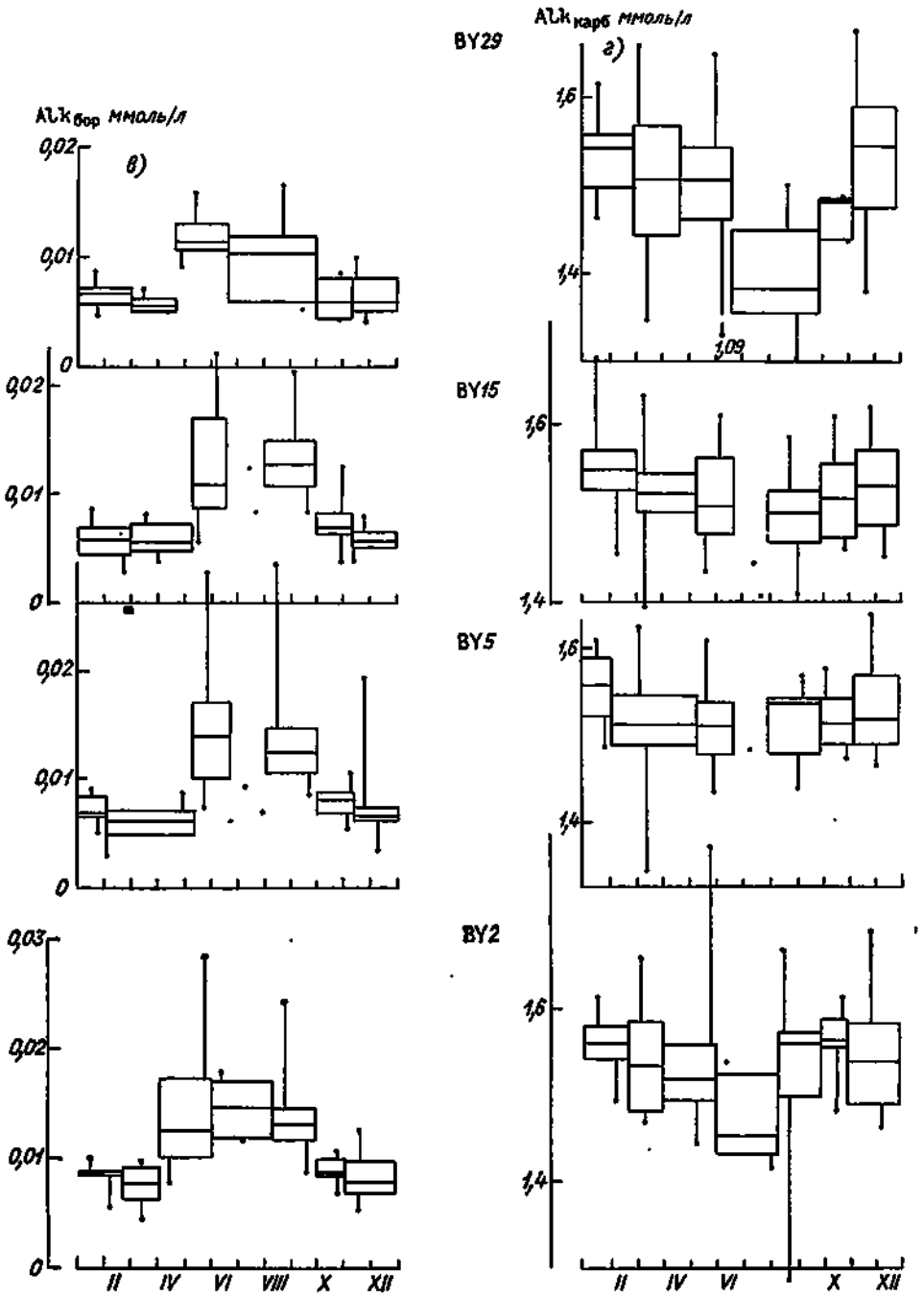

Alk бор ммоль/л
в)
0,02
0,01
0
0,02
0,01
0
0,02
0,01
0
0,03
0,02
0,01
0
II IV VI VIII X XII
Alk карб ммоль/л
г)
BY29
1,6
1,4
1,09
BY15
1,6
1,4
BY5
1,6
1,4
BY2
1,6
1,4
II IV VI X XII

Рис. 13.12.

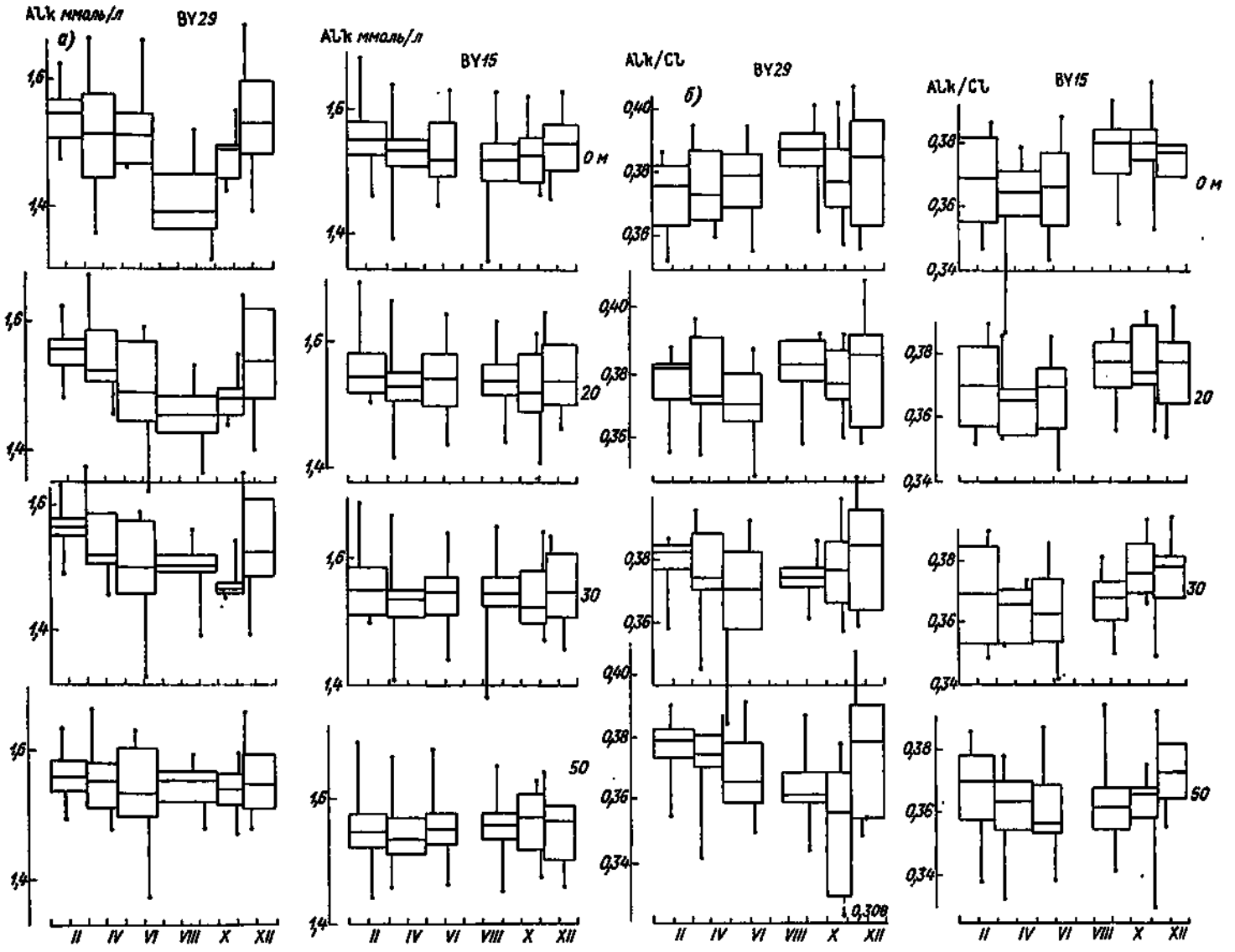


Рис. 13.13. Годовой ход общей щелочности (*а*) и щелочно-хлорного коэффициента (*б*) на различных глубинах верхнего слоя северной части моря (ст. BY 29) и в центральной части (ст. BY 15) по данным квартильного анализа.

лочности как в верхнем, так и в глубинном слое характеризуется небольшим диапазоном колебаний относительно средних значений.

Общий размах колебаний щелочности в верхнем слое открытой части моря по данным 1964—1984 гг. составляет от 1,1 ммоль/л в северных районах (ст. BY 29) до 1,8 ммоль/л в Арконской впадине (ст. BY 2). Однако в центральной части моря минимальные значения не опускаются ниже 1,3, а максимальные не превышают 1,7 ммоль/. Диапазон преобладающих значений здесь (в пределах показателей $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$) более узок — от 1,50 до 1,60 ммоль/л, и в северной части — от 1,43 до 1,55 ммоль/л. В глубинном слое щелочность более высока и возрастает с глубиной, достигая максимума у дна. Общий размах значений 1,6—2,0 ммоль/л, диапазон преобладающих значений зависит от глубины и района, но, как и в верхнем слое, невелик — разброс данных, характеризуемый интерквартильным расстоянием, менее 0,1 ммоль/л (табл. 13.5).

Как показали статистические данные (для каждого наблюдения были рассчитаны значения главных составляющих щелочности — боратной, карбонатной и гидросульфидной), боратная щелочность в Балтийском море в среднем составляет менее 0,01 ммоль/л, ее доля в составе общей в верхнем слое — от 0,3 до 0,6 %, а в глубинном слое снижается до 0,1 % (табл. 13.5).

13.3.1. Динамика щелочности в верхнем слое

В верхнем слое моря обе составляющие общей щелочности — карбонатная и боратная — подвержены сезонной изменчивости противоположной направленности (см. рис. 13.12). Годовой ход боратной щелочности, рассчитанной по (13.8), определяется главным образом соответствующей изменчивостью pH. Влияние годовых колебаний солености, слабых по сравнению с pH, проявляется лишь в северной части моря, где они наиболее значительны и где в июле—августе, в период минимума солености, отмечается снижение статистических характеристик и боратной щелочности. Размах годового хода боратной щелочности значителен — в весенне-летний период ее значения возрастают более чем вдвое. Повышение концентраций ионов $H_2BO_3^-$ вызвано сдвигом равновесия

$$H_3BO_3 \rightleftharpoons H^+ + H_2BO_3^-, \qquad (13.23)$$

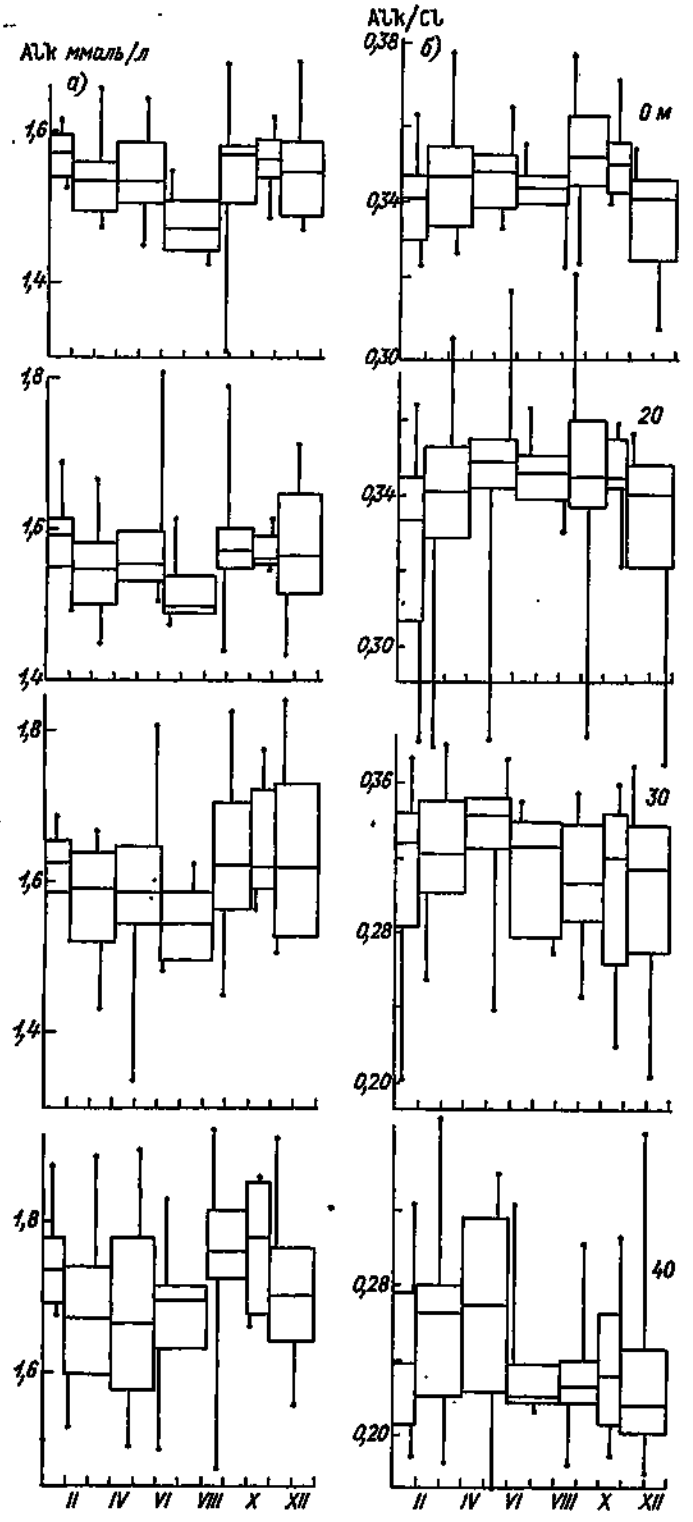


Рис. 13.14. Годовой ход общей щелочности (*а*) и щелочно-хлорного коэффициента (*б*) на различных глубинах Аркон-ской впадины (ст. BY 2) по данным квартильного анализа.

который происходит при уменьшении концентраций водородных ионов в результате убыли двуокиси углерода, потребляемой в процессе фотосинтеза. Изменение годового хода боратной щелочности с глубиной (рис. 13.15) аналогично характерному для pH и объясняется теми же причинами (см. п. 13.3.2).

Годовой ход боратной щелочности, несмотря на ее малую долю в составе общей, может оказывать влияние на соответствующую изменчивость общей щелочности, которая в свою очередь определяется

Таблица 13.5

Статистические характеристики щелочности (ммоль/л) по данным 1958—1984 гг.

Горизонт, м	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
Ст. BY 2							
0	1,55	1,21	1,50	1,55	1,58	1,80	91
10	1,56	1,27	1,53	1,56	1,59	1,81	91
20	1,56	1,29	1,53	1,56	1,60	1,81	90
30	1,60	1,33	1,55	1,61	1,65	1,84	91
40	1,71	1,47	1,63	1,71	1,79	1,92	89
Дно	1,83	1,53	1,77	1,83	1,89	2,05	73
Ст. BY 5							
0	1,52	1,35	1,49	1,52	1,55	1,65	88
10	1,53	1,35	1,50	1,53	1,56	1,66	90
20	1,53	1,41	1,50	1,53	1,57	1,67	88
30	1,55	1,45	1,51	1,55	1,58	1,68	85
40	1,56	1,45	1,52	1,56	1,59	1,69	86
50	1,59	1,45	1,55	1,59	1,64	1,95	85
60	1,70	1,54	1,65	1,70	1,74	1,95	87
70	1,77	1,56	1,73	1,78	1,82	1,95	70
80	1,82	1,61	1,78	1,82	1,87	2,02	88
Дно	1,85	1,61	1,80	1,84	1,89	2,07	80
Ст. BY 9							
0	1,54	1,40	1,51	1,53	1,58	1,67	73
10	1,54	1,42	1,51	1,54	1,58	1,68	74
20	1,55	1,46	1,52	1,55	1,58	1,69	75
30	1,55	1,47	1,52	1,55	1,58	1,68	74
40	1,56	1,48	1,52	1,55	1,59	1,69	70
50	1,56	1,48	1,53	1,56	1,60	1,75	70
60	1,58	1,49	1,55	1,58	1,61	1,74	73
70	1,62	1,50	1,58	1,62	1,66	1,75	66
80	1,66	1,57	1,62	1,66	1,70	1,87	70
90	1,68	1,58	1,65	1,68	1,71	1,81	70
100	1,70	1,60	1,66	1,70	1,73	1,96	55
Дно	1,72	1,61	1,68	1,73	1,76	1,97	
Ст. BY 15							
0	1,53	1,31	1,49	1,53	1,56	1,68	111
10	1,53	1,33	1,50	1,53	1,56	1,69	111
20	1,54	1,35	1,51	1,54	1,57	1,68	109
30	1,54	1,39	1,51	1,55	1,57	1,69	109
40	1,54	1,40	1,51	1,54	1,58	1,68	111
50	1,55	1,44	1,52	1,55	1,58	1,69	90
60	1,56	1,44	1,53	1,56	1,59	1,69	113
70	1,60	1,48	1,57	1,60	1,64	1,73	94
80	1,64	1,34	1,61	1,64	1,68	1,77	115
90	1,66	1,41	1,63	1,66	1,70	1,86	115
100	1,68	1,46	1,64	1,68	1,71	1,83	114
125	1,70	1,55	1,67	1,71	1,73	1,82	92
150	1,74	1,59	1,72	1,74	1,77	1,86	111
175	1,77	1,64	1,73	1,76	1,80	1,95	90
200	1,78	1,66	1,74	1,78	1,81	1,98	113
220	1,79	1,58	1,75	1,80	1,83	1,96	105
Дно	1,81	1,64	1,77	1,80	1,86	1,99	78
Ст. BY 29 *							
0	1,49	1,10	1,43	1,49	1,55	1,69	61
10	1,50	1,30	1,44	1,50	1,55	1,70	61
20	1,51	1,34	1,46	1,50	1,57	1,68	60
30	1,52	1,33	1,48	1,52	1,57	1,67	59
40	1,53	1,36	1,50	1,53	1,57	1,68	57
50	1,55	1,36	1,51	1,55	1,58	1,68	57
60	1,57	1,39	1,54	1,56	1,59	1,69	57
70	1,60	1,47	1,55	1,60	1,65	1,73	57
80	1,64	1,52	1,60	1,65	1,69	1,77	56
90	1,67	1,56	1,63	1,66	1,71	1,80	48
100	1,68	1,56	1,64	1,68	1,72	1,80	56
125	1,69	1,59	1,65	1,69	1,73	1,80	56
150	1,71	1,57	1,68	1,72	1,75	1,82	56
Дно	1,71	1,57	1,67	1,72	1,75	1,82	55

* Характеристики рассчитаны по данным 1968—1984 гг.

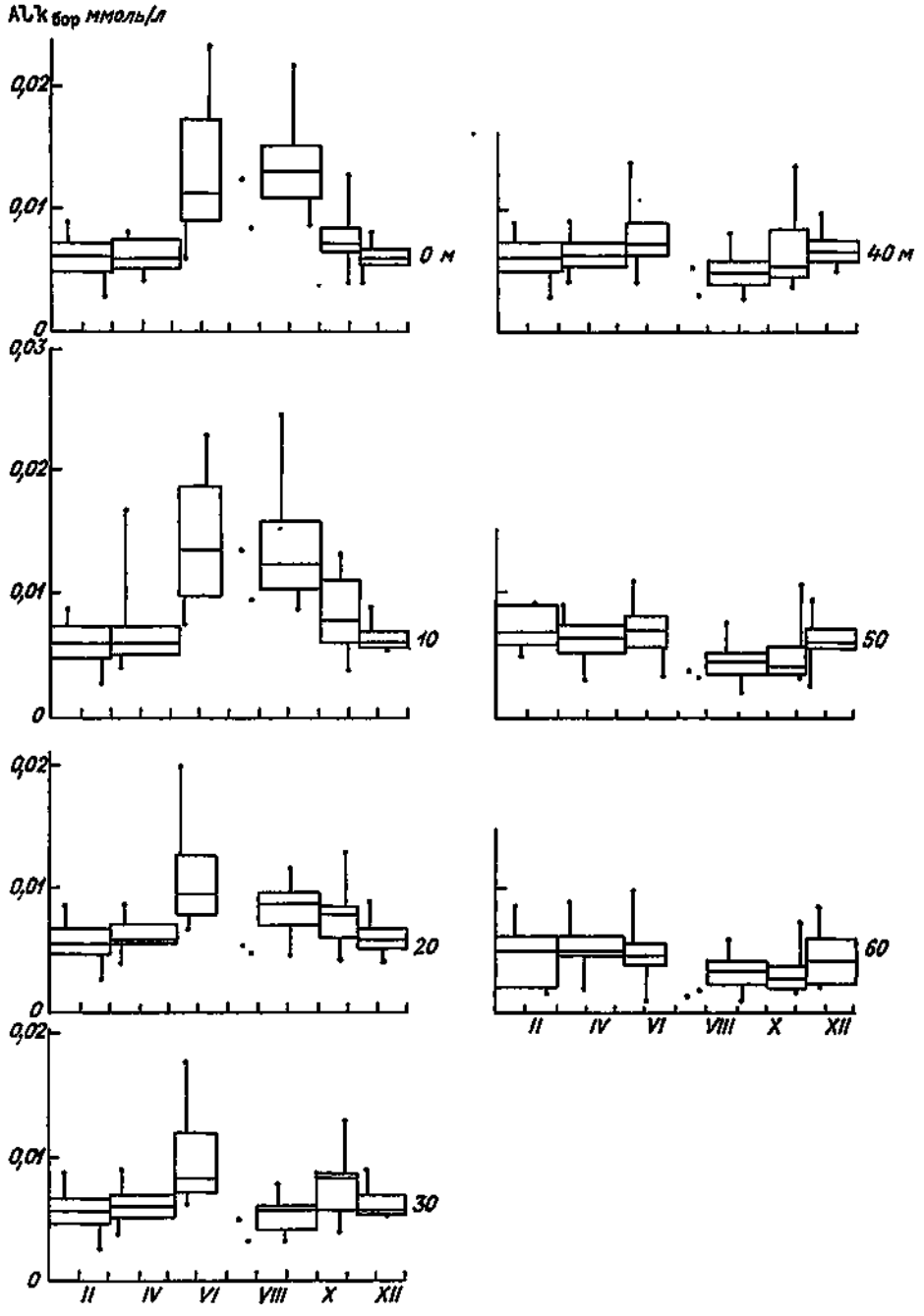


Рис. 13.16. Годовой ход боратной щелочности на стандартных горизонтах Готландской впадины (ст. BY 15) по данным квартильного анализа.

изменениями карбонатной составляющей. Это связано с небольшим размахом годовых колебаний карбонатной щелочности. Возрастание боратной составляющей от 0,005—0,008 ммоль/л в зимнее время до 0,01—0,02 ммоль/л в весенне-летний период (содержание в сумме общей составляет соответственно 0,3—0,5 и 0,7—1,2 %) оказывает в ряде случаев нивелирующее влияние на противоположно направленные сезонные изменения карбонатной щелочности (см. рис. 13.12) и сглаживает соответствующие колебания общей щелочности. Указанный эффект представляется важным для интерпретации изменений общей щелочности, которые обычно объясняют предполагаемыми изменениями карбонатной составляющей.

Вертикальное распределение боратной щелочности определяется теми же процессами, что формируют и вертикальную структуру pH. В период наибольшего развития термоклина значения в водах под фотической зоной особенно сильно уменьшаются с глубиной: для ст. BY 15 значения средних показателей в слое 0—10 и на горизонте 50 м составляют 0,013 и около 0,004 соответственно (см. рис. 13.15). Интересно отметить более низкие значения характеристик для поверхности по сравнению с подстилающими водами, типичные для сезонных выборок в северной части моря, а в мае—июне наблюдаемые повсеместно. Это отражается и в многолетних характеристиках (табл. 13.6). Причиной, по-видимому, является определяющее действие поверхностного стока.

Годовой ход карбонатной и общей щелочности, как показывает рис. 13.12, почти идентичен. Для сезонных изменений характерно снижение щелочности

Таблица 13.6

Многолетние статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — ($x_{0,25}$—$x_{0,75}$)] карбонатной $Alk_{карб}$ и боратной $Alk_{бор}$ щелочности и процентного содержания боратной щелочности в составе общей в Готландской (ст. BY 15) и Борнхольмской (ст. BY 5) впадинах

Горизонт, м	$Alk_{карб}$	$Alk_{бор}$	$Alk_{бор}$	$Alk_{карб}$	$Alk_{бор}$	$Alk_{бор}$
	ммоль/л		%	ммоль/л		%
	Ст. BY 15			Ст. BY 5		
0	1,517 1,483—1,552	0,0085 0,0059—0,0121	0,55 0,39—0,72	1,517 1,486—1,548	0,0090 0,0066—0,0125	0,58 0,43—0,80
10	1,520 1,492—1,554	0,0092 0,0061—0,0133	0,59 0,40—0,87	1,522 1,487—1,555	0,0093 0,0070—0,0127	0,60 0,46—0,82
20	1,529 1,498—1,562	0,0075 0,0058—0,0091	0,48 0,37—0,59	1,528 1,494—1,561	0,0087 0,0070—0,0111	0,57 0,46—0,73
30	1,535 1,503—1,561	0,0066 0,0054—0,0083	0,43 0,35—0,53	1,536 1,499—1,567	0,0076 0,0063—0,0096	0,49 0,40—0,60
40	1,538 1,504—1,575	0,0059 0,0048—0,0072	0,38 0,32—0,46	1,548 1,575—1,584	0,0066 0,0050—0,0082	0,43 0,32—0,52
50	1,547 1,517—1,576	0,0055 0,0042—0,0069	0,36 0,28—0,45	1,583 1,539—1,634	0,0054 0,0039—0,0070	0,34 0,24—0,45
60	1,559 1,530—1,588	0,0041 0,0023—0,0057	0,26 0,15—0,37	1,689 1,648—1,735	0,0054 0,0038—0,0070	0,32 0,23—0,42
70	1,602 1,570—1,639	0,0021 0,0014—0,0029	0,14 0,09—0,19	1,765 1,722—1,807	0,0051 0,0034—0,0068	0,28 0,20—0,38
80	1,642 1,605—1,679	0,0016 0,0013—0,0021	0,10 0,08—0,13	1,818 1,771—1,868	0,0047 0,0033—0,0069	0,25 0,18—0,37
100	1,673 1,641—1,705	0,0016 0,0012—0,0021	0,10 0,07—0,13	1,839 1,792—1,885	0,0047 0,0033—0,0062	0,26 0,18—0,35
125	1,702 1,669—1,732	0,0020 0,0016—0,0024	0,11 0,09—0,14	—	—	—
150	1,738 1,714—1,763	0,0018 0,0015—0,0022	0,10 0,08—0,13	—	—	—
175	1,757 1,723—1,787	0,0021 0,0017—0,0028	0,12 0,10—0,15	—	—	—
200	1,768 1,732—1,804	0,0021 0,0016—0,0026	0,12 0,09—0,15	—	—	—
225	1,784 1,742—1,822	0,0022 0,0017—0,0027	0,12 0,10—0,15	—	—	—
Дно	1,790 1,750—1,835	0,0025 0,0019—0,0033	0,14 0,11—0,18	—	—	—

в весенне-летний период с минимумом в августе—сентябре в северной и центральной частях моря и в июне—июле в южной (Арконский бассейн). В юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и в Борнхольмской впадине (ст. BY 5) сезонные изменения выражены слабо.

Сезонные изменения щелочности в предшествующих исследованиях (наблюдения 1957—1962 гг.) связывались с определяющим влиянием фотосинтеза. Снижение, отмечаемое в мае или августе, объяснялось уменьшением концентраций гидрокарбонатов в результате сдвига карбонатного равновесия при потреблении двуокиси углерода в процессах фотосинтеза [19]. Однако это объяснение не согласуется с более полными представлениями о годовом ходе щелочности, полученными на основе статистического анализа. Минимумы щелочности не соответствуют периодам наибольшей убыли двуокиси углерода (максимумам pH, см. п. 13.3.2) и к тому же наблюдаются не во всех районах моря, в то время как процессы фотосинтеза регулируют гидрохимические условия в верхнем слое повсеместно с определенным сдвигом сроков.

Согласованность характера сезонных изменений щелочности и солености дает основание предполагать в качестве определяющего их фактора сезонную динамику речного стока, поступающего в море. Наибольший размах годового хода щелочности и солености на поверхности наблюдается в северной части моря (ст. BY 29), причем период годового минимума щелочности соответствует максимуму в годовых колебаниях речного стока с учетом сдвига на время добегания волны этих изменений в море (см. рис. 13.12 и рис. 10.9). Поскольку речные воды северной части водосбора Балтийского моря имеют более низкую щелочность, чем балтийские [14],

в период максимума речного стока щелочность в районах непосредственного его воздействия резко снижается. В октябре—ноябре по мере сокращения объема поступающего речного стока и возрастания солености повышается и щелочность. Зимой этому способствует эффективное конвективное перемешивание, в результате которого усиливается вертикальный обмен с глубинными водами, где щелочность повышена. Размах годового хода щелочности на поверхности в районе ст. BY 29 составляет по разности средних показателей для интервалов максимума и минимума около 0,15 ммоль/л при уменьшении значений показателей $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$ от 1,50—1,57 ммоль/л в январе до 1,36—1,45 ммоль/л в период минимума.

В направлении с севера на юго-запад годовой ход щелочности (см. рис. 13.12), как и солености (см. рис. 10.10), сглаживается. В районе Готландской впадины четко выражены (особенно для карбонатной щелочности) все характерные черты годового хода, отмеченные для северной части моря, и лишь размах годовых колебаний уменьшается до 0,035 ммоль/л. В юго-восточной части моря (ст. BY 9) и в районе Борнхольмской впадины (ст. BY 5), где сглаживаются годовые колебания солености, происходит аналогичная трансформация и годового хода щелочности. Возможно, что при этом оказывает влияние и фактор повышенной щелочности рек центральной части водосбора Балтики (Венты, Вислы [14], Нямунаса). И наконец, отмеченное выше летнее возрастание боратной щелочности, особенно значительное в районе юго-восточной части Готландской котловины (до 0,02—0,03 ммоль/л), может компенсировать снижение карбонатной щелочности и также быть причиной отсутствия эффекта уменьшения общей щелочности в период пониженной солености в этом районе — в июле—ноябре.

В районе Арконской впадины (ст. BY 2), где годовой ход солености становится более четко выраженным, при ее минимуме в июне—июле наблюдается и минимальная щелочность (см. рис. 13.12 и 10.10). В Арконском бассейне щелочность всегда выше, чем в остальных районах моря, в связи с влиянием адвекции каттегатских вод, имеющих большую щелочность, чем балтийские (см. рис. 13.12 и табл. 13.5). Резкое летнее снижение щелочности в Арконской впадине обусловлено ослаблением входных потоков через Датские проливы в летний период и соответствующим усилением влияния речного стока.

Годовой ход щелочности, как и солености, сглаживается с глубиной и в северной части моря (см. рис. 13.13) проявляется в слое 0—20 м, на глубине 30 м трансформируется из-за развития и разрушения летнего термоклина, усиленного локальным временным галоклином. В Арконской впадине сезонный минимум щелочности характерен для всей толщи верхнего слоя 0—30 м (см. рис. 13.14).

Заслуживает внимания еще один сезонный эффект — снижение щелочности во второй половине зимы по сравнению с первой, характерное для ВКС в юго-западной части моря (см. рис. 13.12 и 13.14, станции BY 2 и BY 5). Это согласуется с соответствующим уменьшением сезонных характеристик солености после максимума в январе. В Готландской котловине (см. рис. 13.12, станции BY 9 и BY 15) соленость к концу зимы повышается за счет усиления вертикального обмена с глубинным слоем. Перенос соли должен был бы сопровождаться и возрастанием щелочности. Аналогичный «аномальный» зимний эффект отмечался при анализе годового хода pH (см. п. 13.2.2).

В качестве причины этих изменений можно предположить отдачу в атмосферу избытка двуокиси углерода, накопившейся в верхнем слое по окончании вегетационного периода. Увеличение pH и убыль CO_2 приводят к сдвигу карбонатного равновесия в сторону уменьшения концентраций гидрокарбонатов [см. схему (13.2)]. Характерно, что данное уменьшение щелочности не гидродинамического происхождения отражается также и в уменьшении щелочно-хлорных коэффициентов для станций BY 15 и BY 29 (см. рис. 13.13), в отличие от Арконской впадины, где снижение щелочности связано с аналогичным изменением солености и сопровождается возрастанием значений коэффициента (см. рис. 13.14). В целом же все сезонные изменения щелочно-хлорного коэффициента, как правило, противоположны соответствующим изменениям щелочности.

В отличие от гидрохимических показателей, годовой ход которых определяется гидробиологическим циклом, в сезонных изменениях вертикального распределения щелочности довольно слабо отражается роль летней термической стратификации, за исключением северной части моря, где она сопровождается образованием летнего галоклина (рис. 13.16). Вертикальное распределение щелочности формируется вертикальной структурой солености, что особенно показательно отражается в профилях статистических характеристик для периода наибольших градиентов температуры для всех исследуемых станций (рис. 13.17).

В пространственном распределении щелочности на поверхности также проявляется доминирующее влияние соответствующих различий солености, причем наибольшие пространственные градиенты характерны для периода минимума щелочности (рис. 13.18). Для всех интервалов годового хода щелочности характерен несколько повышенный уровень щелочности в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), что подтверждает определяющее влияние более высокой щелочности речного стока, поступающего в данный район.

13.3.2. Щелочность глубинного слоя

Общая щелочность глубинных вод, возрастающая с глубиной в соответствии с увеличением солености, в отличие от последней и многих гидрохимических показателей, характеризуется относительно малыми вертикальными градиентами даже в слое скачка, особенно за пределами Борнхольмской впадины — в Готландской котловине (станции BY 9 и BY 15) и в северной части моря (ст. BY 29) (см. табл. 13,5, рис. 13.19). В юго-западных районах, где влияние притоков каттегатских вод более значительно, возрастание щелочности с глубиной интенсивнее. Щелочно-хлорные коэффициенты характеризуются несколько большими вертикальными градиентами (см. табл. 13.4, рис. 13.19).

В пространственном распределении щелочности на фоне ее закономерного (в соответствии с изменением солености) уменьшения с юга на север в придонном слое Готландской впадины (ст. BY 15)

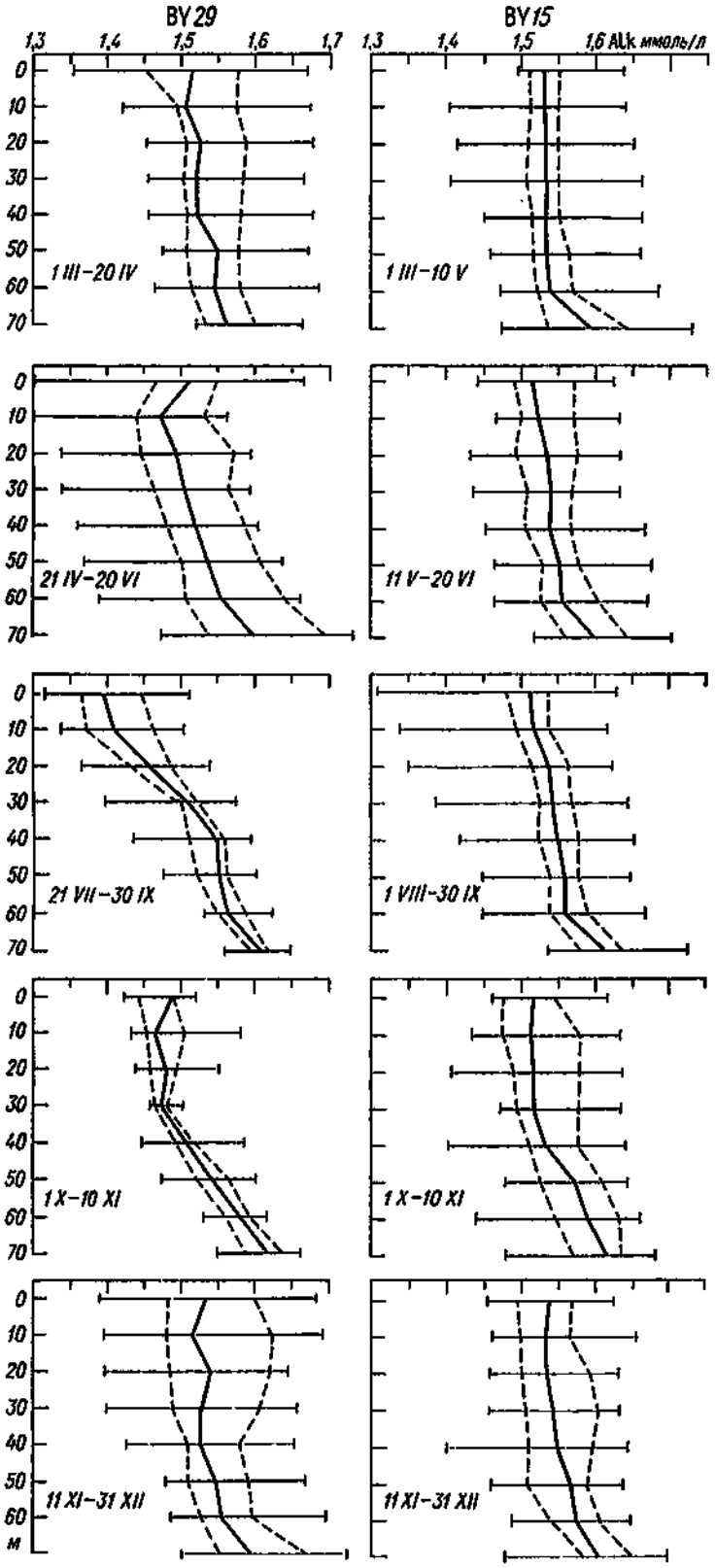


Рис. 13.16. Квартильные оценки общей щелочности в северной части моря (ст. BY 29) и Готландской впадине (ст. BY 15).

отмечаются бо́льшие значения по сравнению с юго-восточным районом котловины (ст. BY 9) (средние многолетние показатели у дна составляют соответственно 1,80 и 1,72 ммоль/л) (см. табл. 13.5). В течение исследуемого периода в придонном слое Готландской впадины преобладали анаэробные условия, в отличие от юго-восточной части, где образование сероводорода практически не наблюдалось. Однако, как показывают расчеты, «аномалия» в распределении щелочности обусловлена гидросульфидной составляющей, поскольку и в аэробных условиях статистические показатели для общей щелочности в придонном слое Готландской впадины (табл. 13.7) выше, чем в юго-восточном районе (см. табл. 13.5). Не имеют значения и различия боратной щелочности, которая в глубинных водах снижается до значений, соизмеримых с погрешностью определений, и составляет в центральных и северных районах моря 0,001—0,002 моль/л и менее и лишь в Борнхольмской впадине 0,003—0,006 ммоль/л (см. табл. 13.6).

Указанные различия связаны с главным компонентом общей щелочности — карбонатной составляющей, которая в придонном слое Готландской впадины (150 м — дно) по средним показателям составляет 1,74—1,79 ммоль/ (см. табл. 13.6), а у дна юго-восточного района Готландской котловины — 1,72 ммоль/л, поскольку карбонатная и общая щелочность для ст. BY 9 из-за отсутствия гидросульфидной и малой доли боратной составляющей практически идентичны (см. табл. 13.5).

Повышение карбонатной щелочности в придонном слое Готландской впадины связано с накоплением максимального по сравнению с остальными районами количества двуокиси углерода (см. п. 13.4). Увеличение концентраций CO_2 вызывает возрастание растворения углекислого кальция донных отложений с образованием гидрокарбонат-ионов [1]:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2\,HCO_3^-. \quad (13.24)$$

В качестве свидетельства интенсивности этих процессов в работе [14] приводятся данные Т. И. Горшковой об отсутствии на дне глубоководных районов остатков раковин моллюсков.

Анализ изменчивости щелочности, обусловленной обновлениями глубинного слоя при поступлении каттегатских вод по дну впадин в результате мощных вторжений через Датские проливы, затруднен для районов, в которых развитие анаэробных условий не характерно. Тем не менее анализ многолетних данных для придонного слоя Борнхольмской впадины (рис. 13.20) подтверждает преобладание увеличения щелочности во время притоков каттегатских вод, отмеченное еще при анализе данных 1958—1962 гг. [14]. При отсутствии притоков, если не возникают анаэробные условия с относительно высокими концентрациями сероводорода, при которых наблюдались максимумы щелочности, происходит постепенное уменьшение значений к концу цикла. (Значительный разброс данных 1969—1970 гг., вуалирующий эту изменчивость, связан с химико-аналитической неоднородностью наблюдений различных учреждений и судов, участвовавших в программе Международного года Балтики.)

Изменчивость в глубинном слое Готландской впадины выражена более четко. При появлении сероводорода у дна щелочность повышается, причем, как и для других гидрохимических показателей, скачкообразно (рис. 13.21). Поступление каттегатских вод в придонный слой впадины вызывает резкое снижение щелочности, относительно низкий уровень которой сохраняется вплоть до возникновения анаэробных условий. Этот характер изменений наблюдается в придонном слое, хотя на верх-

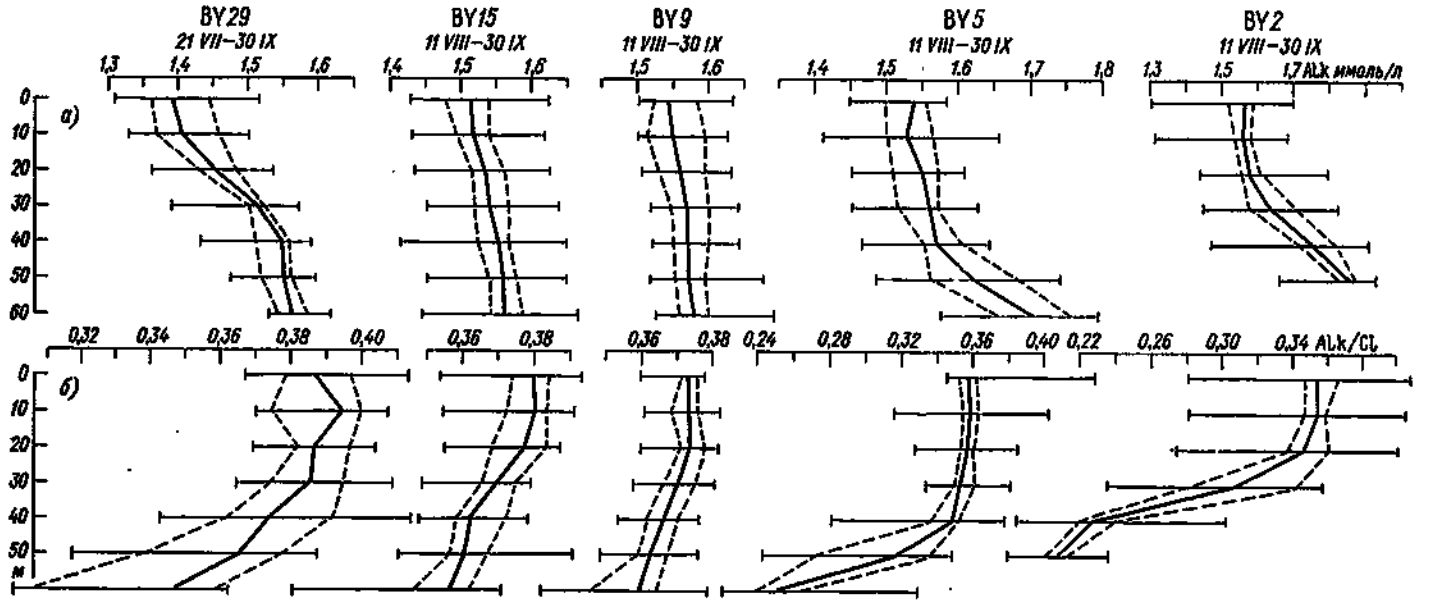


Рис. 13.17. Вертикальное распределение квартильных оценок общей щелочности (*а*) и щелочно-хлорного коэффициента (*б*) в августе—сентябре для базовых станций.

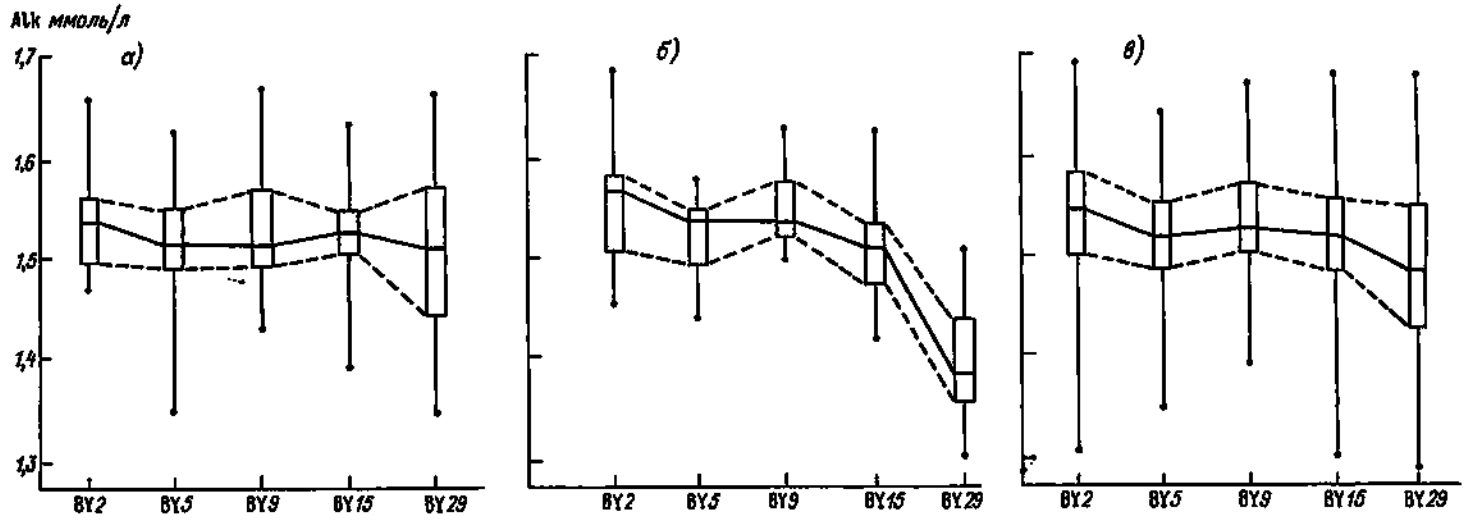


Рис. 13.18. Квартильные оценки общей щелочности на поверхности восточного продольного разреза для базовых станций в зимний (*а*) и летний (*б*) периоды года и по обобщенным данным 1965—1984 гг. (*в*).

Таблица 13.7

Многолетние статистические характеристики щелочности (ммоль/л) в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
Ст. BY 15														
100	1,684	1,530	1,660	1,682	1,711	1,793	46	1,673	1,462	1,639	1,672	1,710	1,825	64
125	1,716	1,638	1,690	1,717	1,740	1,794	34	1,699	1,550	1,664	1,700	1,730	1,822	55
150	1,741	1,593	1,720	1,740	1,765	1,833	46	1,746	1,646	1,716	1,747	1,772	1,860	61
175	1,754	1,653	1,738	1,750	1,779	1,852	33	1,772	1,640	1,730	1,771	1,814	1,952	54
200	1,760	1,658	1,730	1,760	1,790	1,840	46	1,795	1,660	1,755	1,800	1,826	1,980	63
225	1,768	1,659	1,730	1,770	1,800	1,945	44	1,815	1,580	1,770	1,820	1,849	1,962	57
Дно	1,774	1,679	1,750	1,773	1,800	1,973	25	1,826	1,640	1,775	1,832	1,864	1,985	50
Ст. BY 29														
100	1,685	1,562	1,644	1,684	1,729	1,795	35	1,672	1,565	1,638	1,677	1,697	1,777	15
125	1,696	1,587	1,648	1,700	1,736	1,801	35	1,691	1,619	1,667	1,689	1,719	1,787	15
150	1,709	1,573	1,655	1,714	1,751	1,817	35	1,717	1,617	1,698	1,720	1,731	1,797	15
Дно	1,719	1,595	1,683	1,720	1,751	1,817	32	1,708	1,625	1,678	1,712	1,731	1,799	17

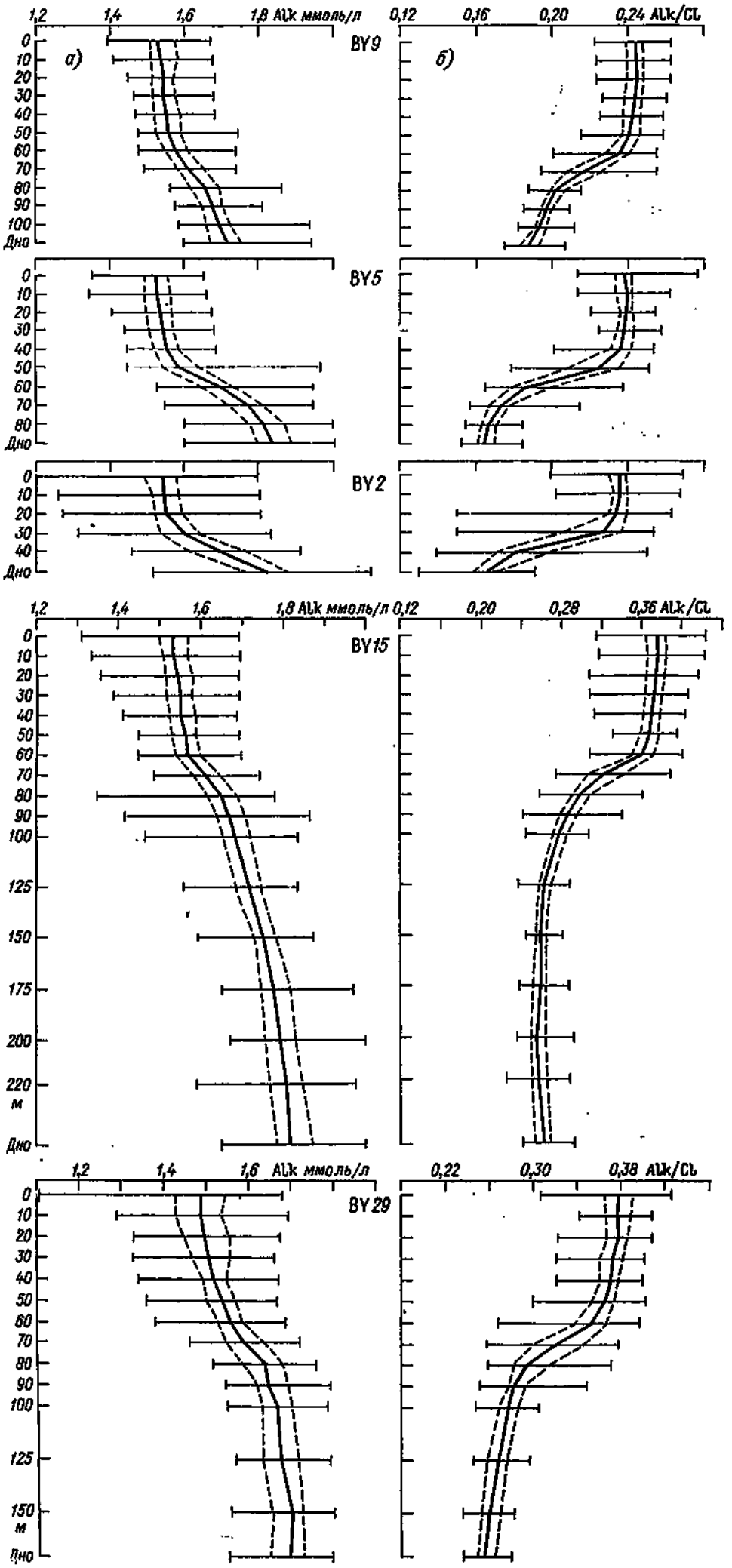


Рис. 13.19. Вертикальное распределение квартильных оценок общей щелочности (*а*) и щелочно-хлорного коэффициента (*б*) для базовых станций по обобщенным данным 1965—1984 гг.

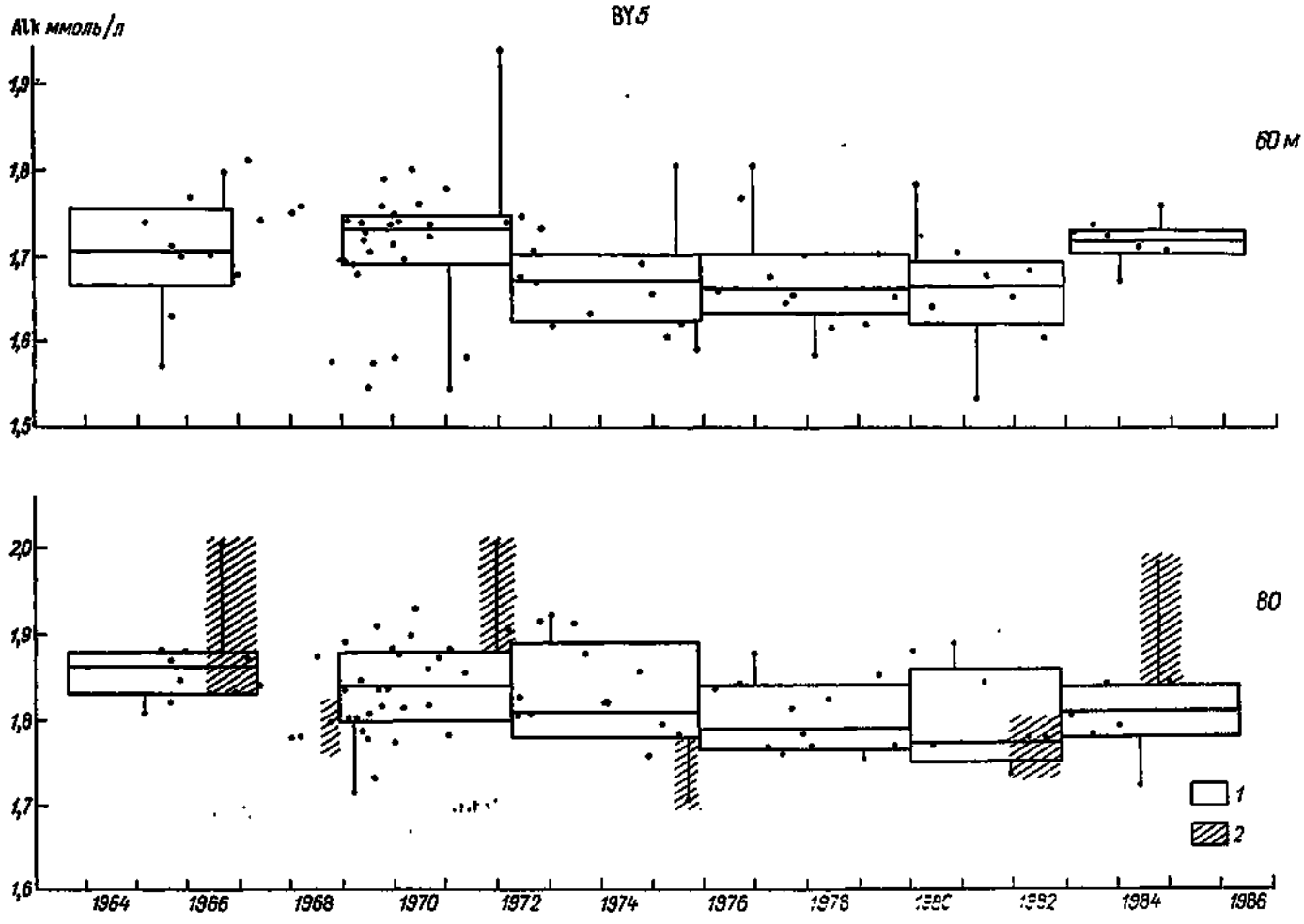


Рис. 13.20. Квартильные оценки общей щелочности в глубинном слое Борнхольмской впадины (ст. BY 5) при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

ней его границе иногда сглаживается (150 м). В некоторых случаях изменения отмечаются во всем глубинном слое, как, например, при длительной стагнации 1979—1982 гг., когда распространение сероводорода иногда достигало горизонта 100 м.

Важное значение для анализа изменчивости щелочности в этом районе имеет тот факт, что последующее ее снижение в результате притока 1983 г по слою 80—100 м произошло также во всей толще придонного слоя, хотя анаэробные условия сохранились и гидросульфидная щелочность увеличилась (по значениям средних показателей от 0,015 до 0,024 ммоль/л у дна для 1979—1982 и 1983—1984 гг. соответственно). Это означает, что обусловленное притоком снижение общей щелочности связано с уменьшением карбонатной составляющей, отражающим существенное изменение состава вод, несмотря на отсутствие эффекта их аэрации.

Как показали расчеты, при всех притоках каттегатских вод, сопровождавшихся обогащением глубинного слоя кислородом после анаэробных условий, уменьшение общей щелочности обусловлено не только устранением гидросульфидной составляющей, но и снижением карбонатной щелочности. В свою очередь и возрастание общей щелочности в анаэробных условиях вызвано не только вкладом дополнительной гидросульфидной составляющей, но и повышением карбонатной щелочности. Вследствие этого изменения статистических характеристик, рассчитанных для карбонатной щелочности, аналогичны представленным для общей щелочности (см. рис. 13.21). Для количественных сопоставлений пригодны значения средних показателей для некоторых наиболее обеспеченных данными интервалов: на горизонте 225 м для аэробных условий 1964—1966 гг. и последующего интервала анаэробных условий 1966—1969 гг. эти значения составили 1,77 и 1,81 ммоль/л соответственно, а после обновления вод и преобладания благоприятных кислородных условий с конца 1969 по 1971 г. — 1,78 ммоль/л. Другой пример — смена сероводородных условий 1974—1976 гг. кислородными в 1977—1978 гг., когда средние показатели составили 1,78 и 1,73 ммоль/л соответственно. При последующем развитии анаэробных условий в 1979—1982 гг. карбонатная щелочность вновь повысилась до 1,79 ммоль/л. В целом для объединенного массива данных по карбонатной щелочности в аэробных условиях диапазон значений, характеризуемый показателями $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$, составляет гля глубины 225 м 1,73—1,80 ммоль/л, а в анаэробных условиях — от 1,74 до 1,84 ммоль/л; для придонного горизонта соответствующие показатели составляют 1,75—1,80 и 1,76—1,84 ммоль/л.

Повышение карбонатной щелочности при образовании сероводорода связано с возрастанием концентрации гидрокарбонат-ионов HCO_3^- [1]. Причина, по-видимому, в сдвиге равновесия диссоциации H_2CO_3 (13.3) из-за уменьшения концентрации водородных ионов, сопровождающего образование

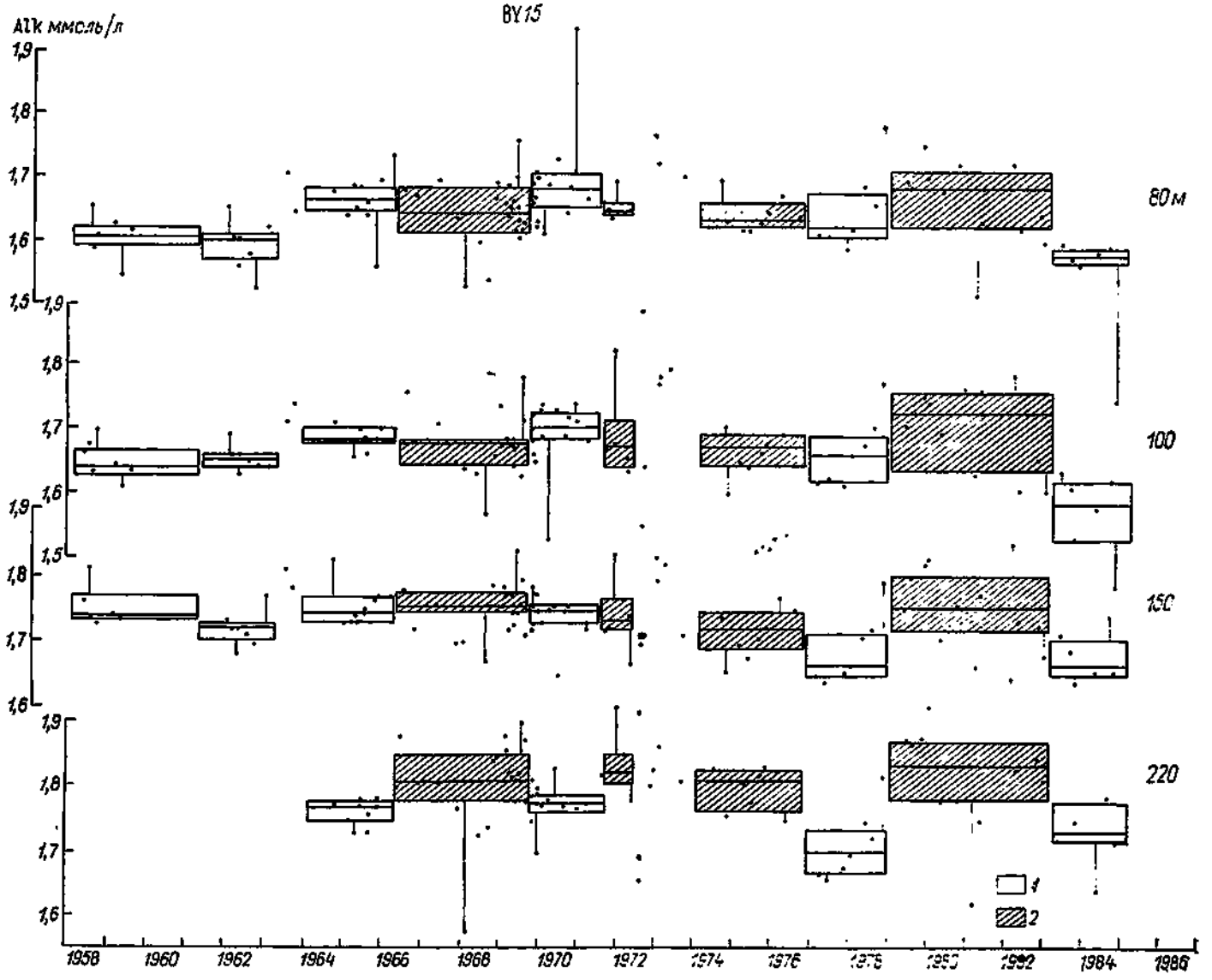


Рис. 13.21. Квартильные оценки общей щелочности в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

гидросульфид-ионов (см. п. 13.2.3). Данный эффект дает дополнительный вклад в увеличение общей щелочности в анаэробных условиях, наряду с прибавлением гидросульфидной составляющей и общим, не зависящим от окислительно-восстановительных условий, возрастанием концентраций гидрокарбонат- ионов за счет растворения углекислого кальция при увеличении количества CO_2. Непосредственный вклад гидросульфидной щелочности в сумме этих эффектов, как показывают расчеты, не является наибольшим. Так, для горизонта 225 м преобладающий диапазон значений гидросульфидной щелочности, характеризуемый показателями $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$, составил 0,004—0,015 ммоль/л, а максимальное значение — 0,027 ммоль/л, в то время как карбонатная щелочность увеличилась от 1,66—1,78 ммоль/л в 1977—1978 гг. до 1,75—1,84 ммоль/л в 1979—1982 гг.

В целом гидросульфидная щелочность у дна Готландской впадины, где она наибольшая в море, преимущественно составляла 0,010—0,026 ммоль/л (значения $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$ для объединенного массива данных), а максимум — 0,035 ммоль/л, что соответствует 0,5—1,4 и 2,0 % общей щелочности. Для горизонта 200 м эти показатели ниже и составляют 0,004—0,016 ммоль/л с максимумом 0,026 ммоль/л, что соответствует 0,2—0,9 и 1,5 % общей щелочности. На верхней границе придонного слоя (150 м) гидросульфидная щелочность наблюдалась в существенных количествах довольно редко, и максимум ее не превышал 0,7 % общей. У дна Борнхольмской впадины максимальное значение гидросульфидной щелочности составляло 0,7 % общей.

Поскольку все процессы, формирующие повышение общей щелочности в придонном слое, протекают на границе с дном, в Готландской впадине в анаэробных условиях наблюдаются наибольшие вертикальные градиенты возрастания этого показателя (см. табл. 13.7, рис. 13.22). Для северной части моря (ст. BY 29), где концентрации сероводорода значительно меньше (максимум гидросульфидной щелочности — 0,4 % общей), вертикальные градиенты возрастания щелочности с глубиной в анаэробных условиях существенно не различаются.

Рассмотренные данные показывают, что щелочность в глубоководных районах Балтийского моря не столь консервативный показатель, как принято считать.

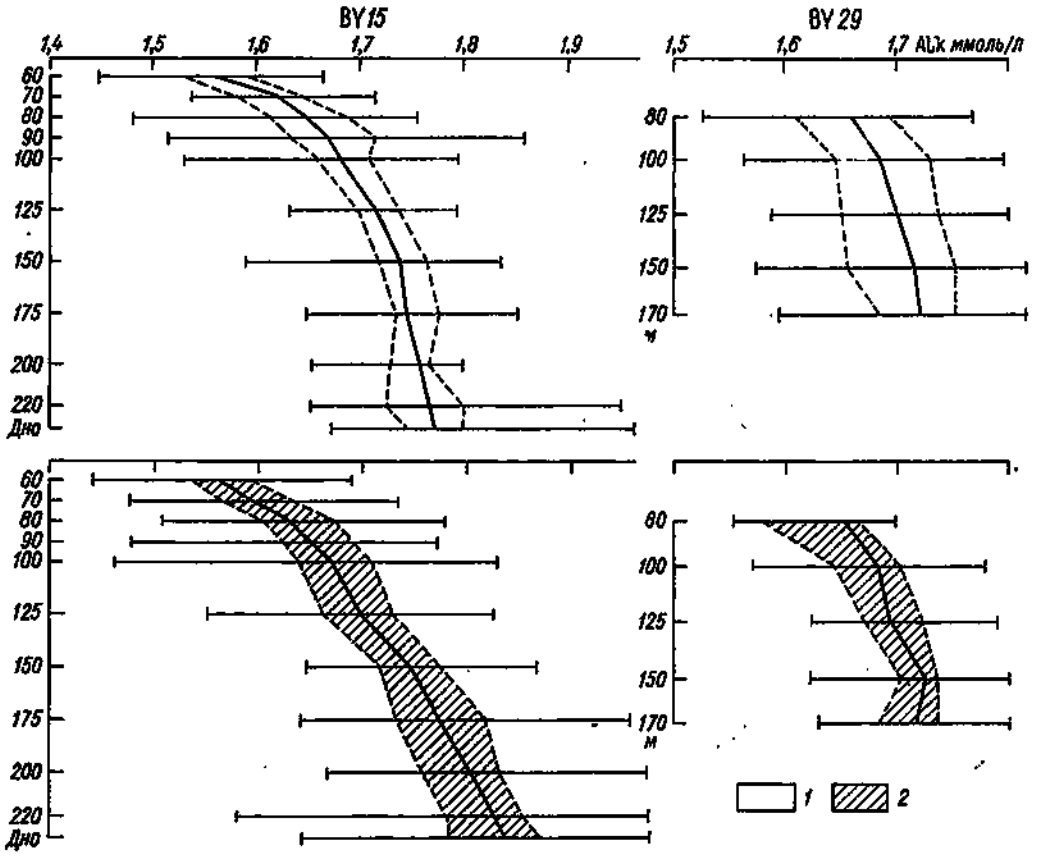


Рис. 13.22. Вертикальное распределение квартильных оценок общей щелочности в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29) для суммарных данных при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

13.4. Двуокись углерода. Карбонатное равновесие и общее содержание карбонатов

Полная характеристика карбонатной системы в море включает данные о содержании двуокиси углерода, суммарном содержании карбонатных соединений, концентрациях и соотношениях индивидуальных компонентов. Главным фактором, определяющим состояние этой системы, является динамика содержания двуокиси углерода.

Полный комплекс показателей состояния карбонатной системы может быть получен лишь с помощью расчетов, для которых, наряду с данными по температуре и солености (хлорности), необходимы аналитические данные по меньшей мере для двух из перечисленных ниже параметров: общей щелочности, pH, общему содержанию неорганических карбонатных соединений, парциальному давлению двуокиси углерода. В отечественной практике наибольшее распространение имеет комбинация общая щелочность — pH, хотя из-за ограниченной точности измерений pH ошибки в рассчитываемых параметрах могут быть значительными (для парциального давления CO_2, например, они составляют около 3 % [16]).

Первоначально на основе измерений pH и общей щелочности по соотношениям, приведенным в п. 13.3, находят значения карбонатной щелочности и затем по выражениям (13.25)—(13.30) концентрации соединений

$$[HCO_3^-] = 10^{-3}Alk_{карб}/(1+ +2K'_{2C}/a_{H+}); \quad (13.25)$$

$$[CO_3^{2-}] = 10^{-3}Alk_{карб}/(2+ +a_{H+}/K'_{2C}); \quad (13.26)$$

$$[CO_2] = 10^{-3}Alk_{карб}/K_{1C}(1+ +2K_{2C}/a_{H+}); \quad (13.27)$$

$$[\Sigma CO_2] = 10^{-3}Alk_{карб}/(1+2K_{2C}/a_{H+})\times \times(1+K_{2C}/a_{H+}+a_{H+}/K_{1C}), \quad (13.28)$$

где $Alk_{карб}$ — карбонатная щелочность; a_{H+} — активность ионов водорода, определяемая из pH; K_{1C} и и K_{2C} — концентрационные константы диссоциации, определяемые по формулам

$$K_{1C} = a_{H+}[HCO_3^-]/[H_2CO_3]; \quad (13.29)$$

$$K_{2C} = a_{H+}[CO_3^{2-}]/HCO_3^-]. \quad (13.30)$$

В расчетах по (13.25)—(13.28) используется одна из систем констант, представляющая экспериментально найденные зависимости констант диссоциации от температуры и солености (хлорности) [1, 16]. В данной монографии использована система констант Эдмонда и Гискеса, справедливых для pK_{1C} при хлорности, превышающей 1 ‰, и для pK_{2C} и pK_B при хлорности более 4 ‰ [16]:

$$pK_{1C} = 3404{,}71/T + 0{,}032786\,T - 14{,}7122 - -0{,}19178\,Cl^{1/3}; \quad (13.31)$$

$$pK_{2C} = 2902{,}39/T + 0{,}02379\,T - 6{,}4710 - -0{,}4693\,Cl^{1/3}, \quad (13.32)$$

где T — температура, К.

Парциальное давление двуокиси углерода p_{CO_2} определяется отношением

$$p_{CO_2} = [CO_2]/\alpha, \qquad (13.33)$$

где α — коэффициент растворимости углекислого газа, зависящий от температуры и солености.

Согласно рекомендациям ЮНЕСКО, коэффициент растворимости следует рассчитывать по уравнению Вейса [16]

$$\ln K_H = -58{,}0931 + 90{,}5069 \cdot 100/T + \\ + 22{,}294 \ln(T/100) + [0{,}027766 - 0{,}025888\, T/100 + \\ + 0{,}0050578 (T/100)^2] S, \qquad (13.34)$$

где $\alpha = K_H$, моль/(л·атм).

Значения коэффициента растворимости CO_2 могут быть найдены также из Океанографических таблиц (1975). В данной работе α рассчитывался по (13.34).

Для каждого наблюдения из массива данных для базовых станций были рассчитаны показатели CO_2, HCO_3^-, CO_3^{2-}, ΣCO_2, процентного содержания каждого из карбонатных соединений в ΣCO_2 и p_{CO_2}. Был проведен статистический анализ годового хода, а также, учитывая найденную сезонную изменчивость pH в галоклине, сезонной изменчивости всех показателей в верхнем слое. Из-за малого количества данных межгодовая изменчивость расчетных показателей в глубинном слое не исследовалась, были рассчитаны лишь многолетние характеристики для каждого горизонта.

Двуокись углерода

Двуокись углерода — важнейшее соединение в карбонатной системе, поскольку через CO_2 осуществляется биогеохимический кругооборот углерода в море и обмен между океаном и атмосферой, а от колебаний ее содержания зависит динамика всего карбонатного равновесия. Это источник углерода в процессе продуцирования фитопланктона, главного фактора уменьшения содержания CO_2. Двуокись углерода расходуется также на растворение карбонатов и химическое «выветривание» минералов на дне океана, которое происходит для карбонатных соединений кальция по схеме (13.24), а для силикатных по схеме

$$CaSiO_3 + CO_2 \rightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-} + SiO_2. \qquad (13.35)$$

Источниками двуокиси углерода в океане служат процессы биохимического и химического окисления органических веществ в водной толще и в донных отложениях, а также поступление при дыхании гидробионтов. Поставщиком CO_2 и продуктов ее взаимодействия с осадочными породами является речной сток, а в океане — вулканические извержения на дне, в результате которых происходит выделение углекислого газа из недр Земли через разломы [1].

Важнейшее значение в режиме свободной двуокиси углерода имеет взаимодействие океана с атмосферой, в результате которого происходит выделение или поглощение CO_2 океаном. Для характеристики режима двуокиси углерода обычно используется парциальное давление p_{CO_2}, которое является не только количественным показателем содержания CO_2 в воде, но и дает сведения о направленности обмена этим газом между водной поверхностью и атмосферой. В среднем p_{CO_2} в атмосфере, рассчитываемое с учетом атмосферного давления и абсо-

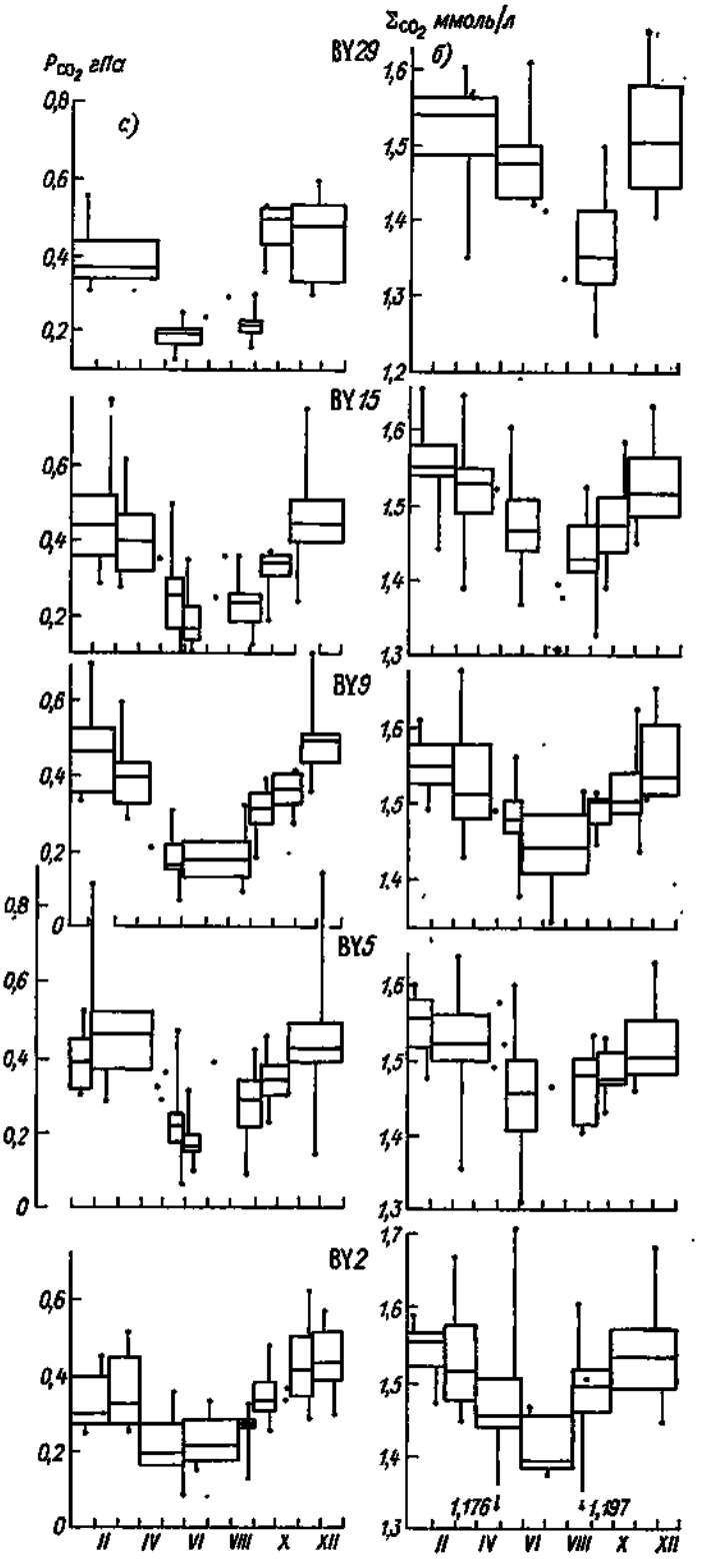


Рис. 13.23. Годовой ход квартильных оценок парциального давления двуокиси углерода (*а*) и суммарного содержания карбонатных форм (*б*) на поверхности по данным квартильного анализа для базовых станций.

лютной влажности воздуха, составляет около 0,33 гПа. При значениях p_{CO_2} в поверхностном слое меньших, чем 0,33 гПа, происходит поглощение двуокиси углерода водной поверхностью; при значениях, превышающих 0,33 гПа, поток направлен от поверхности в атмосферу. Таким образом атмосфера поддерживает определенную концентрацию CO_2 в океане, а океан является регулятором содер-

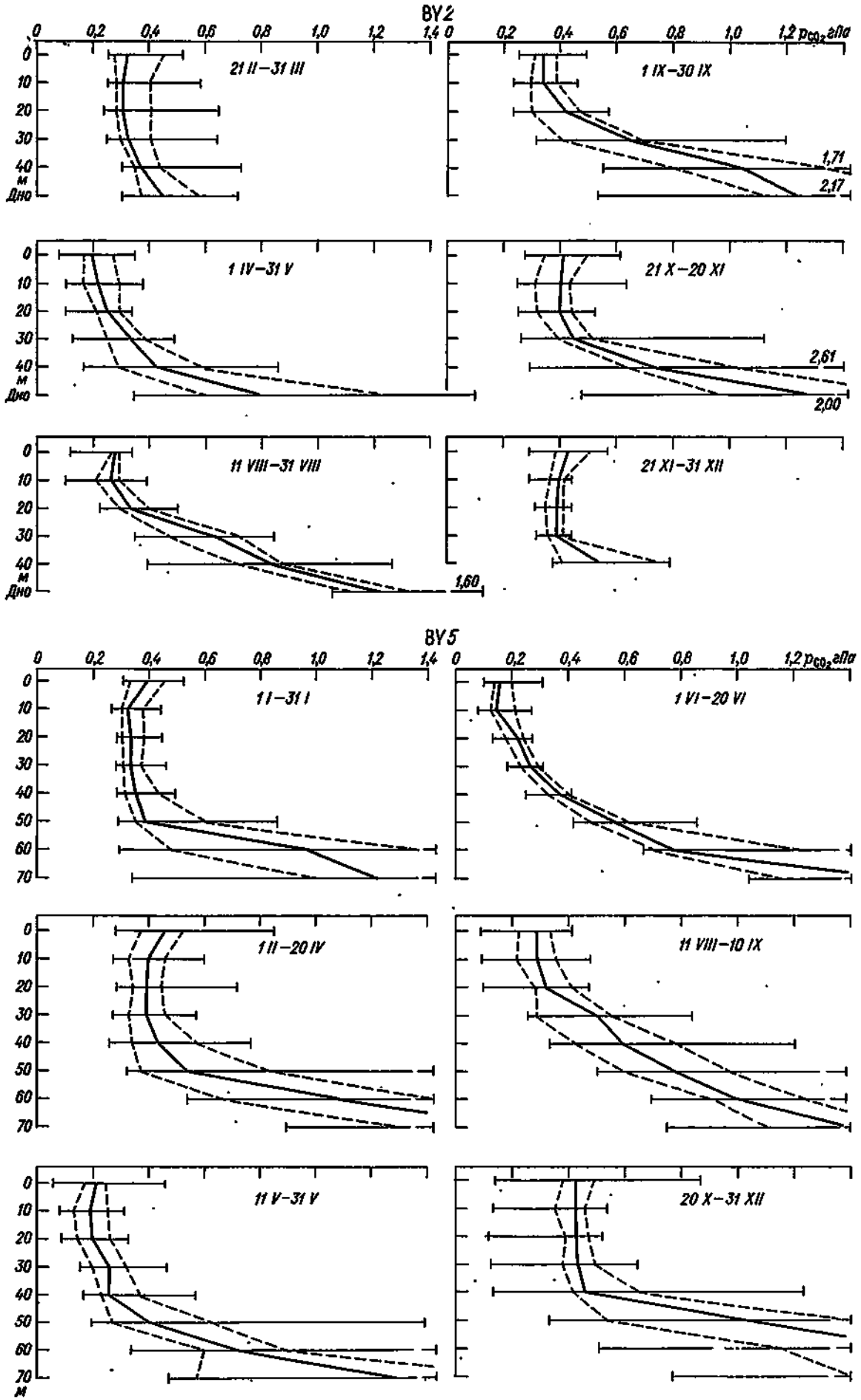


Рис. 10.24. Вертикальное распределение квартильных оценок парциального давления двуокиси углерода в Арконской (ст. BY 2), Борнхольмской (ст. BY 5) и Готландской (ст. BY 15) впадинах.

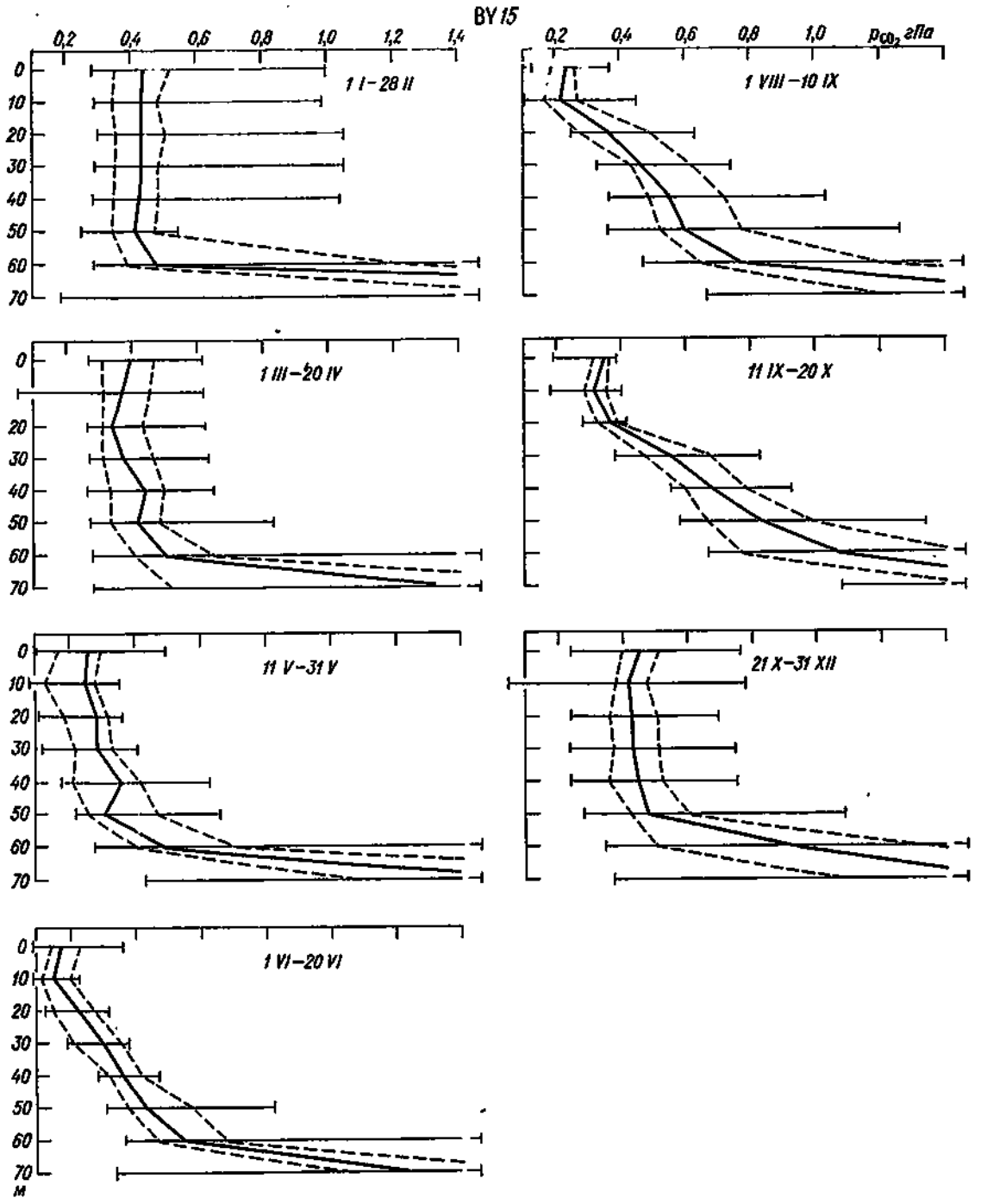


Рис. 13.24.

жания углекислого газа в атмосфере. Следует отметить, что p_{CO_2} зависит от температуры воды — возрастает при ее повышении и уменьшается при понижении.

Изменчивость p_{CO_2} в верхнем слое Балтийского моря, как и всей группы показателей, связанных с цикличностью биологических процессов, главным образом формируется сезонными изменениями соотношения продукционно-деструкционных процессов и формированием и разрушением летней термической стратификации. На этом фоне проявляется и влияние обмена CO_2 между водной поверхностью и атмосферой.

Из-за непосредственной связи изменений концентраций CO_2 и значений pH, как показывают статистические характеристики для поверхностного слоя базовых станций (рис. 13.23), годовой ход p_{CO_2} представляет собой отраженный (перевернутый) вид годового хода pH (см. рис. 13.1). Для анализа сезонной изменчивости p_{CO_2} и его вертикального распределения в верхнем слое (рис. 13.24) пригодны все заключения по динамике pH (см. п. 13.2.2). В данном разделе целесообразно рассмотреть лишь специфическую для p_{CO_2} информацию, касающуюся обмена двуокисью углерода между Балтийским морем и атмосферой. Статистические характеристики для станций в юго-западной части моря [Арконская впадина (ст. BY 2) и Борнхольмская впадина (ст. BY 5)] и в центральном районе (Готландская впадина, ст. BY 15) приведены в табл. 13.8 (для северной части моря характеристики близки к представленным для Готландской впадины).

Таблица 13.8

Статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — $(x_{0.25}—x_{0.75})$] внутригодовой изменчивости парциального давления двуокиси углерода p_{CO_2} (гПа) на станциях BY 15, BY 5 и BY 2

Горизонт. м	Зима			Весна					
	BY 15	BY 5	BY 2	BY 15	BY 5	BY 2	BY 15	BY 5	BY 2
	I I—28 II	I—31 I	I I—20 II	I III—20 IV	I III—20 IV	21 II—31 III	II—31 V	II—31 V	I IV—31 V
	n=14	n=8	n=9	n=12	n=15	n=8	n=14	n=10	n=18
0	0,44 0,36—0,52	0,39 0,32—0,45	0,32 0,27—0,40	0,40 0,32—0,47	0,45 0,37—0,52	0,34 0,27—0,45	0,25 0,17—0,30	0,22 0,18—0,25	0,20 0,16—0,27
10	0,43 0,35—0,49	0,33 0,30—0,38	0,32 0,27—0,39	0,39 0,32—0,46	0,40 0,33—0,46	0,32 0,28—0,40	0,23 0,13—0,28	0,20 0,13—0,26	0,22 0,16—0,29
20	0,44 0,36—0,51	0,33 0,30—0,38	0,31 0,27—0,33	0,36 0,32—0,44	0,39 0,34—0,45	0,32 0,28—0,40	0,27 0,19—0,32	0,20 0,15—0,26	0,24 0,20—0,29
30	0,44 0,36—0,49	0,33 0,30—0,37	0,30 0,27—0,33	0,39 0,32—0,47	0,40 0,33—0,46	0,33 0,29—0,40	0,28 0,22—0,33	0,26 0,20—0,32	0,31 0,24—0,38
40	0,43 0,36—0,49	0,36 0,31—0,43	0,38 0,28—0,48	0,43 0,34—0,50	0,44 0,34—0,56	0,38 0,34—0,43	0,34 0,21—0,42	0,28 0,23—0,37	0,42 0,29—0,57
50	0,42 0,35—0,48	0,43 0,35—0,60	0,47 0,42—0,52	0,42 0,34—0,49	0,56 0,37—0,82	0,45 0,37—0,56	0,35 0,26—0,47	0,43 0,27—0,62	0,83 0,59—1,21
60	0,64 0,39—1,22	0,94 0,48—1,35	—	0,52 0,41—0,65	1,05 0,66—1,40	—	0,53 0,43—0,72	0,73 0,60—0,88	—
70	2,25 1,93—2,50	1,27 0,99—1,64	—	1,60 0,52—3,22	1,79 1,27—2,33	—	1,72 1,08—2,48	1,23 0,58—1,79	—

Горизонт, м	Лето			Осень					
	BY 15	BY 5	BY 2	BY 15	BY 5	BY 2	BY 15	BY 5	BY 2
	1—20 VI	1—20 VI		I VIII—10 IX	II VIII—10 IX	11—31 VIII	21 X—31 XII	21 X—31 XII	21 X—21 XI
	n=10	n=7		n=15	n=14	n=9	n=24	n=18	n=13
0	0,18 0,14—0,23	0,17 0,15—0,20	—	0,23 0,19—0,26	0,29 0,22—0,34	0,27 0,26—0,28	0,45 0,40—0,51	0,43 0,38—0,49	0,42 0,34—0,50
10	0,15 0,11—0,21	0,15 0,13—0,21	—	0,22 0,17—0,27	0,29 0,22—0,35	0,25 0,20—0,28	0,43 0,38—0,48	0,41 0,35—0,46	0,38 0,31—0,43
20	0,21 0,14—0,27	0,22 0,18—0,24	—	0,38 0,28—0,49	0,33 0,28—0,41	0,33 0,28—0,39	0,43 0,36—0,51	0,42 0,39—0,47	0,38 0,31—0,44
30	0,29 0,20—0,36	0,26 0,23—0,29	—	0,49 0,43—0,61	0,47 0,29—0,56	0,60 0,45—0,70	0,43 0,37—0,51	0,44 0,38—0,50	0,44 0,39—0,51
40	0,36 0,32—0,42	0,36 0,33—0,39	—	0,58 0,49—0,72	0,59 0,42—0,78	0,80 0,70—0,86	0,45 0,36—0,53	0,50 0,42—0,66	0,78 0,64—1,02
50	0,45 0,38—0,57	0,55 0,47—0,61	—	0,58 0,52—0,63	0,78 0,60—0,96	1,22 1,11—1,32	0,50 0,43—0,60	0,99 0,56—1,35	1,28 0,96—1,66
60	0,56 0,47—0,68	0,86 0,69—1,22	—	0,83 0,64—1,18	1,03 0,90—1,23	—	0,91 0,50—1,29	1,61 1,16—1,90	—
70	1,33 1,06—1,78	1,59 1,14—2,22	—	1,91 1,18—2,97	1,39 1,10—1,73	—	1,75 1,10—2,58	1,93 1,41—2,45	—

Поскольку в течение осенних и зимних месяцев p_{CO_2} водной поверхности преимущественно выше, чем p_{CO_2} для атмосферы, в период с октября по 2-ю декаду апреля в центральных и северных районах и по март — в южных преобладает отдача CO_2 в атмосферу. Наибольшие значения p_{CO_2} отмечаются с конца октября по декабрь, диапазон значений $x_{0.25}$ и $x_{0.75}$ составляет в это время 0,38—0,50 гПа. При этом наблюдается уменьшение p_{CO_2} в направлении от центральной части моря к югу и северу (см. рис. 13.23, табл. 13.8). Наиболее интенсивна отдача избытка CO_2 в атмосферу в Арконской впадине, где уже в январе — марте для большей половины всех наблюдений значения p_{CO_2} близки к равновесному с атмосферой или ниже его. В Готландской котловине (станции BY 15 и BY 9) p_{CO_2} снижается во всей толще верхнего слоя в марте — начале апреля (см. рис. 13.24). Это означает, что процесс отдачи CO_2 в атмосферу доминирует над поступлением из глубинного слоя, или галоклина, усиливаемого зимней конвекцией. Данный эффект объясняет, по-видимому, и зимнее повышение pH, и снижение общей

Таблица 13.9

Многолетние статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — $(x_{0,25}—x_{0,75})$] парциального давления двуокиси углерода p_{CO_2} (гПа) в глубинном слое на станциях BY 29, BY 15, BY 9 и BY 5

Горизонт, м	BY 29	BY 15	BY 9	BY 5
70	1,47 0,83—2,29	1,80 1,15—2,58	1,77 1,09—2,31	1,64 1,16—2,23
80	2,38 1,73—3,19	2,73 1,90—3,42	2,41 2,00—2,98	1,95 1,27—2,64
100	2,94 2,37—3,87	3,15 2,36—4,01	2,45 1,98—2,94	2,05 1,49—2,78*
125	2,94 2,31—3,65	2,91 2,28—3,54	2,24 1,72—2,57*	—
150	2,90 2,35—3,60	3,41 2,60—4,25	—	—
175	3,05 2,39—3,72*	3,05 2,30—3,75	—	—
200	—	3,22 2,50—4,11	—	—
225	—	3,08 2,39—3,81	—	—
240	—	2,80 2,01—3,49*	—	—

* Значения для придонных горизонтов.

щелочности, отмеченные соответственно в пп. 13.2.2 и 13.3.2.

Отдача CO_2 в атмосферу продолжается вплоть до начала весенней вспышки фитопланктона, поскольку для большинства наблюдений значения p_{CO_2} выше 0,33 гПа. В Борнхольмской впадине во второй половине зимы, возможно, обогащение верхнего слоя двуокисью углерода за счет вертикального переноса из глубинного слоя доминирует над отдачей в атмосферу. В это время здесь наблюдаются более высокие значения рассчитанных характеристик, чем в январе, и наибольшие по сравнению с остальными станциями (см. табл. 13.8). Характерно, что для всех районов в период выделения CO_2 в атмосферу значения p_{CO_2} на поверхности несколько выше, чем для подповерхностных вод (см. рис. 13.24)

С началом весенней вспышки фитопланктона p_{CO_2} резко снижается, и в июне устанавливаются значения, равные годовому минимуму (см. рис. 13.24). Согласно полученным данным, период значений, более низких, чем для p_{CO_2} в атмосфере, продолжается в Балтийском море около 5 мес. Начинающееся в сентябре возрастание содержания CO_2 на поверхности моря еще не обеспечивает превышение значений p_{CO_2} по сравнению с атмосферными. Ранее этот период определялся в 3—4 мес [19].

В толще глубинных вод содержание CO_2 почти в 10 раз больше, чем в верхнем слое (табл. 13.9). Особенно большие концентрации CO_2 характерны для глубин более 100 м, для которых диапазон преобладающих значений p_{CO_2}, характеризуемый показателями $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$, составляет 2,3—4,3 гПа. Наибольшее содержание CO_2 отмечается в глубинном слое Готландской впадины; близкие к нему показатели характерны для северной части моря (ст. BY 29). В направлении к югу по мере уменьшения глубин и приближения к проливной зоне значения p_{CO_2} заметно снижаются (см. табл. 13.9). Вероятной причиной более низкого содержания двуокиси углерода в Борнхольмской впадине (ст. BY 5) и в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) являются более частые обновления глубинного слоя в этих районах за счет адвекций североморских (каттегатских) вод.

В вертикальном распределении p_{CO_2} в Готландской впадине выделяется максимум на верхней границе придонного слоя — на глубине 150 м, где значения характеристик даже выше, чем у дна. В направлении ко дну значения p_{CO_2} заметно снижаются (pH повышается). Аналогичный эффект характерен и для юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), в то время как в Борнхольмской впадине (ст. BY 5) и в северной части моря значения характеристик у дна несколько выше, чем в придонном слое.

Рассчитанные значения p_{CO_2} для глубинного слоя Балтийского моря (см. табл. 13.9) согласуются с приведенными в [19]. Характерно, что и те, и другие значительно превышают результаты, приведенные в качестве максимальных для океана [1].

Карбонатное равновесие и общее содержание карбонатов

Годовой ход содержания индивидуальных компонентов карбонатного равновесия, представленный на рис. 13.25 и в табл. 13.10, интересен тем, что отражает сезонную динамику системы в целом по непосредственным ее характеристикам, а не по косвенным показателям (pH, щелочность).

Главным фактором сезонных изменений состояния карбонатного равновесия является годовой ход концентраций CO_2, хотя ее доля в сумме общего содержания карбонатов ΣCO_2 весьма мала [в верхнем слое Балтики для подавляющего большинства наблюдений менее 2 % (см. табл. 13.10)]. В соответствии с равновесиями, представленными формулой (13.2), при уменьшении концентраций CO_2 (в результате потребления при фотосинтезе) в фотическом слое возрастает pH, уменьшается концентрация гидрокарбонатных ионов и увеличивается концентрация карбонатных. Снижается и общее содержание карбонатов, наибольшую долю в котором составляют гидрокарбонаты (в верхнем слое для большинства данных более 95 %).

Годовой ход общего содержания карбонатов ΣCO_2 (см. рис. 13.23) и годовой ход концентраций гидрокарбонатов (см. рис. 13.25) идентичны — противоположная направленность сезонных изменений концентраций CO_3^{2-} не оказывает влияния, так как уравновешивается изменениями содержания CO_2. Можно отметить, что годовые колебания $Alk_{карб}$ (см. рис. 13.12) более сглажены, поскольку этот показатель отражает суммарное содержание HCO_3^- и CO_3^{2-}. В изменениях общей щелочности особенности динамики карбонатных соединений сглажены еще более. Это иллюстрирует сопоставление вертикального распределения ΣCO_2 (рис. 13.26) и общей щелочности (см. рис. 13.16).

Представленные в табл. 13.10 характеристики процентного соотношения карбонатных форм отражают стабильное относительное содержание гидро-

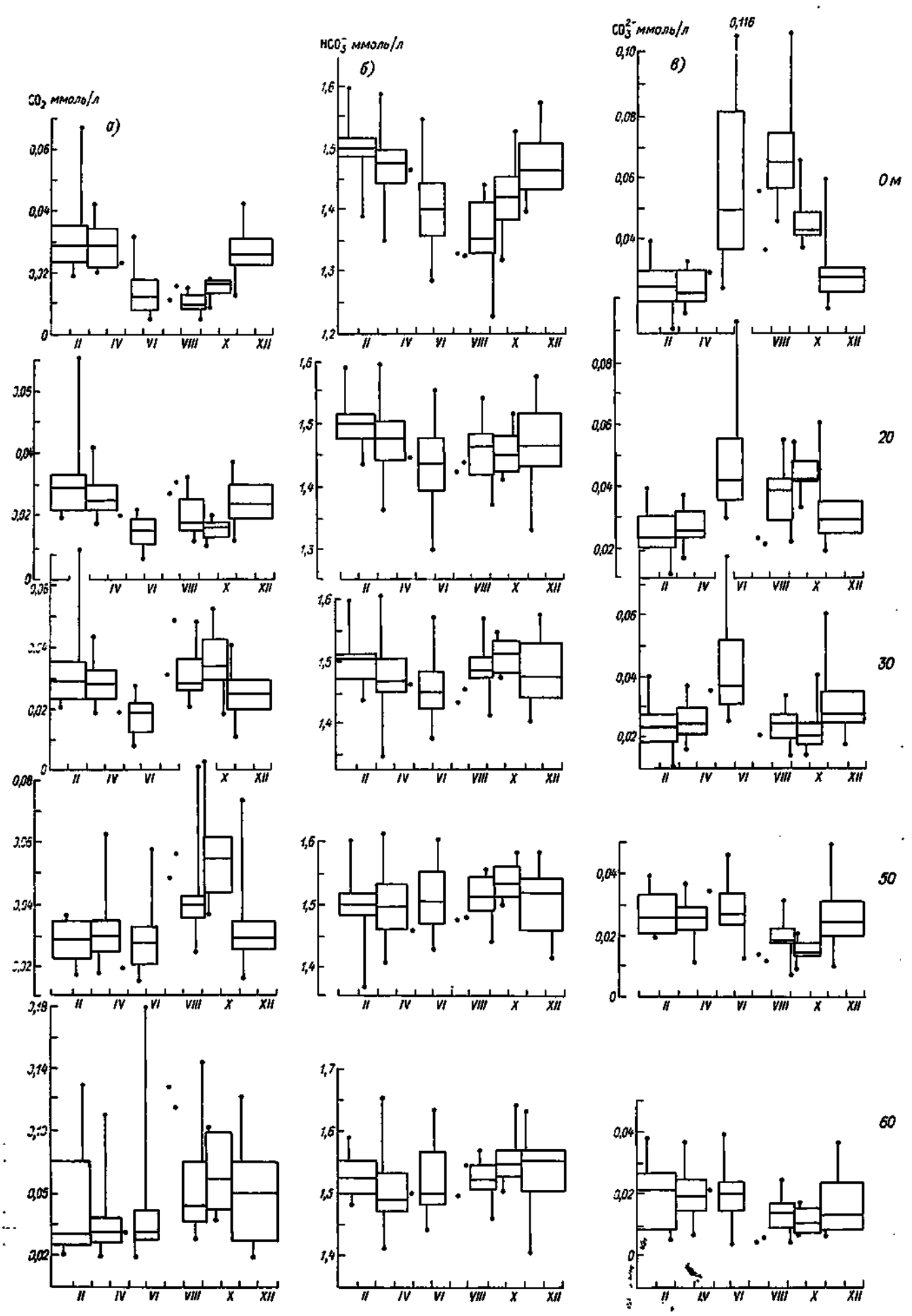


Рис. 13.25. Годовой ход содержания двуокиси углерода (*а*), гидрокарбонатов (*б*) и карбонатов (*в*) на стандартных горизонтах Готландской впадины (ст. BY 15) по данным квартильного анализа.

Таблица 13.10

Статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — $(x_{0.25}—x_{0.75})$] внутригодовой изменчивости общего содержания компонентов карбонатной системы (ΣCO_2) и их процентного содержания в ΣCO_2

Горизонт, м	ΣCO_2	$H_2CO_3+CO_2$	HCO_3^-	CO_3^{2-}	ΣCO_2	$H_2CO_3+CO_2$	HCO_3^-	CO_3^{2-}
	ммоль/л	%			ммоль/л	%		
Зима								
Ст. BY 15								
	1 II—28 II ($n=14$)				1 III—20 IV ($n=12$)			
0	1,56 1,54—1,58	1,9 1,5—2,3	96,5 96,4—96,5	1,6 1,3—2,0	1,53 1,49—1,55	1,9 1,5—2,2	96,5 96,4—96,5	1,6 1,3—2,0
10	1,55 1,53—1,58	1,8 1,5—2,2	96,5 96,4—96,5	1,6 1,3—2,0	1,54 1,51—1,58	1,8 1,5—2,1	96,5 96,4—96,5	1,7 1,4—2,0
20	1,56 1,53—1,58	1,9 1,5—2,2	96,5 96,4—96,5	1,6 1,3—2,0	1,53 1,50—1,56	1,7 1,5—2,0	96,5 96,4—96,6	1,7 1,5—2,0
30	1,56 1,53—1,57	1,9 1,6—2,3	96,5 96,4—96,5	1,6 1,3—1,9	1,53 1,51—1,56	1,8 1,5—2,1	96,5 96,4—96,6	1,7 1,4—1,9
40	1,55 1,54—1,58	1,9 1,5—2,2	96,5 96,4—96,6	1,6 1,3—2,0	1,54 1,51—1,55	1,9 1,6—2,2	96,5 96,4—96,5	1,6 1,3—1,8
50	1,55 1,53—1,57	1,8 1,4—2,2	96,5 96,4—96,5	1,7 1,3—2,2	1,55 1,51—1,58	1,9 1,6—2,1	96,5 96,4—96,5	1,6 1,4—1,8
60	1,60 1,56—1,65	2,7 1,7—5,0	95,9 94,4—96,5	1,3 0,6—1,8	1,55 1,53—1,59	2,3 1,8—2,9	96,3 96,1—96,5	1,3 1,0—1,7
70	1,76 1,72—1,80	8,2 7,0—8,8	91,5 90,8—92,6	0,4 0,3—0,4	1,66 1,57—1,89	5,7 2,2—10,6	93,6 89,1—96,3	0,7 0,3—1,4
Ст. BY 5								
	1—31 I ($n=8$)				1 II—20 IV ($n=15$)			
0	1,55 1,52—1,58	1,6 1,4—1,8	96,5 96,4—96,5	1,9 1,7—2,2	1,53 1,50—1,56	2,1 1,7—2,3	96,5 96,4—96,5	1,5 1,3—1,8
10	1,54 1,51—1,57	1,4 1,3—1,6	96,4 96,3—96,5	2,2 1,9—2,4	1,52 1,49—1,55	1,8 1,6—2,1	96,5 96,4—96,5	1,6 1,4—1,9
20	1,56 1,52—1,59	1,4 1,3—1,6	96,4 96,3—96,5	2,2 1,9—2,4	1,52 1,50—1,54	1,8 1,6—2,1	96,5 96,5—96,5	1,6 1,4—1,9
30	1,56 1,51—1,61	1,4 1,3—1,5	96,4 96,3—96,5	2,2 1,9—2,4	1,52 1,48—1,55	1,8 1,5—2,1	96,5 96,4—96,5	1,7 1,4—2,0
40	1,57 1,51—1,61	1,5 1,3—1,7	96,4 96,4—96,5	2,1 1,8—2,3	1,53 1,51—1,56	1,9 1,5—2,4	96,4 96,3—96,5	1,6 1,3—1,9
50	1,57 1,52—1,61	1,7 1,4—2,2	96,4 96,2—96,5	1,9 1,5—2,2	1,57 1,52—1,61	2,5 1,6—3,3	96,2 95,7—96,4	1,4 1,0—1,8
60	1,70 1,60—1,81	3,0 1,9—3,9	95,7 95,1—96,3	1,3 0,9—1,7	1,72 1,70—1,77	3,6 2,5—5,0	95,3 94,3—96,1	1,1 0,7—1,3
70	1,84 1,75—1,91	3,6 2,9—4,6	95,3 94,6—95,8	1,1 0,8—1,3	1,84 1,79—1,93	5,3 4,3—6,9	94,0 93,6—94,9	0,7 0,5—0,8
Ст. BY 2								
	1 I—20 II ($n=9$)				21 II—31 III ($n=8$)			
0	1,55 1,52—1,57	1,4 1,2—1,6	96,4 96,4—96,4	2,2 2,0—2,5	1,52 1,48—1,57	1,6 1,2—2,0	96,4 96,3—96,5	2,0 1,6—2,4
10	1,56 1,54—1,58	1,4 1,2—1,6	96,4 96,2—96,4	2,3 2,0—2,6	1,53 1,50—1,59	1,5 1,3—1,7	96,4 96,3—96,5	2,1 1,7—2,3
20	1,56 1,54—1,57	1,3 1,1—1,4	96,3 96,2—96,4	2,4 2,1—2,7	1,53 1,50—1,60	1,5 1,3—1,8	96,4 96,2—96,5	2,1 1,7—2,4
30	1,60 1,56—1,62	1,3 1,1—1,4	96,2 96,1—96,3	2,5 2,3—2,7	1,57 1,51—1,64	1,5 1,3—1,8	96,4 96,2—96,4	2,1 1,7—2,3
40	1,67 1,59—1,73	1,4 1,1—1,7	96,0 95,8—96,2	2,6 2,2—3,1	1,67 1,61—1,74	1,6 1,4—1,7	96,0 95,9—96,3	2,3 1,9—2,7
Дно	1,75 1,70—1,78	1,6 1,4—1,7	95,9 95,7—96,0	2,5 2,3—2,8	1,73 1,66—1,79	1,7 1,4—2,0	95,9 95,8—96,1	2,3 1,8—2,7

Горизонт, м	ΣCO_2	$H_2CO_3+CO_2$	HCO_3^-	CO_3^{2-}	ΣCO_2	$H_2CO_3+CO_2$	HCO_3^-	CO_3^{2-}
	ммоль/л	%			ммоль/л	%		
Весна — лето								
Ст. BY 15								
	11 V—20 VI (n=24)				1 VIII—10 IX (n=15)			
0	1,47 1,44—1,51	0,9 0,5—1,2	95,5 95,1—96,3	3,7 2,5—5,4	1,44 1,42—1,48	0,7 0,6—0,8	94,7 94,2—95,3	4,6 3,9—5,2
10	1,48 1,44—1,50	0,8 0,5—1,0	95,1 93,6—96,1	4,2 2,9—5,9	1,44 1,40—1,48	0,7 0,5—0,8	94,5 93,6—95,4	4,8 3,8—5,9
20	1,50 1,46—1,54	1,1 0,8—1,3	96,0 95,5—96,4	2,9 2,3—3,7	1,51 1,48—1,54	1,3 1,1—1,7	96,3 96,1—96,5	2,4 1,8—2,7
30	1,51 1,48—1,54	1,2 0,8—1,5	96,2 95,6—96,5	2,6 2,0—3,5	1,54 1,53—1,56	1,9 1,7—2,3	96,5 96,4—96,5	1,6 1,3—1,8
40	1,53 1,49—1,57	1,5 1,2—1,8	96,5 96,3—96,5	2,0 1,6—2,4	1,56 1,53—1,58	2,4 2,0—3,1	96,3 96,0—96,5	1,3 1,0—1,5
50	1,56 1,53—1,60	1,7 1,4—2,1	96,4 96,3—96,5	1,8 1,5—2,2	1,57 1,54—1,60	2,5 2,2—2,7	96,3 96,2—96,4	1,2 1,1—1,4
60	1,57 1,54—1,63	2,4 1,9—3,1	96,3 95,9—96,5	1,3 1,0—1,5	1,60 1,58—1,64	3,5 2,7—4,9	95,6 94,5—96,2	0,9 0,6—1,1
70	1,71 1,64—1,80	6,1 4,5—8,7	93,4 90,9—94,9	0,5 0,3—0,7	1,73 1,65—1,84	7,1 4,7—10,4	92,5 89,3—94,6	0,5 0,3—0,6
Ст. BY 5								
	11 V—20 VI (n=17)				11 VIII—10 IX (n=14)			
0	1,46 1,41—1,50	0,8 0,6—1,0	95,2 94,2—96,0	4,0 2,9—5,2	1,47 1,42—1,50	0,8 0,7—0,9	95,3 94,7—95,7	3,9 3,4—4,6
10	1,45 1,41—1,49	0,7 0,6—1,0	95,9 94,2—95,9	4,4 3,1—5,2	1,47 1,41—1,52	0,8 0,6—1,0	95,2 94,3—95,6	4,0 3,2—5,0
20	1,48 1,45—1,51	0,8 0,6—1,0	95,4 94,8—95,8	3,7 3,2—4,6	1,50 1,46—1,53	1,0 0,8—1,3	95,7 95,1—96,2	3,3 2,5—4,1
30	1,50 1,47—1,54	1,0 0,8—1,2	96,0 95,6—96,3	3,0 2,4—3,5	1,55 1,50—1,57	1,7 1,2—2,2	96,3 96,1—96,5	1,9 1,4—2,5
40	1,53 1,50—1,57	1,3 1,1—1,6	96,3 96,1—96,5	2,3 1,9—2,8	1,58 1,55—1,61	2,3 1,7—3,0	96,3 96,0—96,5	1,4 1,0—1,7
50	1,60 1,55—1,66	2,0 1,6—2,5	96,2 95,7—96,4	1,7 1,3—2,0	1,63 1,59—1,70	2,5 2,3—3,8	96,0 95,4—96,4	1,2 0,9—1,4
60	1,71 1,67—1,76	3,1 2,5—4,1	95,7 95,1—96,0	1,2 0,9—1,5	1,73 1,68—1,78	3,3 2,6—3,8	95,6 95,2—95,9	1,1 0,9—1,4
70	1,82 1,77—1,89	4,4 3,7—5,4	94,8 93,9—95,3	0,9 0,7—1,0	1,84 1,80—1,86	4,0 3,3—4,5	95,0 94,6—95,5	1,0 0,9—1,2
Ст. BY 2								
	1 IV—31 V (n=18)				1 VI—10 VIII (n=6)			
0	1,46 1,44—1,51	0,8 0,6—1,0	95,3 94,2—96,0	3,9 3,0—5,3	1,41 1,39—1,46	0,7 0,6—0,9	94,8 94,1—95,6	4,5 3,6—5,3
10	1,49 1,46—1,52	0,9 0,5—1,2	95,3 93,6—96,2	3,9 2,6—5,9	1,43 1,41—1,45	0,7 0,6—0,8	94,8 94,2—95,3	4,5 3,9—5,2
20	1,51 1,48—1,53	1,0 0,7—1,2	95,8 94,9—96,2	3,2 2,5—4,4	1,50 1,48—1,51	1,1 0,9—1,6	96,0 95,8—96,1	2,8 1,9—3,3
30	1,55 1,50—1,63	1,3 0,9—2,0	96,1 95,3—96,4	2,7 2,0—3,8	1,57 1,53—1,61	2,3 0,8—3,4	95,9 95,2—96,3	1,5 0,9—1,9
40	1,64 1,56—1,75	1,7 1,3—2,0	95,9 95,5—96,2	2,2 1,5—3,0	1,70 1,67—1,74	2,7 1,9—3,4	95,7 95,6—96,0	1,5 1,1—2,1
Дно	1,83 1,77—1,87	2,7 2,0—4,1	95,6 95,0—96,0	1,4 0,9—2,0	—	—	—	—

Продолжение табл. 13.10

Горизонт, м	ΣCO_2	$H_2CO_3+CO_2$	HCO_3^-	CO_3^{2-}	ΣCO_2	$H_2CO_3+CO_2$	HCO_3^-	CO_3^{2-}
	ммоль/л	%			ммоль/л	%		
Осень								
Ст. BY 15								
	11 IX—20 X (n=6)				21 X—31 XII (n=24)			
0	1,48 1,44—1,51	1,1 0,9—1,1	96,00 95,7—96,1	2,9 2,8—3,3	1,52 1,49—1,56	1,7 1,5—2,0	96,5 96,4—96,5	1,8 1,5—2,0
10	1,49 1,47—1,50	1,0 0,9—1,1	95,9 95,7—96,1	3,1 2,8—3,4	1,51 1,47—1,56	1,6 1,4—1,9	96,5 96,3—96,5	1,9 1,6—2,1
20	1,51 1,49—1,54	1,1 1,0—1,2	96,1 95,8—96,2	2,8 2,6—3,2	1,52 1,48—1,57	1,6 1,3—1,9	96,5 96,3—96,5	1,9 1,5—2,3
30	1,57 1,54—1,60	2,2 1,9—2,6	96,3 96,2—96,5	1,4 1,1—1,6	1,54 1,49—1,59	1,6 1,3—1,9	96,5 96,3—96,5	1,9 1,6—2,3
40	1,59 1,55—1,62	2,8 2,5—3,1	96,2 95,9—96,3	1,1 1,0—1,2	1,54 1,50—1,59	1,7 1,4—2,0	96,5 96,3—96,5	1,8 1,5—2,2
50	1,60 1,57—1,66	3,3 2,7—3,7	95,8 95,5—96,2	0,9 0,8—1,1	1,56 1,50—1,60	1,9 1,6—2,3	96,4 96,1—96,5	1,6 1,3—1,9
60	1,63 1,61—1,68	2,3 3,0—5,7	95,0 93,8—96,0	0,7 0,5—1,0	1,63 1,58—1,66	3,7 2,0—5,3	95,4 94,2—96,5	0,9 0,5—1,5
70	1,72 1,66—1,78	7,2 5,8—8,9	92,4 90,8—93,7	0,4 0,3—0,5	1,71 1,64—1,80	6,5 4,4—9,2	93,0 90,4—94,9	0,5 0,3—0,7
Ст. BY 5								
	21 X—31 XII (n=18)							
0	1,51 1,48—1,55	1,68 1,4—1,9	96,4 96,4—96,5	1,9 1,7—2,3				
10	1,52 1,48—1,55	1,5 1,2—1,8	96,4 96,2—96,5	2,1 1,7—2,6				
20	1,51 1,48—1,55	1,5 1,3—1,7	96,4 96,4—96,5	2,0 1,8—2,3				
30	1,53 1,49—1,57	1,6 1,4—1,8	96,4 96,3—96,5	2,0 1,8—2,2				
40	1,54 1,51—1,59	1,9 1,5—2,5	96,3 96,1—96,5	1,7 1,2—2,0				
50	1,63 1,58—1,68	3,6 2,0—4,9	95,4 94,5—96,3	1,0 0,6—1,6				
60	1,77 1,73—1,81	4,9 3,4—6,0	94,4 93,4—95,4	0,8 0,6—1,1				
70	1,89 1,83—1,94	5,6 4,1—7,0	93,7 92,5—94,9	0,7 0,5—0,9				
Ст. BY 2								
	11 VIII—10 IX (n=18)				1 X—31 XII (n=21)			
0	1,50 1,46—1,52	0,8 0,7—0,9	95,2 94,9—95,5	3,8 3,5—4,3	1,53 1,49—1,57	1,4 1,2—1,6	96,3 96,0—96,4	2,3 1,9—2,9
10	1,50 1,47—1,52	0,8 0,7—1,0	95,2 94,6—95,8	3,9 3,3—4,7	1,54 1,51—1,58	1,3 1,1—1,5	96,2 96,0—96,4	2,4 2,0—2,9
20	1,52 1,50—1,56	1,1 0,8—1,3	95,8 95,4—96,2	3,1 2,4—3,8	1,54 1,51—1,57	1,4 1,1—1,6	96,2 95,9—96,4	2,4 2,1—2,9
30	1,61 1,56—1,68	1,7 1,1—2,1	95,9 95,6—96,3	2,0 1,5—3,2	1,60 1,52—1,69	1,4 1,3—1,6	96,2 95,8—96,4	2,3 1,9—2,9
40	1,75 1,70—1,81	2,3 1,8—2,9	95,9 95,6—96,0	1,8 1,4—2,1	1,72 1,65—1,80	2,0 1,6—2,4	95,8 95,6—96,0	2,0 1,5—2,6
Дно	1,87 1,83—1,93	3,3 3,8—4,2	95,4 94,8—95,6	1,3 0,9—1,5	1,87 1,77—1,93	3,0 2,0—3,9	95,4 94,9—95,8	1,5 1,1—2,1

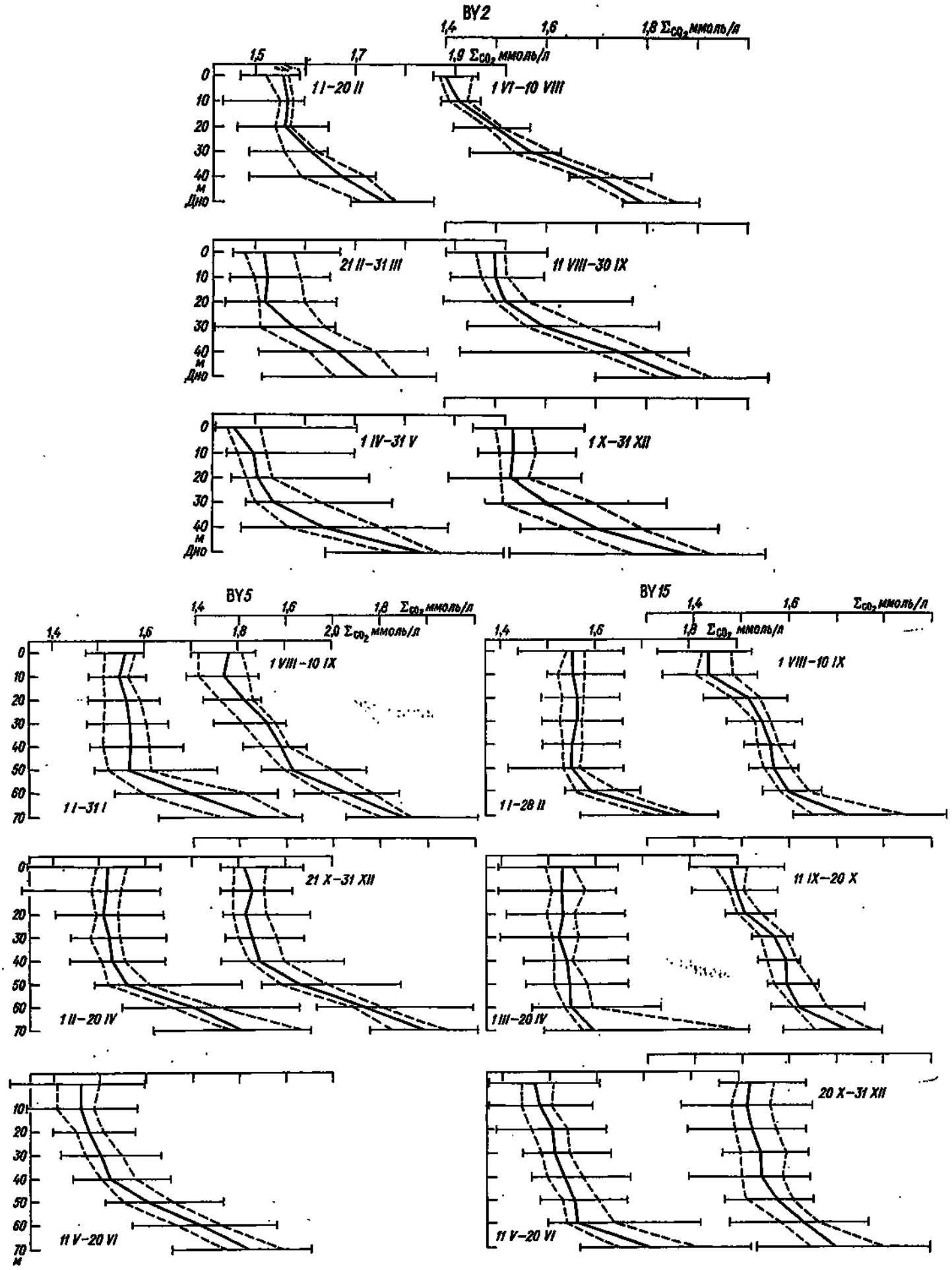


Рис. 13.26. Вертикальное распределение квартильных оценок суммарного содержания карбонатных соединений в Арконской (ст. BY 2), Борнхольмской (ст. BY 5) и Готландской (ст. BY 15) впадинах.

Таблица 13.11

Многолетние статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — ($x_{0,25}$—$x_{0,75}$)] общего содержания компонентов карбонатной системы (ΣCO_2) и их процентного содержания в ΣCO_2 в глубинном слое

Горизонт., м	ΣCO_2	$H_2CO_3+CO_2$	HCO_3^-	CO_3^{2-}	n
	ммоль/л	%			
Ст. BY 29					
70	1,69 / 1,62—1,76	5,8 / 3,4—8,6	93,6 / 91,0—95,7	0,6 / 0,3—0,9	51
80	1,79 / 1,72—1,86	8,3 / 6,1—10,7	91,3 / 89,0—93,4	0,4 / 0,3—0,5	48
100	1,85 / 1,79—1,93	9,5 / 8,0—12,1	90,2 / 87,7—91,6	0,3 / 0,2—0,4	48
125	1,87 / 1,80—1,95	9,7 / 7,7—12,1	90,0 / 87,7—91,9	0,3 / 0,2—0,4	48
150	1,88 / 1,82—1,95	9,3 / 7,7—11,2	90,3 / 88,5—91,9	0,3 / 0,3—0,4	48
175	1,89 / 1,83—1,96	9,8 / 7,7—11,9	89,9 / 87,9—91,9	0,3 / 0,3—0,4	45
Ст. BY 15					
70	1,71 / 1,63—1,80	6,8 / 4,7—9,0	92,7 / 90,7—94,7	0,5 / 0,3—0,7	—
80	1,81 / 1,74—1,88	9,5 / 7,1—11,4	90,1 / 88,2—92,5	0,3 / 0,2—0,4	—
100	1,87 / 1,81—1,93	10,2 / 7,8—12,8	89,4 / 87,0—91,8	0,3 / 0,2—0,4	—
150	1,94 / 1,87—2,01	10,4 / 8,3—12,5	89,3 / 87,2—91,3	0,3 / 0,2—0,4	—
200	1,96 / 1,89—2,03	9,6 / 7,5—11,8	90,0 / 87,9—92,0	0,3 / 0,3—0,5	—
225	1,96 / 1,89—2,03	9,1 / 7,3—11,1	90,5 / 88,5—92,2	0,4 / 0,3—0,4	—
Дно (233—240 м)	1,95 / 1,89—2,02	8,3 / 6,0—10,1	91,2 / 89,6—93,4	0,4 / 0,3—0,6	—
Ст. BY 9					
70	1,72 / 1,64—1,79	6,4 / 4,2—8,4	93,1 / 91,3—94,9	0,5 / 0,4—0,7	55
80	1,81 / 1,75—1,86	8,2 / 6,8—10,0	91,4 / 89,7—92,8	0,4 / 0,3—0,5	59
100	1,85 / 1,80—1,91	8,0 / 6,5—9,4	91,6 / 90,3—93,0	0,4 / 0,3—0,5	60
Дно	1,85 / 1,79—1,89	7,2 / 5,9—8,0	92,4 / 91,6—93,5	0,5 / 0,4—0,6	44
Ст. BY 5					
70	1,85 / 1,80—1,90	4,8 / 3,6—6,6	94,3 / 92,8—95,3	0,8 / 0,5—1,1	79
80	1,91 / 1,84—1,99	5,8 / 3,8—7,9	93,5 / 91,7—95,1	0,7 / 0,5—1,0	80
Дно (85—88 м)	1,95 / 1,88—2,01	5,8 / 4,3—7,7	93,5 / 91,9—94,8	0,7 / 0,5—0,9	69

карбонатов и более значительные изменения доли CO_2 и карбонатов в течение года, особенно в фотическом слое. Весной и летом процент CO_2 в слое 0—10 м снижается почти вдвое по сравнению с зимой и составляет в среднем менее 1 %, тогда как доля карбонатных ионов возрастает примерно втрое — до 4,8 % (по данным для ст. BY 15). На фоне малых значений этих показателей довольно заметны их пространственные и вертикальные различия.

Сопоставление данных соотношений с океаническими при одинаковых значениях pH [1] выявляет повышенное содержание в балтийских водах гидрокарбонатов и очень низкое — карбонатов. Содержание CO_2 в верхнем слое Балтики также несколько выше, чем в океанических водах.

В глубинном слое моря содержание гидрокарбонатов по сравнению с верхним слоем снижается довольно существенно и составляет 95—96 и 90—93 % ΣCO_2 соответственно. Сильно снижается и содержание карбонат-ионов — до 0,2—0,5 %. Относительное содержание свободной двуокиси углерода резко увеличивается и в среднем составляет до 10 % ΣCO_2 (в верхнем слое зимой — около 2 %). Общее содержание карбонатов возрастает с глубиной, но не столь значительно: 1,5 ммоль/л в верхнем слое и 1,9 ммоль/л в глубинном (табл. 13.11).

Наибольшее общее содержание карбонатов характерно для придонного слоя Готландской и Борнхольмской впадин: по значениям показателей $x_{0,25}$ и $x_{0,75}$ оно находится в диапазоне 1,9—2,0 ммоль/л. Существенные пространственные различия отмечаются в глубинных водах и в соотношении карбонатных форм. В направлении с юга на север доля двуокиси углерода возрастает в среднем от 6 % в Борнхольмской до 9—10 % в Готландской впадине и в северной части моря, в то время как процентное содержание гидрокарбонатных и карбонатных ионов в этом направлении снижается.

14. БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Собирательным термином «биогенные элементы», или «биогены» («nutrients» — питательные вещества), в отечественной гидрохимической литературе принято называть как сами химические элементы: азот, фосфор и кремний, так и их минеральные и органические соединения. Причиной особого внимания и интенсивного многолетнего изучения пространственной-временной динамики и биогеохимических круговоротов биогенных элементов в Мировом океане и водоемах суши является то, что биогены входят в число основных химических элементов, из которых состоит живое вещество водных организмов, но, в отличие от углерода, кислорода, водорода и серы, они содержатся в воде в столь небольших количествах, что уменьшение или увеличение их концентраций приводит к снижению (лимитация) или возрастанию (стимуляция) первичной продукции органического вещества водными расте-

ниями и тем самым определяет биологическую продуктивность и качество воды.

Биогенные элементы содержатся в составе живого вещества в строго определенных пропорциях, заметные изменения которых приводят к потере организмами их жизнеспособности. Для фитопланктона в целом эти пропорции выражаются атомным соотношением C : Si : N : P = 106 : 31 : 16 : 1 (соотношение Флемминга—Редфилда) [96], для диатомового фитопланктона, клетки которого заключены в кремнистые створки, это соотношение можно полагать равным 90 : 35 : 10 : 1, хотя приводятся и другие значения — N : P : Si = 16 : 1 : 16 [509]. Концепция «лимитирующего биогенного элемента» основана на предположении, что в процессе биосинтеза фитопланктон извлекает из воды и ассимилирует биогены в таких или близких к ним соотношениях. Применение этой концепции с целью выявления лимитирующего (в тех или иных пространственно-временны́х масштабах) элемента заключается в расчете подобных соотношений по данным наблюдений и сопоставлении их с соотношением Флемминга—Редфилда: если значение N : P заметно меньше 16, лимитирующим считается азот, если больше — фосфор.

Закономерности сезонных, межгодовых и многолетних изменений содержания и распределения соединений биогенов в Балтийском море рассматриваются, например, в работах [21, 54, 111—114, 129, 136, 142, 225, 230, 260, 264, 374—387, 469, 494, 505—509].

Биогеохимический круговорот биогенных элементов в открытых водах Балтийского моря формируется как их поступлением извне (см. п. 15.1), так и процессами транспорта и трансформации, детально рассмотренными в гл. 10. Учитывая, однако, что закономерности пространственно-временно́го распределения биогенов, описанию которых посвящена данная глава, являются лишь следствием, проявлением этих процессов, целесообразно предварить анализ натурных данных по отдельным элементам кратким описанием общих для всех биогенов процессов круговорота и предпослать анализу каждого элемента напоминание о специфических химико-биологических звеньях его круговорота.

Пространственно-временна́я динамика содержания биогенов в Балтийском море определяется, наряду с такими процессами транспорта, как адвекция, диффузия и гравитационное оседание взвешенных веществ, следующими химико-биологическими процессами:

— фотосинтетической ассимиляцией неорганических форм биогенов фитопланктоном, протекающей в верхних достаточно освещенных слоях воды; при этом и специальные экспериментальные исследования, и низкие значения отношения N : P от 4 до 6 (в атомном выражении) на поверхности моря накануне биологической весны указывают, что в последние десятилетия именно азот лимитирует первичную продукцию в открытых районах Балтийского моря [401];

— внеклеточной экскрецией (эксудацией) промежуточных продуктов фотосинтеза фитопланктоном в виде легкоокисляемых органических азот- и фосфорсодержащих соединений;

— экскрецией минеральных (в виде аммония и фосфатов) и легкоминерализуемых органических (мочевая кислота, мочевина, аминокислоты, липиды и т. п.) продуктов катаболизма зоопланктоном; летом, в период максимального развития зоопланктонного сообщества, экскреция служит одним из важнейших источников биогенов (в первую очередь азота), необходимых для поддержания первичной продукции фитопланктона в истощенных поверхностных слоях моря;

— минерализацией (аммонификацией и фосфатофикацией), проходящей повсеместно как при автолизе стареющих или отмерших клеток водорослей, так и в процессе биохимической деструкции органического вещества аэробными и анаэробными микроорганизмами; регенерация силикатов осуществляется в результате растворения створок диатомовых водорослей и кремнийсодержащих частей других организмов.

14.1. Азот

Азот представлен в воде целым рядом неорганических и органических соединений. К важнейшим неорганическим соединениям относятся ионы аммония NH_4^+, нитритов NO_2^- и нитратов NO_3^-, а также растворенные газы — молекулярный азот N_2 и закись азота N_2O, а к органическим — азотсодержащие соединения, входящие в состав взвешенных в воде останков организмов (детрита), находящихся на различных стадиях разложения, коллоидов и растворенных молекул. В Балтийском море большая доля растворенного органического азота входит в состав терригенных гумусоподобных веществ, чрезвычайно устойчивых к процессам деструкции [111].

В отличие от других биогенных элементов, специфическими для биогеохимического круговорота азота являются следующие химико-биологические процессы:

— фиксация молекулярного растворенного азота N_2 свето- и теплолюбивыми азотфиксирующими сине-зелеными водорослями (цианобактериями *Aphanizomenon flos-aquae* и *Nodularia spumigena*), протекающая в июле—августе в условиях недостатка других неорганических соединений азота (K. Kononen. Dynamics of the toxic cyanobacterial blooms in the Baltic Sea. Fin. Mar. Res., 1992, N 261) и являющаяся внешним источником, вовлекающим N_2 в биогеохимический круговорот (см. п. 15.1);

— нитрификация, протекающая в две стадии — окисление аммония до нитритов и окисление нитритов до нитратов; биохимическое окисление осуществляется специфическими бактериями-нитрификаторами *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* лишь при наличии кислорода;

— денитрификация, осуществляемая анаэробными бактериями-денитрификаторами при недостатке кислорода, в ходе которой нитраты восстанавливаются через нитриты до молекулярного азота, закиси азота и аммония [378, 438, 468]; денитрификация рассматривается как один из важнейших «стоков» (см. п. 15.1), выводящих азот из биогеохимического круговорота.

14.1.1. Динамика содержания соединений азота в верхнем слое

Доминирующим масштабом изменчивости содержания соединений азота, как и других биогенов, в верхнем слое, простирающемся от поверхности моря до галоклина, является сезонный (внутригодовой).

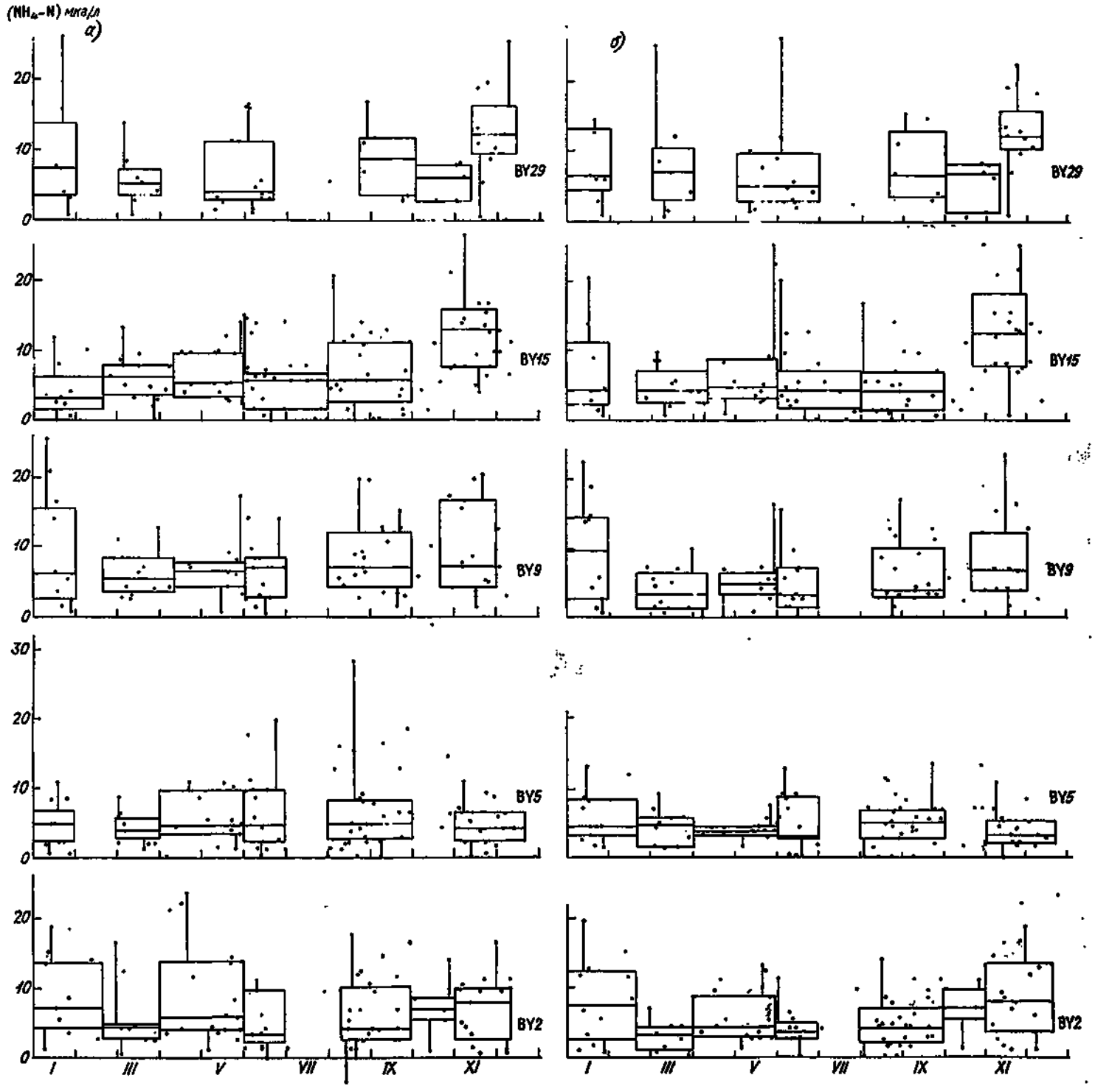


Рис. 14.1. Годовой ход концентраций аммония на поверхности (*а*) и на глубине 10 м (*б*) восточного продольного разреза по данным квартильного анализа для базовых станций.

Аммоний

Годовой ход содержания аммония на поверхности (рис. 14.1 *а*) и в пределах фотического слоя (рис. 14.1 *б*) выражен слабо и в большей степени проявляется лишь в значениях верхних и нижних квартилей. При этом в северном и центральном районах моря (станции BY 29, BY 15 и BY 9) сезонные изменения выражены в большей степени, чем в южных и юго-западных (станции BY 5 и BY 2), и зачастую более четко — в подповерхностном слое.

Максимальные концентрации аммония, обусловленные минерализацией органического вещества в условиях затухания процессов фотосинтетической утилизации биогенов, отмечаются во всех районах, кроме Борнхольмской впадины, поздней осенью (в ноябре—декабре). Интерквартильные расстояния ($x_{0,25}$—$x_{0,75}$) на поверхности моря уменьшаются с севера (8—16 мкг/л, ст. BY 29) до Борнхольмской впадины (2—7 мкг/л, ст. BY 5) и снова возрастают в Арконской впадине, в особенности в подповерхностном слое (4—15 мкг/л, ст. BY 2). По мере исчерпания запасов лабильного органического веще-

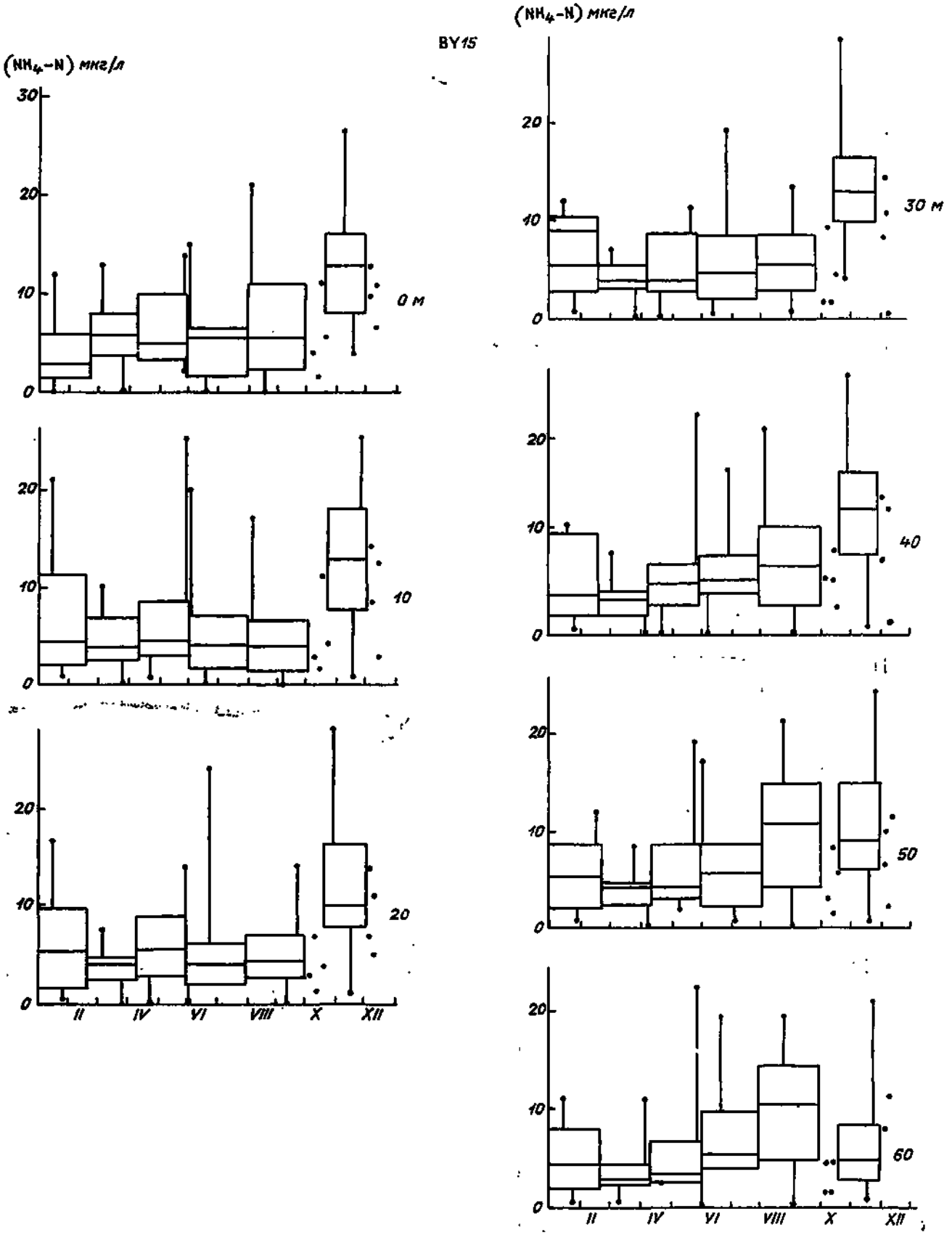


Рис. 14.2. Годовой ход концентраций аммония на стандартных горизонтах верхнего слоя Готландской впадины (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29) по данным квартильного анализа.

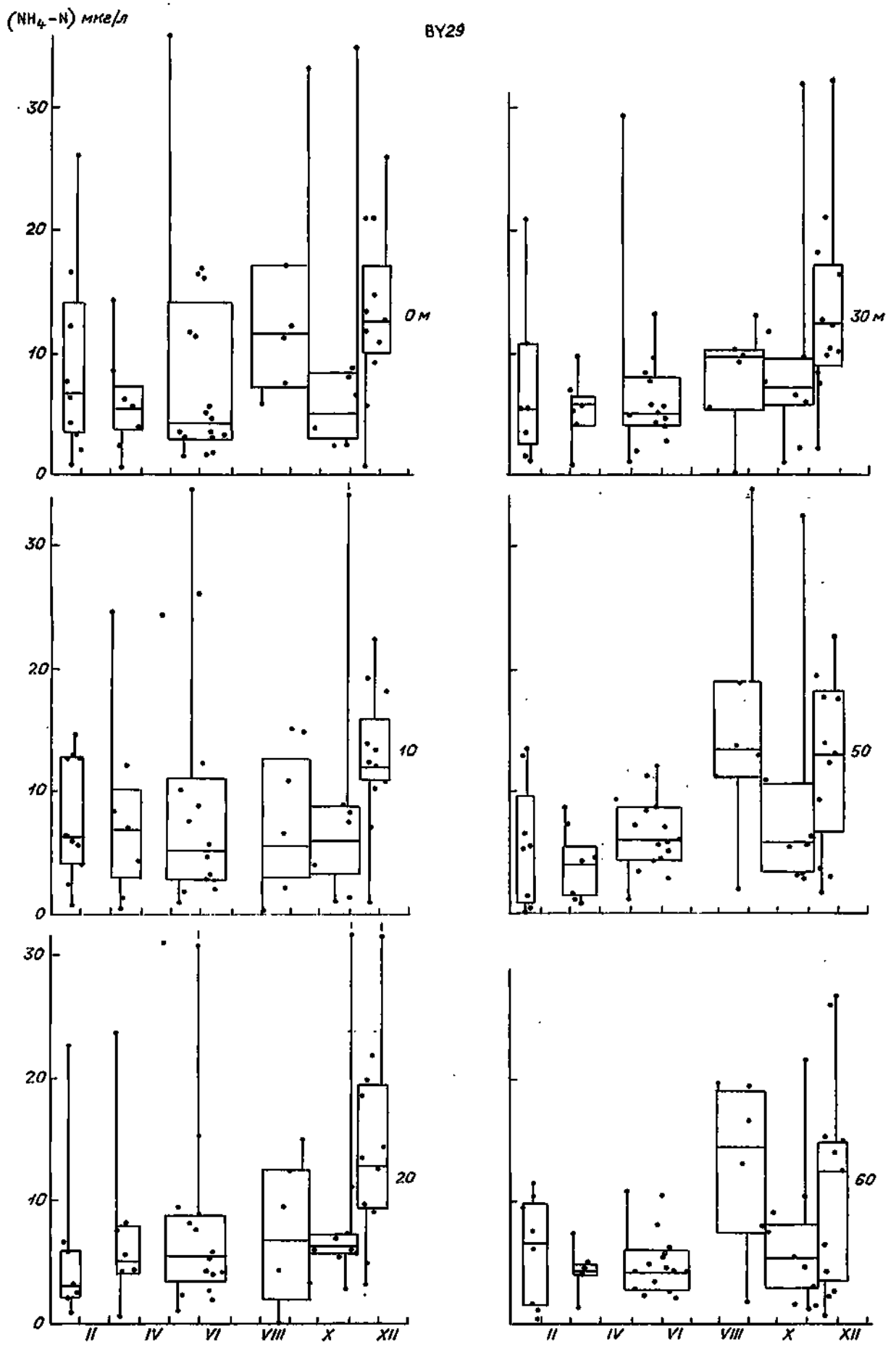


Рис. 14.2.

ства скорость аммонификации снижается, что приводит к формированию в феврале—марте зимнего минимума, более выраженного в подповерхностном слое (1,5—7,0 мкг/л). В апреле—мае, во время весеннего цветения фитопланктона и весенних речных паводков, содержание аммония, как показывают значения медианы и/или верхней квартили, вновь повышается до 4—7 мкг/л (медиана) и 9—11 мкг/л ($x_{0,75}$), что может быть связано как с аммонификацией органического вещества, созданного фитопланктоном в процессе фотосинтеза, так и с поступлением аммония с речным стоком. В целом же в вегетационный период (апрель—октябрь) динамика содержания аммония, являющегося первым продуктом прямой (экскреция зоопланктоном) и непрямой (аммонификация) регенерации, определяется множеством разнонаправленных и, по-видимому, сбалансированных между собой процессов, что и отражается в незначительных изменениях его концентраций. Эта сбалансированность несколько нарушается в северной и центральной частях моря в августе—сентябре, в период обогащения воды как продуктами метаболизма зоопланктона, достигающего в августе своего максимального развития, так и минерализующимися останками цветения сине-зеленых водорослей, что выражается возрастанием значений верхней квартили до 8—12 мкг/л.

Общий характер рассмотренных сезонных изменений сохраняется до глубины 20—30 м (рис. 14.2—14.4), но меняется в холодном промежуточном слое, образующемся летом между термоклином и галоклином, в котором годовой максимум наблюдается не поздней осенью, а в августе—сентябре и в глубоководных районах (станции BY 9, BY 15 и BY 29) достигает значений 13—15 мкг/л (медиана) и 16—18 мкг/л ($x_{0,75}$). Формирование этого максимума в условиях ограниченного развитым термоклином обмена с поверхностным слоем может быть вызвано замедлением оседания останков сине-зеленых водорослей в холодном слое и в верхней части галоклина и соответствующим усилением аммонификации [269]. В Борнхольмской впадине в соответствии с глубиной залегания галоклина этот максимум наблюдается на 50 м, а в Арконской впади-

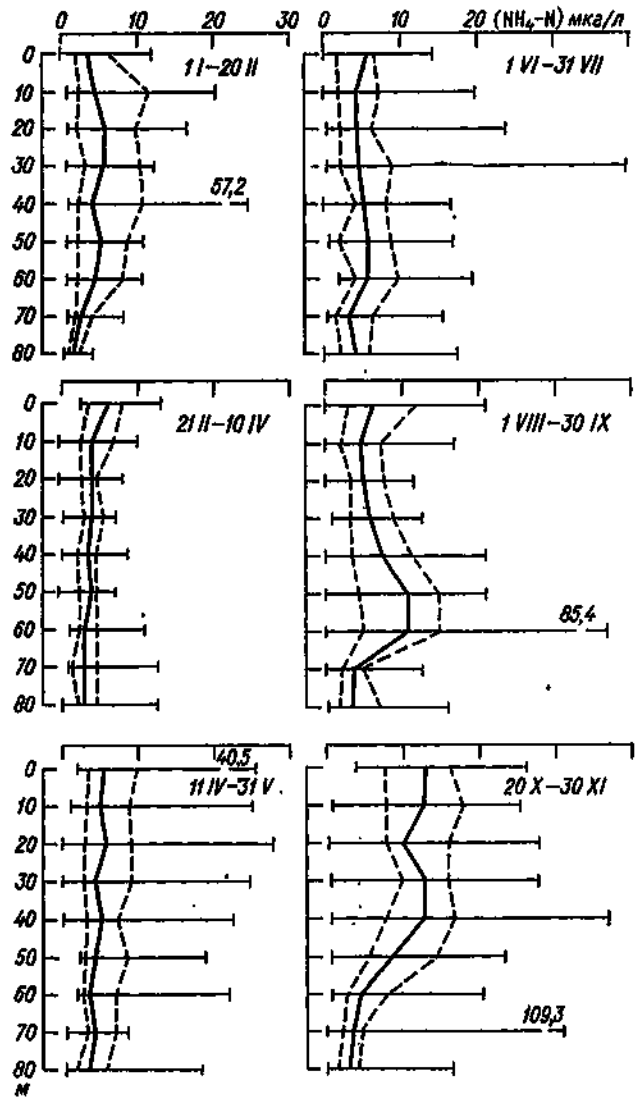


Рис. 14.3. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций аммония в слое 0—80 м Готландской впадины (ст. BY 15).

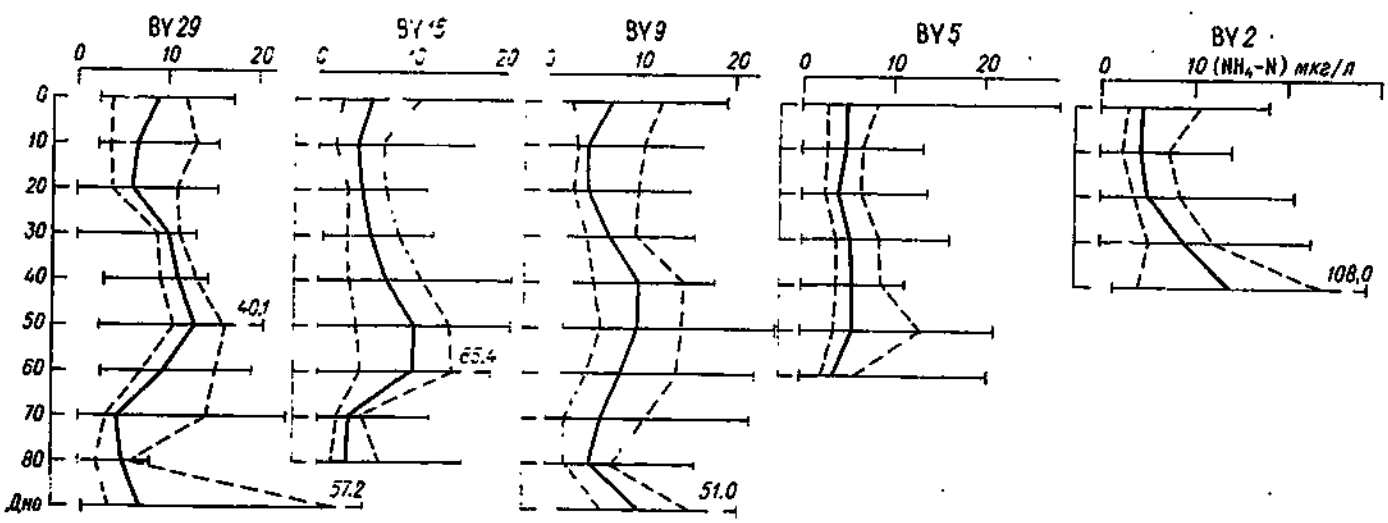


Рис. 14.4. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций аммония в верхнем слое и галоклине для базовых станций во второй половине лета (август—сентябрь).

Таблица 14.1

Статистические характеристики концентраций аммонийного азота (мкг/л) за период 1965—1984 гг.

Горизонт, м	$\bar{x}$	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
			Ст. BY 2				
0	5,7	0,0	2,8	5,0	10,0	24	96
10	5,0	0,0	2,8	4,4	8,5	43	98
20	5,5	0,0	2,8	5,1	8,8	41	98
30	6,7	0,0	3,9	6,1	11,0	35	98
40	12,0	0,7	4,2	12,0	21,0	108	98
Дно	19,0	0,0	8,8	19,0	28,0	210	80
			Ст. BY 5				
0	5,1	0,0	2,8	4,7	8,5	36	96
10	4,5	0,0	2,7	4,2	7,0	14	99
20	4,0	0,0	2,5	3,8	5,9	24	98
30	4,6	0,0	2,8	4,2	7,0	39	97
40	4,9	0,0	2,5	4,3	8,4	32	98
50	5,4	0,0	2,8	4,5	9,6	29	95
60	4,0	0,0	2,2	3,4	6,9	33	97
70	3,7	0,0	2,1	3,5	5,6	51	96
80	4,3	0,0	1,4	3,7	8,4	181	97
Дно	6,0	0,0	2,8	5,0	11,0	154	81
			Ст. BY 9				
0	7,1	0,3	3,8	6,7	11,1	26	86
10	4,9	0,0	2,8	4,2	8,4	23	85
20	5,2	0,0	2,8	4,8	8,5	22	85
30	5,9	0,0	2,9	5,6	9,4	24	85
40	6,2	0,0	2,8	5,1	12,0	24	86
50	6,2	0,0	3,2	5,6	10,0	25	85
60	4,7	0,0	2,4	4,2	8,1	23	86
70	4,1	0,0	1,8	3,8	6,8	22	83
80	3,4	0,0	2,1	3,6	6,7	28	82
90	4,1	0,0	2,4	3,9	6,2	38	82
100	4,4	0,0	2,2	4,2	7,0	49	79
Дно	7,5	0,0	4,1	6,7	13,0	57	57
			Ст. BY 15				
0	6,7	0,0	3,2	6,2	11,2	27	93
10	5,8	0,0	2,8	5,2	9,8	25	96
20	5,3	0,0	2,8	5	8,5	28,0	94
30	6,0	0,0	2,8	5,6	9,9	28	95
40	6,4	0,0	3,5	5,6	11,0	28	96
50	6,0	0,0	3,1	5,6	9,8	24	89
60	5,6	0,0	2,9	4,9	9,8	24	89
70	3,7	0,0	2,0	3,6	5,5	15	85
80	3,1	0,0	1,4	2,8	5,3	18	97
90	2,8	0,0	1,3	2,8	4,2	19	94
100	2,8	0,0	1,4	2,8	4,2	28	94
125	3,2	0,0	1,7	2,8	5,6	52	90
150	7,6	0,0	2,8	5,4	16,8	99	94
175	24,0	0,0	3,2	18	58,0	127	89
200	32,0	0,0	4,2	23	78	137	96
220—225	41,0	0,0	4,2	36	87	174	87
Дно	63,0	0,0	8,4	63	117	179	76
			Ст. BY 29				
0	7,3	0,7	3,2	6,9	12,0	26	53
10	7,7	0,0	3,1	7,7	12,0	31	57
20	6,6	0,0	3,5	5,85	11,0	26	54
30	6,5	0,0	4,2	6,0	9,9	22	54
40	7,0	0,7	3,8	6,6	11,0	22	54
50	6,6	0,7	3,3	5,8	12,0	40	56
60	5,8	0,7	2,8	5,0	10,0	27	55
70	4,2	0,0	1,9	4,2	6,3	23	56
80	4,1	0,0	2,3	4,2	5,6	28	57
90	3,3	0,0	1,8	3,1	5,4	26	47
100	4,4	0,3	2,4	4,1	7,0	49	57
125	6,5	0,7	2,4	4,2	15,4	51	56
150	9,5	0,0	2,2	7,0	22,0	51	57
Дно	12,0	0,0	3,4	7,8	29,0	57	54

не — у дна. В дальнейшем по мере разрушения термоклина, снижения утилизации биогенов фитопланктоном и развития осенне-зимней конвекции происходит выравнивание концентраций по всему верхнему слою и их уменьшение в верхней части галоклина в результате нитрификации аммония.

Общее представление о диапазоне изменений концентраций аммония по глубине в различных районах моря дает табл. 14.1.

Нитриты

В отличие от аммония, сезонная динамика содержания нитритов в поверхностном слое моря выражена значительно ярче и в целом определяется весенне-летней утилизацией и осенне-зимней регенерацией (рис. 14.5).

Годовой максимум содержания нитритов в фотическом слое (рис. 14.6) приходится на ноябрь—декабрь и совпадает с годовым максимумом аммония, что указывает на высокую скорость протекания первой стадии нитрификации. В этот период значения интерквартильного расстояния на поверхности северной и центральной частей моря составляют 2—4 мкг/л и заметно повышаются к юго-западу: 3—5 мкг/л (на ст. BY 5) и 5—7 мкг/л (на ст. BY 2). Несмотря на низкие зимние температуры не менее активна, по-видимому, и вторая стадия нитрификации, которая в течение зимы в условиях уменьшающейся по мере исчерпания запасов аммония скорости первой стадии приводит к снижению концентраций нитритов вплоть до достижения минимальных значений 1,0—1,5 мкг/л (медиана). Время наступления зимнего минимума, наиболее раннее в западной части моря (февраль, Арконский бассейн), в центральной и северной частях сдвигается к марту. Рассчитанные статистические характеристики позволили выявить значительное возрастание концентраций нитритов — до 2—3 мкг/л (медиана) в стадии ранней весны (см. п. 10.2.4), которая начинается на юго-западе (станции BY 2 и BY 5) в марте, а в центральном районе (станции BY 9 и BY 15) — в апреле. Это явление можно попытаться объяснить не только отмеченным выше возрастанием концентраций аммония как источника нитритов, но и предположением о выделении водорослями нитритов — промежуточной стадии фотосинтетического восстановления нитратов, запасы которых в воде в этот период все еще велики [264]. Последующее снижение концентраций, начинающееся в апреле в южных и в мае в центральных районах, приводит к летнему минимуму концентраций, близкому к нулю. Лишь в августе на поверхности нередко наблюдается повышение значений верхней квартили до 1—3 мкг/л, связанное, по-видимому, также с отмеченным выше возрастанием концентраций аммония. В октябре повсеместно начинается осеннее возрастание концентраций нитритов.

Рассмотренные сезонные изменения охватывают весь верхний слой с января по июль и прослеживаются на протяжении всего года до 30 м в юго-западной части моря и до 40 м в центральной (рис. 14.6 и 14.7). Однако в нижней части холодного промежуточного слоя на границе с галоклином с июля—августа начинается быстрое увеличение концентраций, обусловленное нитрификацией возросших фондов аммония, которое приводит к формированию максимума в вертикальном распределе-

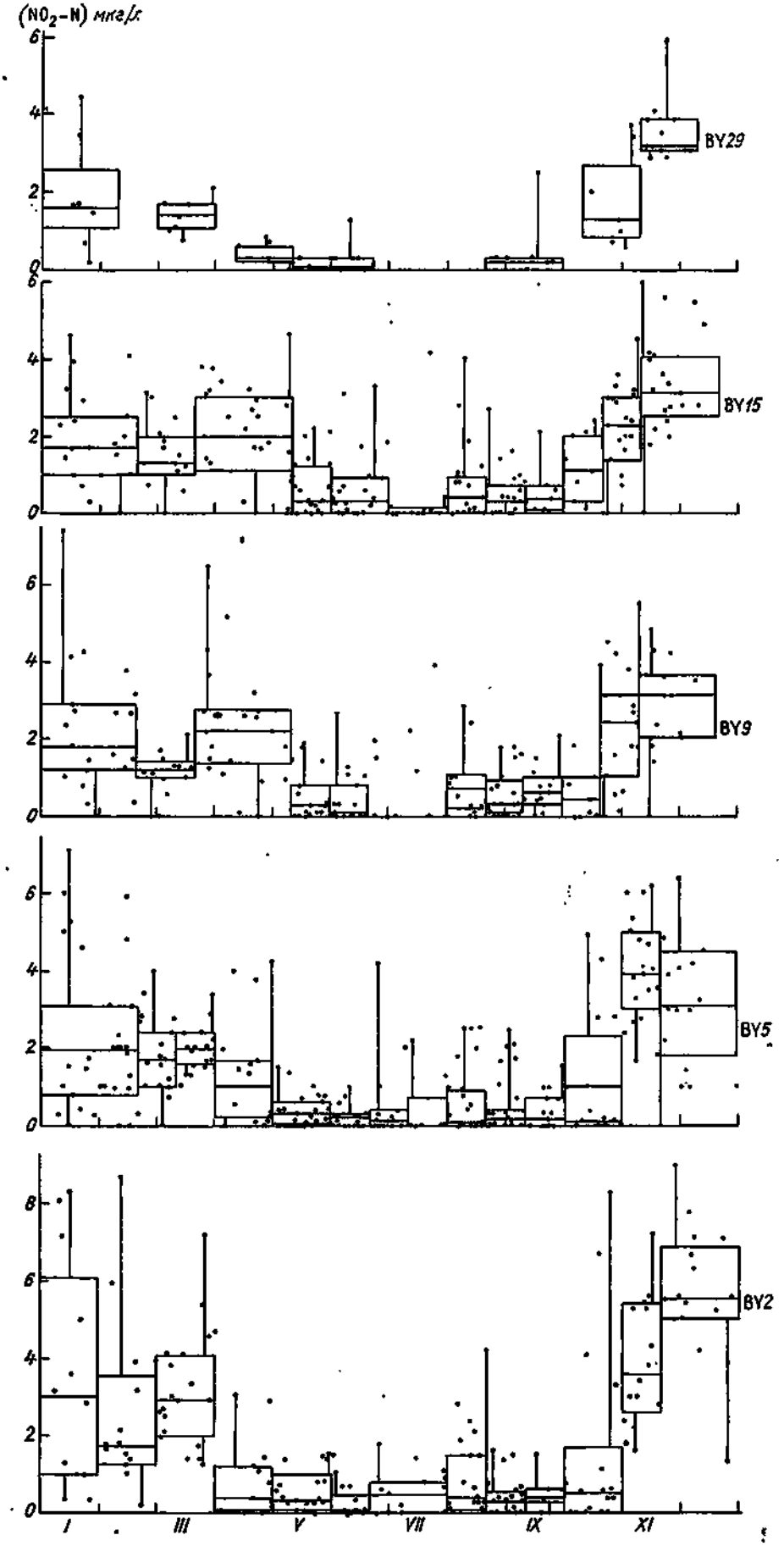


Рис. 14.5. Годовой ход концентраций нитритов на поверхности восточного продольного разреза по данным квартильного анализа для базовых станций.

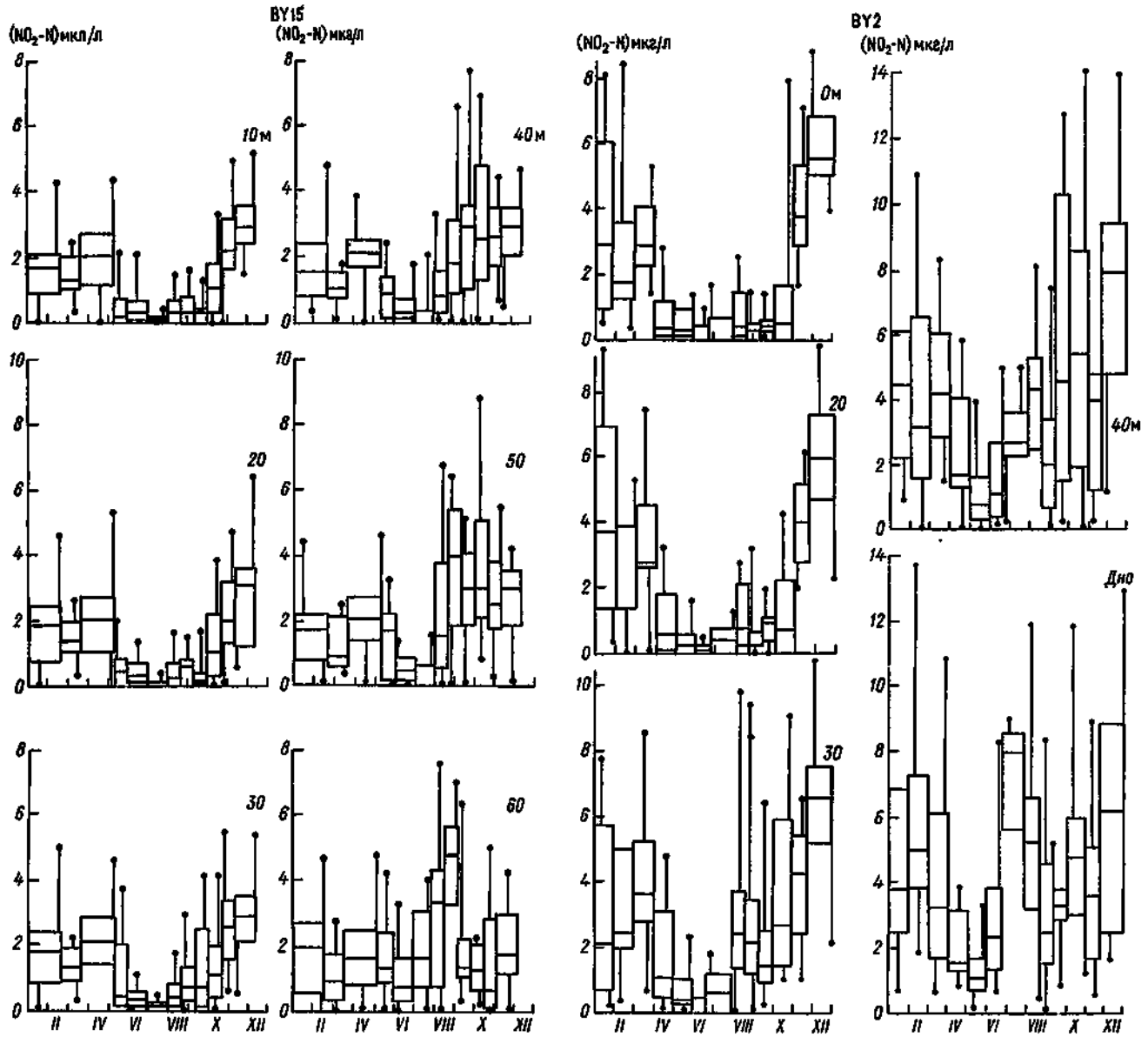


Рис. 14.6. Годовой ход концентраций нитритов на различных глубинах верхнего слоя Готландской (ст. BY 15) и Арконской (ст. BY 2) впадин по данным квартильного анализа.

нии нитритов, с течением времени смещающегося вверх по мере разрушения термоклина, исчерпания запасов аммония и окисления нитритов до нитратов в нижних слоях (рис. 14.8). Осенне-зимняя конвекция приводит к выравниванию концентраций во всем верхнем слое (рис. 14.6 и 14.9). В мелководной и достаточно хорошо аэрируемой Арконской впадине процессы аммонификации и нитрификации протекают, по-видимому, в основном на поверхности донных отложений и в придонных слоях (рис. 14.10).

Нитраты

Сезонная динамика содержания нитратов, которая в поверхностном слое определяется, наряду с поступлением их извне и из глубинных слоев, лишь двумя разнонаправленными процессами — второй стадией нитрификации и потреблением водорослями, — выражена еще отчетливее, чем сезонная динамика нитритов (рис. 14.11, табл. 14.2).

Годовой максимум содержания нитратов, формирующийся как результат динамического баланса процессов зимней аккумуляции и весенней утилизации, приходится на конец биологической зимы. Отчетливо выражена фаза ранней весны, временные рамки которой определяются межгодовой изменчивостью сроков наступления весеннего цветения фитопланктона. Летне-осенний минимум содержания нитратов, концентрации которых в этот период нередко падают до нуля, длится значительно дольше, чем в случае нитритов и аммония. Это указывает на то, что скорость утилизации нитритов и нитратов фитопланктоном значительно превышает скорость нитрификации. Длительность летнего периода минимальных концетраций нитратов увеличивается с севера на юг — осеннее повышение концентраций нитратов на поверхности моря в северных районах начинается уже в сентябре, тогда как в Арконской впадине — только в ноябре.

Рассмотренные сезонные изменения не только охватывают всю толщу верхнего слоя, но и проникают глубоко в галоклин, а иногда затрагивают даже верхнюю часть глубинного слоя (рис. 14.12 и 14.13; табл. 14.2). При этом в зимнем повышении

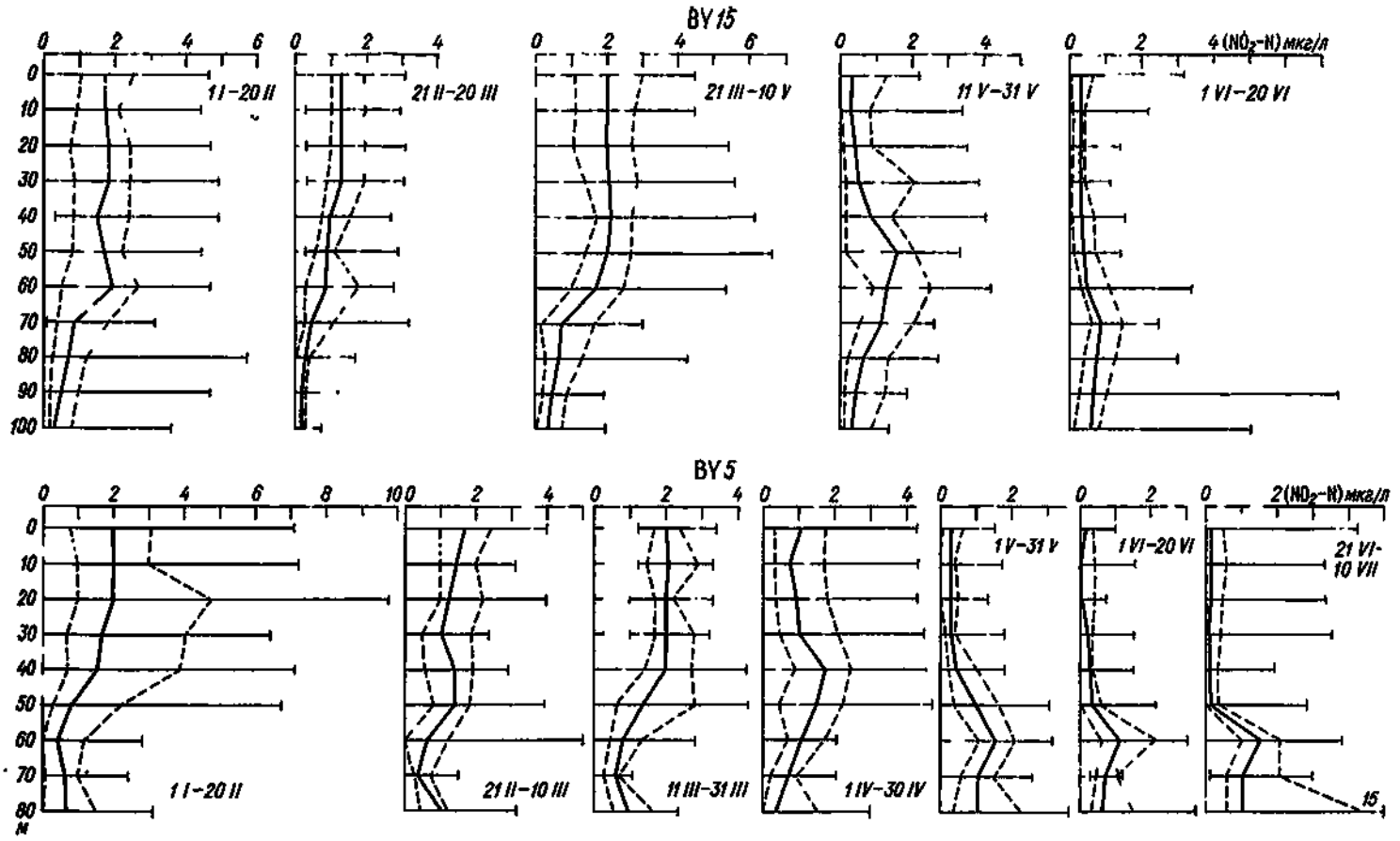


Рис. 14.7. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций нитритов в течение периода зима — первая половина лета в толще вод Готландской (ст. BY 15) и Борнхольмской (ст. BY 5) впадин.

запасов нитратов заметную роль, наряду с нитрификацией, должен играть вертикальный перенос из глубинного слоя и галоклина, где концентрации нитратов, в отличие от аммония и нитритов, выше, чем в нижней части верхнего слоя (ср. рис. 14.3, 14.7, 14.12 и 14.13). Соответственно и весенне-летнее истощение запасов нитратов сказывается до глубины 60—80 и даже 100 м, а в мелководной юго-западной части — практически до дна. Благодаря летнему усилению нитрификации накопление нитратов начинается с августа в нижней части холодного промежуточного слоя и в верхней части галоклина, а затем по мере затухания фотосинтеза и развития осенне-зимней конвекции охватывает и верхние слои.

Наряду с сезонной динамикой, содержание нитратов подвержено существенным межгодовым и многолетним изменениям, для иллюстрации которых обратимся к результатам измерений, выполненных на поверхности моря зимой, во время максимального ослабления утилизации биогенов водорослями (рис. 14.14). Как показывает элементарное обобщение данных этих наблюдений (рис. 14.15), на рубеже 60-х — 70-х годов содержание нитратов на западном разрезе и в центре восточного разреза было несколько ниже, чем на севере и на юго-западе моря. Однако с течением времени по мере общего более чем двукратного увеличения концентраций (см. также п. 15.2) пространственные различия на восточном разрезе практически исчезли, тогда как различия между восточной и западной частью моря стали еще заметнее.

Общий и органический азот

На протяжении года содержание общего азота, представляющего сумму его минеральных и органических форм, меняется в целом незначительно (рис. 14.16 и 14.17). При этом понижение концентраций в течение вегетационного сезона может быть связано с седиментацией органического вещества, т. е. с выводом части азота из толщи воды на дно в составе останков организмов. Изменения содержания минерального (сумма аммония, нитритов и нитратов) и органического азота определяются балансом продукционно-деструкционных процессов и находятся в противофазе. Пределы сезонных изменений процентного содержания органического азота позволяют также оценить долю лабильной, легкоокисляемой фракции. Она не превышает 15—20 % общего содержания азота. Это означает, что 80—85 % азота находится в составе трудноокисляемых соединений и принимает незначительное участие в современном биогеохимическом круговороте азота.

Диапазон изменений содержания общего азота по глубине в различных районах моря представлен в табл. 14.3.

14.1.2. Динамика содержания соединений азота в глубинном слое

Гидрохимический режим соединений азота в глубинном слое Балтийского моря в значительной степени формируется спорадическими затоками североморских вод, различающихся по своей мощности

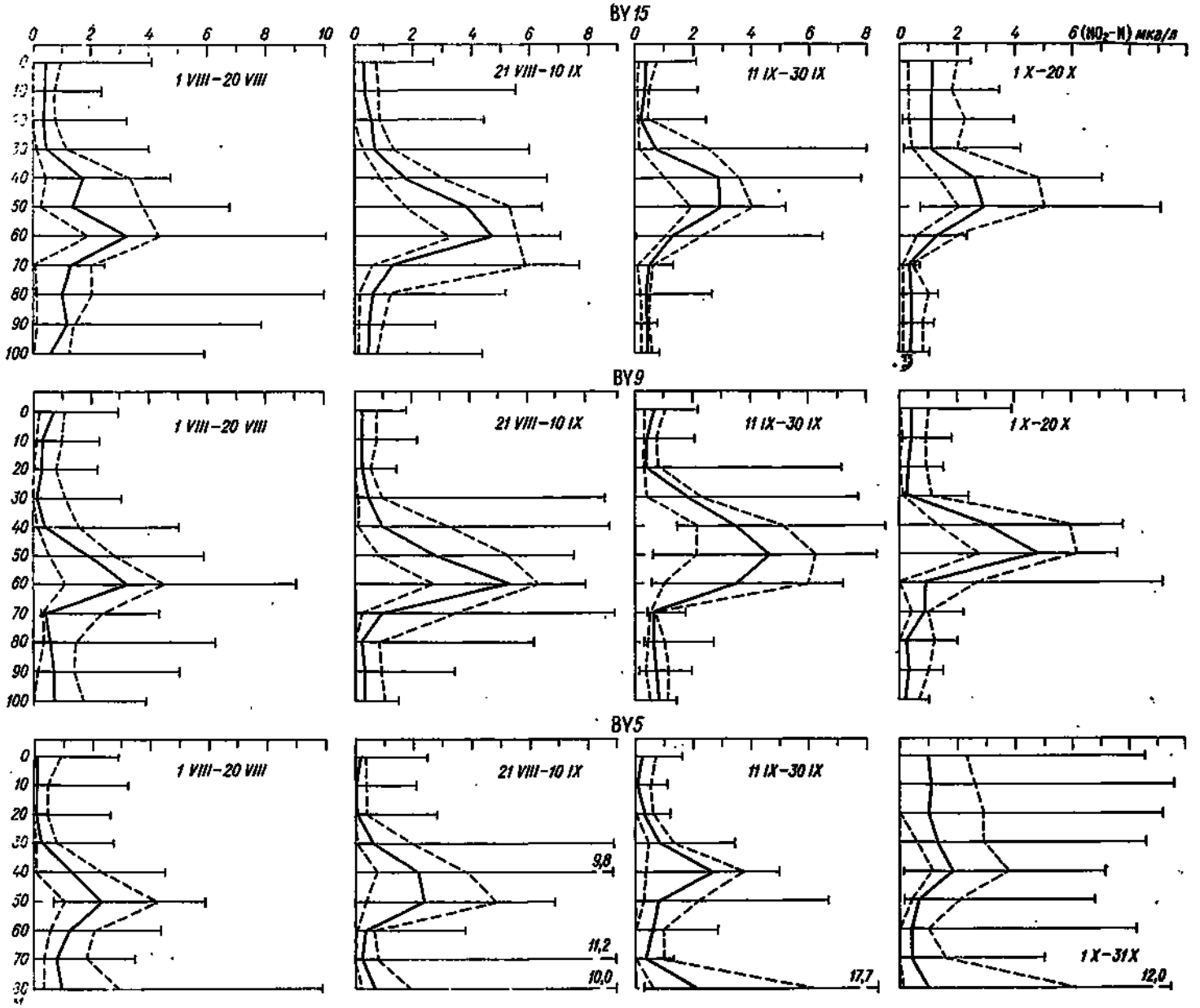


Рис. 14.8. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций нитритов в августе—октябре в Борнхольмской впадине (ст. BY 5), юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и в Готландской впадине (ст. BY 15).

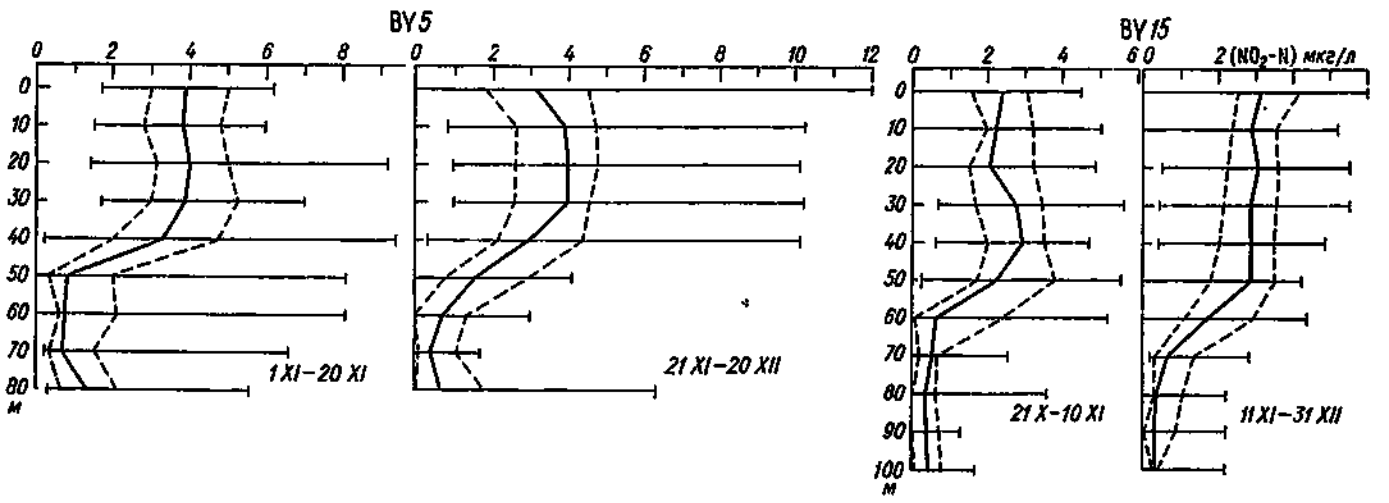


Рис. 14.9. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций нитритов в осенний период в Борнхольмской (ст. BY 5) и Готландской (ст. BY 15) впадинах.

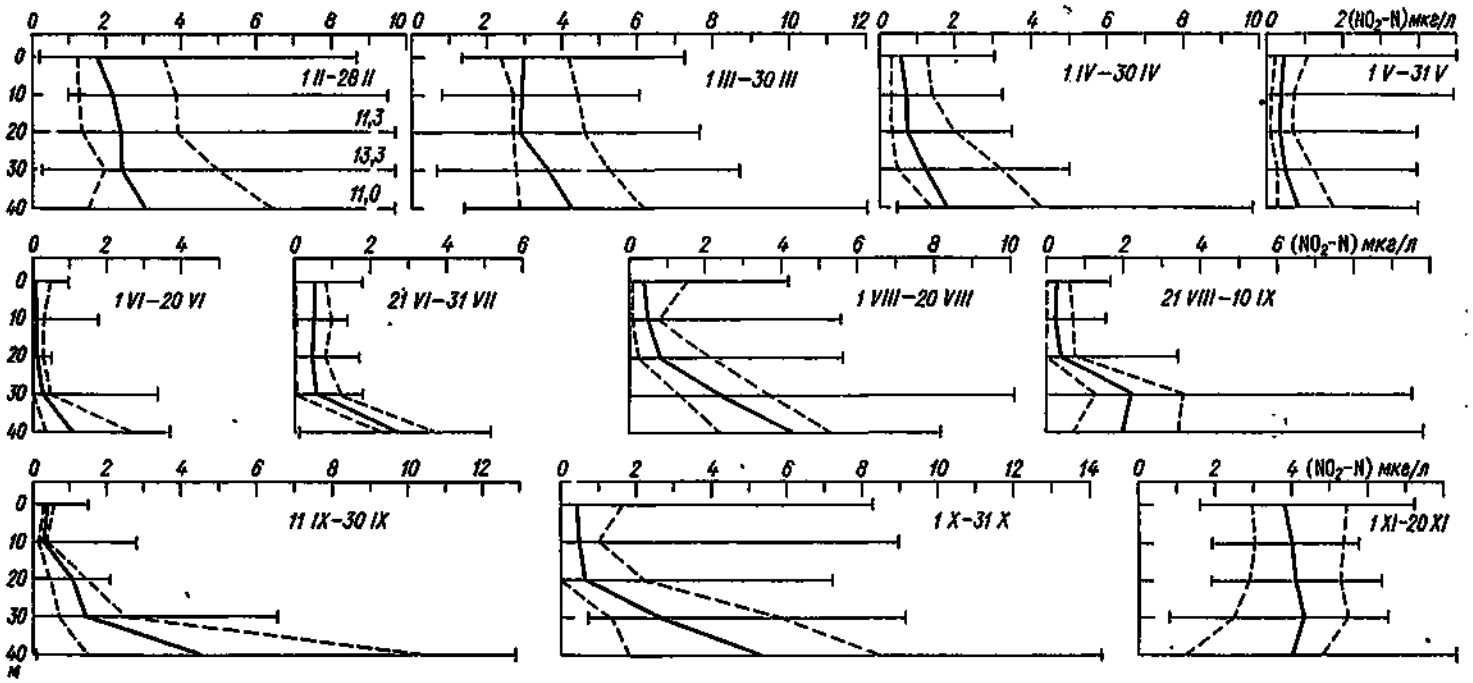


Рис. 14.10. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций нитритов в Арконской впадине (ст. BY 2).

(общему объему и солености), определяющей дальнейшее распространение этих вод в пределах моря (см. п. 10.3). Смена окислительно-восстановительных условий, связанная с проникновением наиболее мощных затоков в придонные слои глубоководных впадин, приводит к формированию двух стадий режима глубинного слоя — аэробной и анаэробной, имеющих межгодовой диапазон изменчивости (см. табл. 10.1).

Активный глубинный слой. Динамика соединений азота в верхней части этого слоя, преимущественно в галоклине, в основном определяется сезонной ритмикой процессов, протекающих в верхнем слое моря. В зависимости от района моря, сезона и глубины эта взаимосвязь может проявляться как в сходстве изменений, что особенно хорошо выражено в мелководной юго-западной части моря (см. рис. 14.12), так и в закономерных отличиях. Так, например, повышенная седиментация новообразованного органического вещества в течение вегетационного сезона и его аммонификация (с последующей нитрификацией) в галоклине приводят к «противофазности» сезонного хода, наиболее отчетливо обнаруживаемой в динамике нитритов, летние концентрации которых заметно превышают зимние (рис. 14.18).

Режим нижней части активного слоя формируется как в зависимости от того, в какой стадии (аэробной или анаэробной) находится придонный слой, так и под влиянием многолетних тенденций, свойственных всему морю (с увеличением глубины все более ярко выраженным становится многолетнее возрастание концентрации нитратов, начавшееся в начале 70-х годов) (рис. 14.19).

Придонный слой. В этом слое все основные характеристики режима азота — уровни и соотношение концентраций различных соединений (аммоний/нитраты) и форм (минеральная/органическая) азота, закономерности их вертикального распределения, — в значительной степени определяются условиями, складывающимися в самых нижних, придонных слоях воды. При аэробных условиях, подобных тем, которые обычно существуют в океанах и морях, минеральный азот практически весь сосредоточен в нитратах, концентрации которых лишь незначительно увеличиваются с глубиной вследствие продолжающегося разложения (аммонификации с последующей нитрификацией) органического вещества, оседающего из верхнего слоя и главным образом находящегося на дне. В анаэробных условиях, при переходе к которым как во времени, так и по вертикали нитраты восстанавливаются до газообразного азота (N_2 и N_2O), разложение органического вещества осуществляется анаэробными бактериями лишь до аммония.

На рис. 14.20 и 14.21 показана последовательность гидрохимических съемок 1969—1970 гг., позволившая достаточно детально выявить смену анаэробных условий аэробными по мере распространения североморских вод и вызванную этим явлением существенную пространственно-временную неоднородность распределения концентраций. Различия между статистическими характеристиками режима азота в этих условиях представлены на рис. 14.22—14.24 и в табл. 14.4—14.9, которые построены с учетом временных границ циклов межгодовой изменчивости, введенных в п. 10.3.3 (табл. 10.1), и позволяют продемонстрировать следующие особенности режима.

Современная многолетняя тенденция возрастания содержания азота, отчетливо прослеживаемая в верхнем и активном глубинном слоях (см. рис. 14.15, 14.19 и 15.2), в придонном слое должна рассматриваться с учетом двух стадий: стадии частого чередования аэробных и анаэробных условий у дна и стадии перманентного существования анаэробных условий, начавшейся в 1978 г. и длящейся по настоящее время (1992 г.). В стадии чередования сравнительно кратковременные периоды с анаэробными условиями оказались недостаточными, чтобы изменить эту тенденцию даже в нижней части придонного слоя (горизонт 200 м) и тем более в выше-

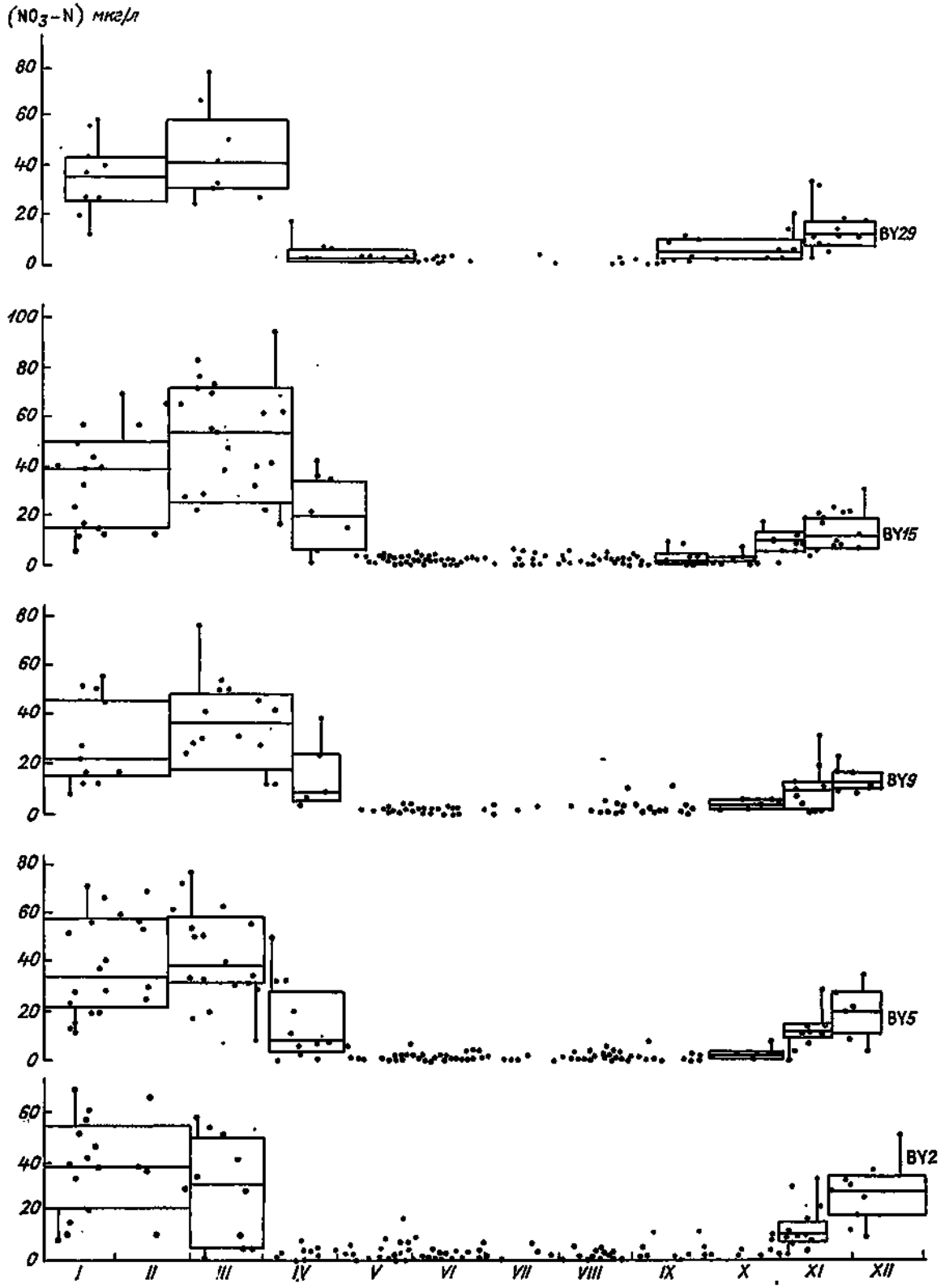


Рис. 14.11. Годовой ход концентраций нитратов на поверхности моря по данным квартильного анализа для базовых станций.

Таблица 14.2

Статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — $(x_{0.25}—x_{0.75})$] внутригодовой изменчивости концентраций нитратного азота (мкг/л) в верхнем слое и галоклине на станциях BY 2, BY 5, BY 9, BY 15 и BY 29

Горизонт, м	BY 29	BY 15	BY 9	BY 5	BY 2	BY 29	BY 15	BY 9	BY 5	BY 2
	Зима									
	1 I—20 II	1 I—20 II	1 I—20 II	1 I—20 II	1 I—28 II	21 II—10 IV	21 II—10 IV	2 III—10 IV	21 II—31 III	21 II—31 III
	$n=9$	$n=12$	$n=11$	$n=20$	$n=17$	$n=7$	$n=14$	$n=14$	$n=18$	$n=11$
0	34 / 26—43	36 / 15—50	26 / 15—47	38 / 22—58	38 / 21—55	43 / 31—59	52 / 30—71	37 / 27—49	42 / 32—58	26 / 8—46
10	33 / 24—42	35 / 20—49	25 / 15—40	40 / 22—58	41 / 30—59	45 / 33—63	50 / 32—67	36 / 27—49	41 / 29—54	35 / 16—51
20	35 / 20—45	25 / 16—44	26 / 15—41	40 / 21—61	42 / 25—60	48 / 31—63	36 / 28—49	37 / 24—49	43 / 32—54	39 / 18—52
30	33 / 21—41	23 / 15—41	25 / 14—42	39 / 18—60	46 / 29—63	46 / 35—62	37 / 29—48	38 / 29—50	44 / 32—60	39 / 23—52
40	33 / 20—44	25 / 16—43	29 / 16—46	43 / 22—58	66 / 39—84	50 / 35—64	39 / 29—52	38 / 28—50	50 / 32—65	54 / 47—61
50	33 / 21—41	25 / 16—45	26 / 15—41	45 / 19—63	71 / 65—83	48 / 35—60	39 / 29—50	40 / 29—48	61 / 36—88	70 / 49—113
60	35 / 27—40	34 / 18—48	35 / 13—47	80 / 55—109	—	53 / 40—62	57 / 37—69	51 / 39—64	97 / 81—116	—
70	40 / 36—47	35 / 19—62	46 / 38—57	77 / 64—91	—	56 / 46—65	51 / 32—72	61* / 49—74	89 / 79—99	—
80	50 / 37—66	68 / 34—102	60 / 38—94	—	—	62 / 50—83	76 / 60—97	72* / 55—83	—	—
	Весна									
	11 IV—31 V	11 IV—10 V	11—30 IV	1—30 IV	1—30 IV	—	11—31 V	1—31 V	1—31 V	1—31 V
	$n=10$	$n=5$	$n=4$	$n=10$	$n=10$	—	$n=12$	$n=13$	$n=14$	$n=18$
0	2 / 1—6	19 / 5—34	12 / 5—24	12 / 5—28	3 / 1—5	—	2 / 1—3	1 / 1—2	2 / 1—2	2 / 1—4
10	1 / 1—1	21 / 5—36	13 / 5—28	11 / 4—27	2 / 1—4	—	2 / 1—3	1 / 1—2	1 / 1—1	2 / 1—3
20	1 / 1—1	15 / 4—27	14 / 5—25	15 / 1—36	1 / 1—2	—	1 / 1—2	2 / 1—5	1 / 1—1	2 / 1—4
30	6 / 1—18	—	—	19 / 3—34	4 / 2—6	—	2 / 1—3	4 / 1—14	1 / 1—2	2 / 1—3
40	7 / 1—19	30 / 11—36	15 / 5—29	32 / 16—47	19 / 3—36	—	3 / 1—7	5 / 1—15	2 / 1—3	5 / 1—13
50	20 / 2—31	28 / 18—33	20 / 5—47	69 / 36—93	44 / 20—90	—	14 / 4—24	6 / 2—17	9 / 1—29	14 / 4—28
60	32 / 25—43	43 / 39—46	35 / 20—41	101 / 89—114	—	—	44 / 22—66	22 / 3—40	42 / 12—68	—
70	44 / 28—59	55** / 40—76	61* / 49—74	86 / 72—112	—	—	55** / 40—76	45 / 24—71	—	—
80	46 / 39—64	82** / 57—97	72* / 55—83	—	—	—	82** / 57—97	90 / 57—116	—	—

Продолжение табл. 14.2

Горизонт, м	BY 29	BY 15	BY 9	BY 5	BY 2	BY 29	BY 15	BY 9	BY 5	BY 2
				Лето						
	—	1—20 VI	1 VI—31 VII	1—20 VI	1 VI—31 VII	—	1 VIII—10 IX	1 VIII—10 IX	21 VIII—10 IX	1 VIII—10 IX
	—	$n=17$	$n=22$	$n=21$	$n=25$	—	$n=23$	$n=19$	$n=19$	$n=28$
0	—	1/1—2	1/1—1	1/1—1	1/1—2	—	2/1—3	1/1—2	1/1—1	1/1—3
10	—	1/1—2	1/1—1	1/1—1	1/1—1	—	1/1—2	1/1—1	1/1—2	1/1—1
20	—	1/1—1	1/1—1	1/1—1	1/1—1	—	1/1—1	1/1—1	1/1—1	1/1—1
30	—	1/1—1	1/1—1	1/1—1	2/1—3	—	1/1—1	1/1—2	1/1—2	5/2—10
40	—	1/1—2	1/1—1	1/1—1	6/3—11	—	1/1—2	2/1—3	3/1—5	29/14—51
50	—	2/1—3	1/1—1	1/1—3	11/6—18	—	3/1—6	1/1—2	11/7—19	64/33—94
60	—	3/1—6	1/1—3	17/1—59	—	—	10/2—20	7/2—13	44/21—63	—
70	—	19/3—43	7/1—18	—	—	—	20/11—28	31/19—44	—	—
80	—	50/26—70	44/11—78	—	—	—	55/28—82	70/49—90	—	—
				Осень						
	11 IX—10 XI	11—30 IX	11—30 IX	11—30 IX	11—30 IX	—	1—20 X	1—31 X	1—31 X	1—31 X
	$n=13$	$n=6$	$n=8$	$n=7$	$n=8$	—	$n=6$	$n=6$	$n=6$	$n=7$
0	6/2—10	3/1—5	1/1—2	2/1—2	2/1—4	—	2/1—4	4/2—6	3/2—4	4/2—6
10	5/2—11	3/1—6	1/1—2	1/1—1	1/1—3	—	2/1—3	2/1—4	3/2—4	4/3—7
20	4/2—10	3/1—9	2/1—5	1/1—1	5/1—17	—	1/1—3	2/1—3	3/2—3	3/2—6
30	7/4—11	6/4—10	4/1—13	1/1—1	23/2—69	—	1/1—3	3/1—4	3/1—5	6/2—8
40	12/4—19	10/6—12	3/1—9	6/3—10	54/28—92	—	2/1—3	5/4—9	8/5—10	32/20—53
50	20/8—34	13/10—20	10/4—17	30/18—45	59/31—95	—	10/3—16	9/6—14	22/7—48	77/42—125
60	31/16—47	28/23—36	28/7—48	78/53—113	—	—	29/18—48	38/26—53	45/18—83	—
70	42/36—53	53***/33—84	57****/31—91	—	—	—	53***/33—84	57****/31—91	—	—
80	43/34—62	72***/49—109	90****/50—125	—	—	—	72***/49—109	90****/50—125	—	—

Продолжение табл. 14.2

Горизонт, м	BY 29	BY 15	BY 9	BY 5	BY 2	BY 29	BY 15	BY 9	BY 5	BY 2
	Переход от осени к зиме									
	11 XI—10 XII	21 X—10 XI	1—20 XI	1—20 XI	1—20 XI	—	11 XI—10 XII	21 XI—10 XII	21 XI—10 XII	21 XI—31 XII
	$n=12$	$n=9$	$n=10$	$n=12$	$n=13$	—	$n=16$	$n=7$	$n=8$	$n=11$
0	13 / 8—18	10 / 6—14	8 / 2—13	13 / 10—16	10 / 7—15	—	13 / 8—20	14 / 11—17	20 / 12—29	27 / 18—34
10	12 / 7—17	10 / 6—14	10 / 4—13	9 / 8—11	11 / 8—13	—	13 / 9—20	13 / 10—17	20 / 13—29	27 / 16—36
20	13 / 9—17	11 / 7—15	8 / 6—12	10 / 5—14	11 / 6—14	—	14 / 9—20	15 / 12—19	23 / 15—31	27 / 15—38
30	14 / 9—22	10 / 6—14	8 / 7—13	10 / 6—16	17 / 11—23	—	12 / 8—18	13 / 10—19	22 / 16—28	29 / 15—44
40	14 / 9—22	14 / 7—19	10 / 4—18	13 / 7—24	50 / 33—77	—	13 / 9—19	14 / 11—19	22 / 18—29	50 / 33—69
50	17 / 11—30	18 / 10—28	13 / 5—29	38 / 28—57	80 / 47—118	—	15 / 11—25	17 / 13—23	50 / 31—75	70 / 58—88
60	25 / 13—47	36 / 22—53	35 / 20—58	78 / 70—91	—	—	27 / 12—58	40 / 32—55	96 / 71—130	—
70	55 / 35—72	53*** / 33—84	76***** / 55—96	—	—	—	47 / 25—68	76***** / 55—96	—	—
80	73 / 54—91	72*** / 49—109	101***** / 85—118	—	—	—	73 / 55—101	101***** / 85—118	—	—

Примечание. Звездочками отмечены данные, из-за малого n рассчитанные для объединенных интервалов: * 2 III—30 IV; ** 1 IV—31 V; *** 11 IX—20 X; **** 11 IX—31 X; ***** 1 XI—10 XII.

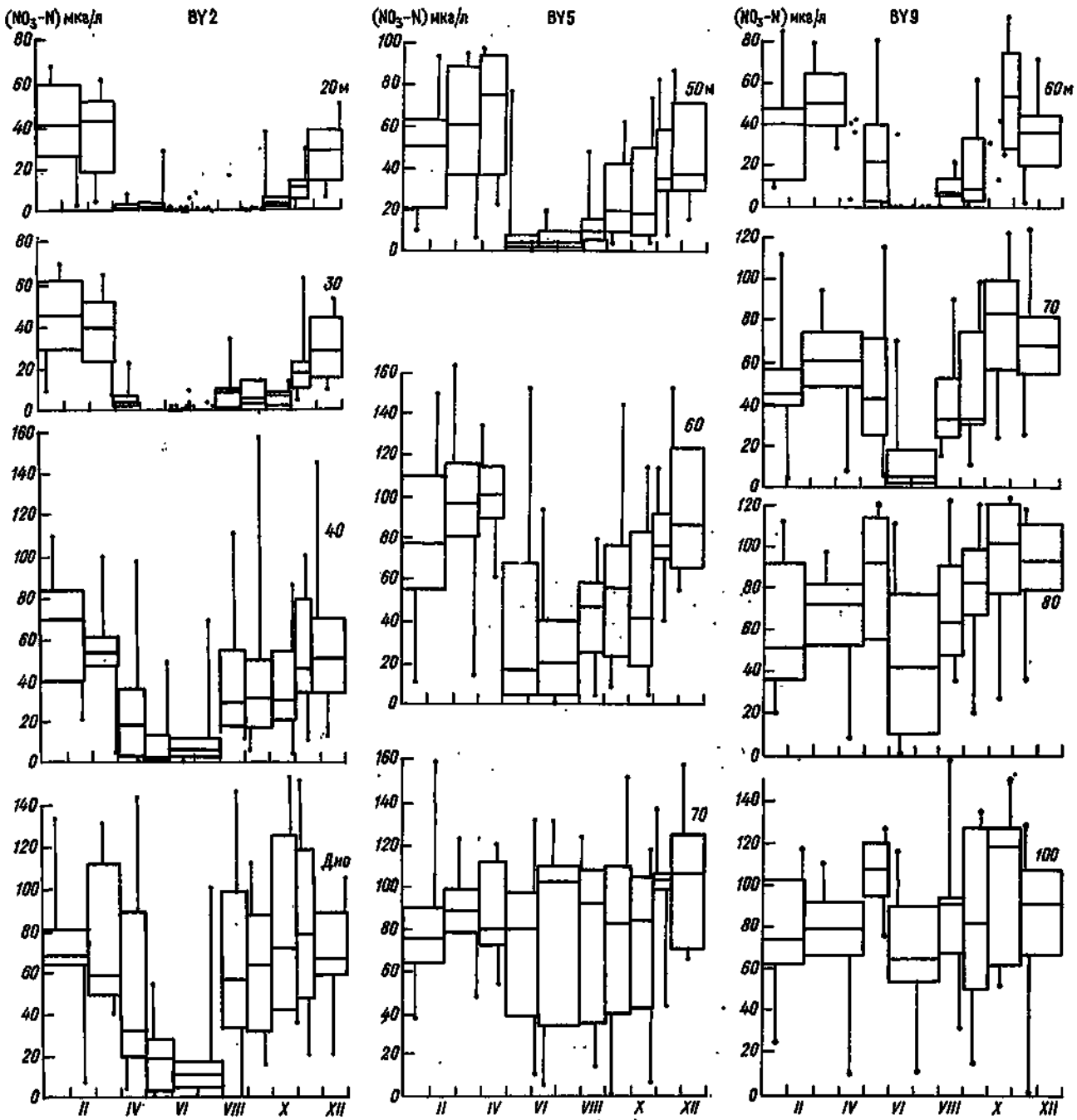


Рис. 14.12. Годовой ход концентраций нитратов на различных глубинах в районах базовых станций по данным квартильного анализа.

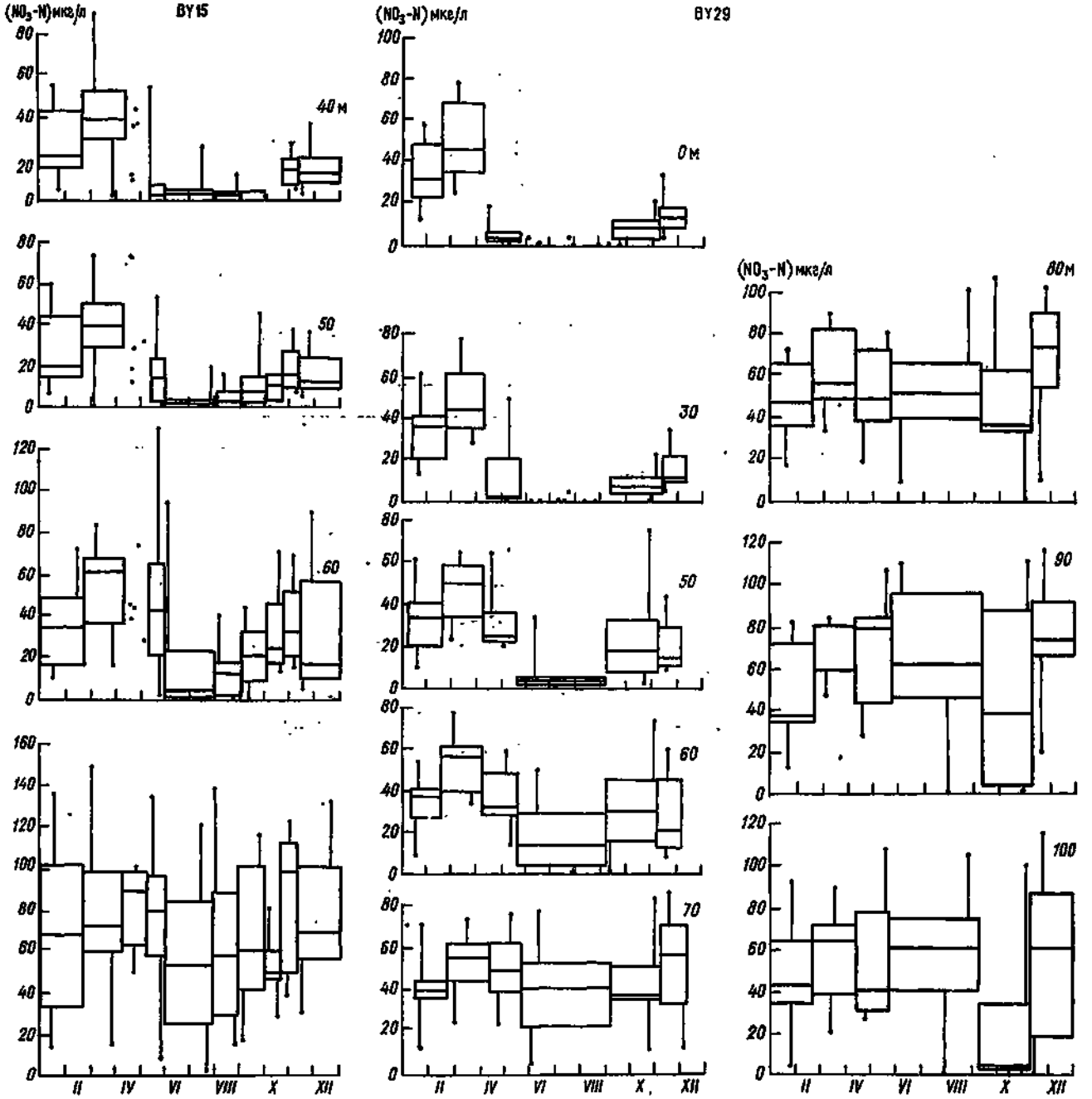

(NO3-N) мкг/л
BY15
40 м
50
60
(NO3-N) мкг/л
BY29
0 м
30
50
60
70
(NO3-N) мкг/л
80 м
90
100
II IV VI VIII X XII

Рис. 14.12.

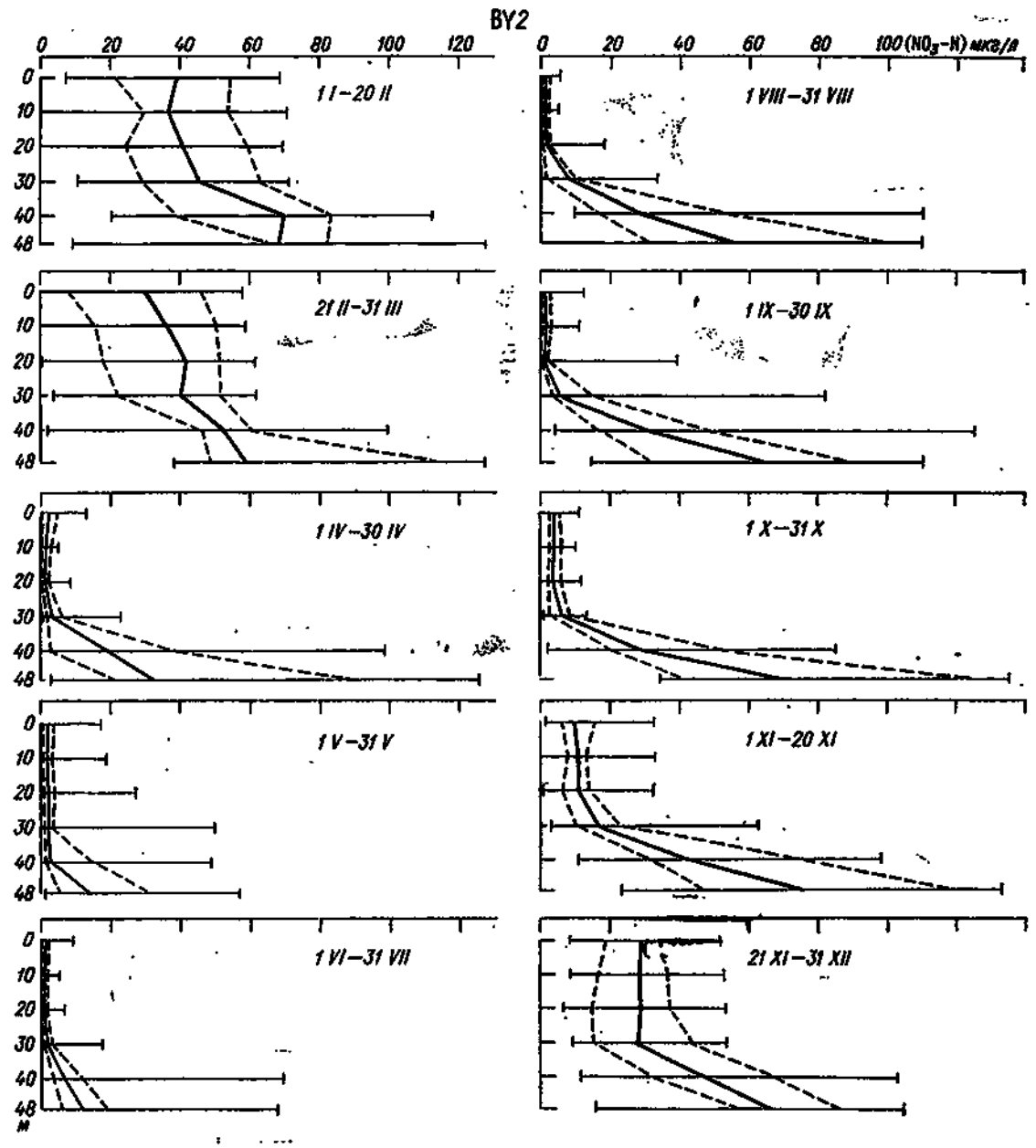


Рис. 14.13. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций нитратов в толще вод Арконской (ст. BY 2) и Борнхольмской (ст. BY 5) впадин, в юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), в Готландской впадине (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29).

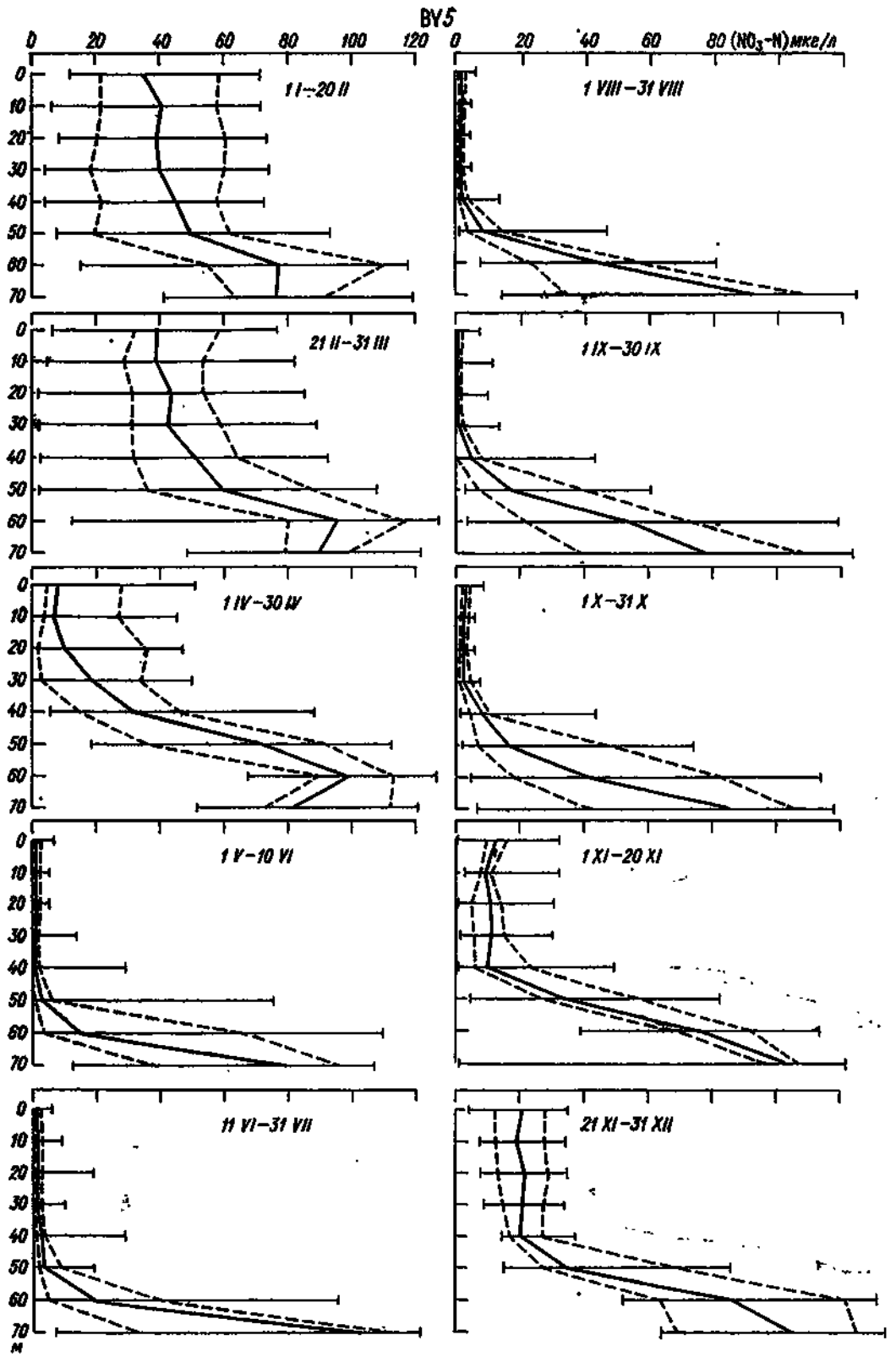

BY5
0 20 40 60 80 100 120
0 20 40 60 80 (NO3-N)мкг/л
1 I–20 II
1 VIII–31 VIII
21 II–31 III
1 IX–30 IX
1 IV–30 IV
1 X–31 X
1 V–10 VI
1 XI–20 XI
11 VI–31 VII
21 XI–31 XII
0 10 20 30 40 50 60 70
м

Рис. 14.13.

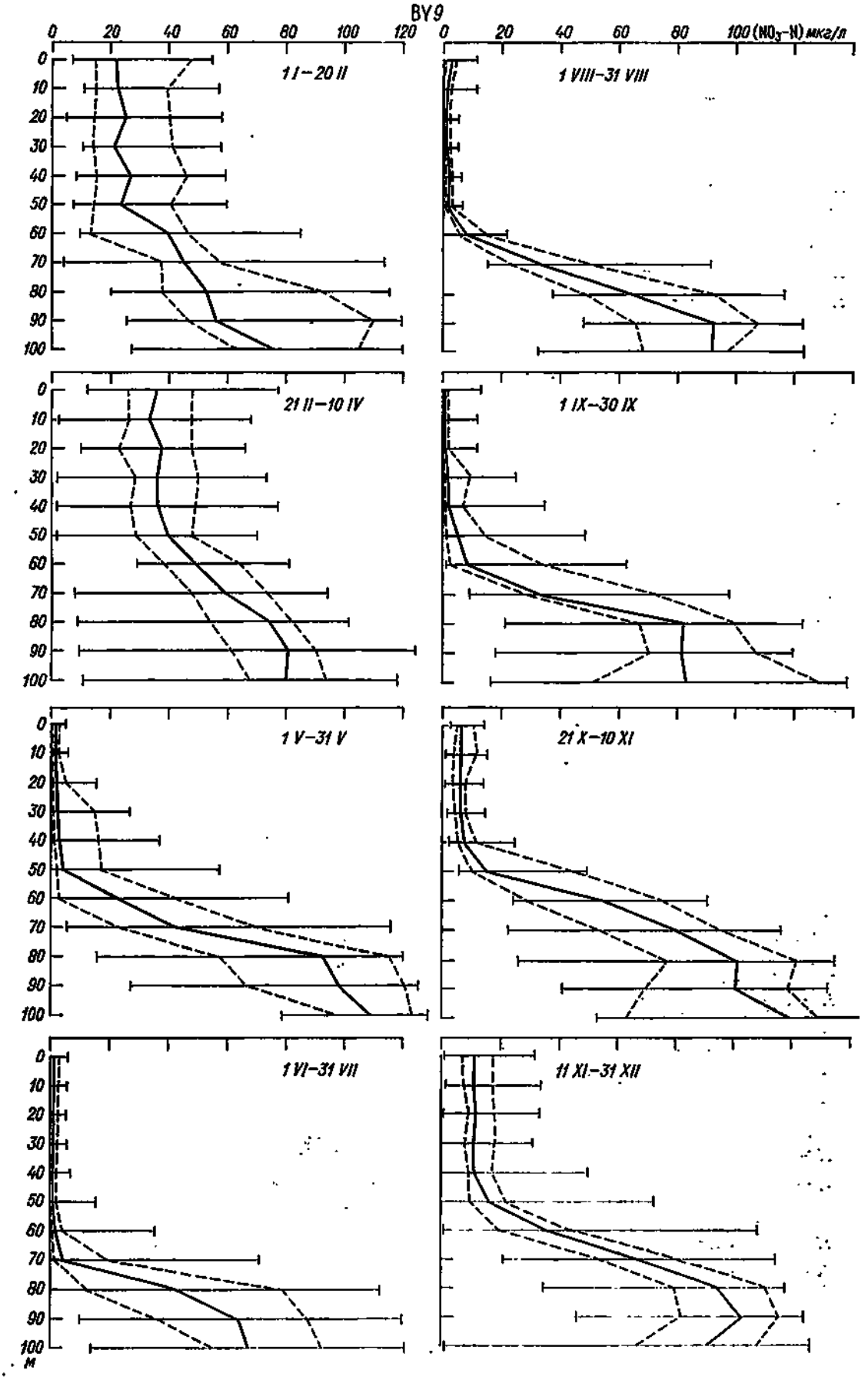

BY9
0 20 40 60 80 100 120
0 20 40 60 80 100 (NO3-N) мкг/л
1 I–20 II
1 VIII–31 VIII
21 II–10 IV
1 IX–30 IX
1 V–31 V
21 X–10 XI
1 VI–31 VII
11 XI–31 XII
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
м

Рис. 14.13.

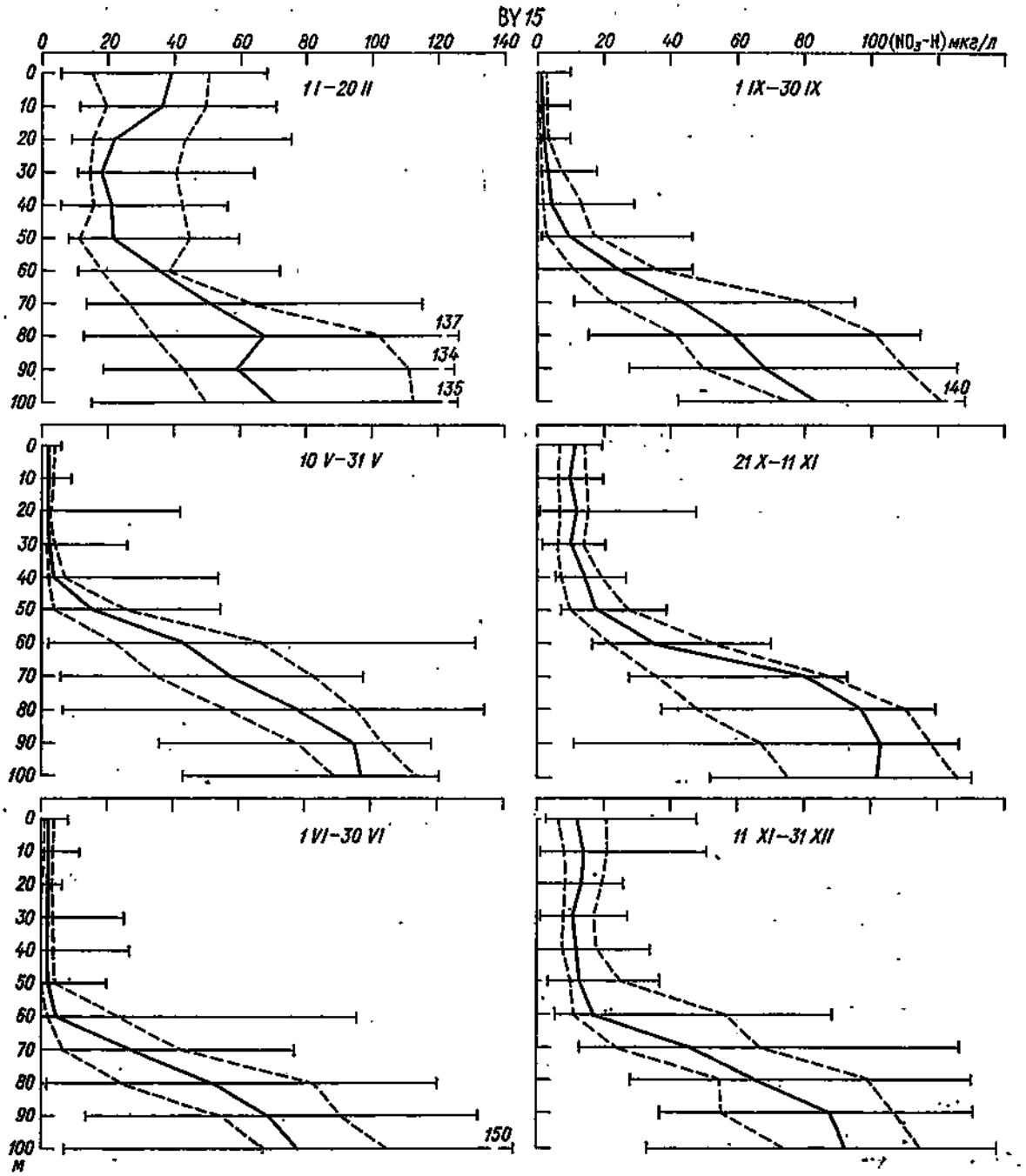

BY 15
0 20 40 60 80 100 120 140
0 20 40 60 80 100(NO3-N)мкг/л
I I–20 II
1 IX–30 IX
10 V–31 V
21 X–11 XI
1 VI–30 VI
11 XI–31 XII
137
134
135
140
150
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
м

Рис. 14.13.

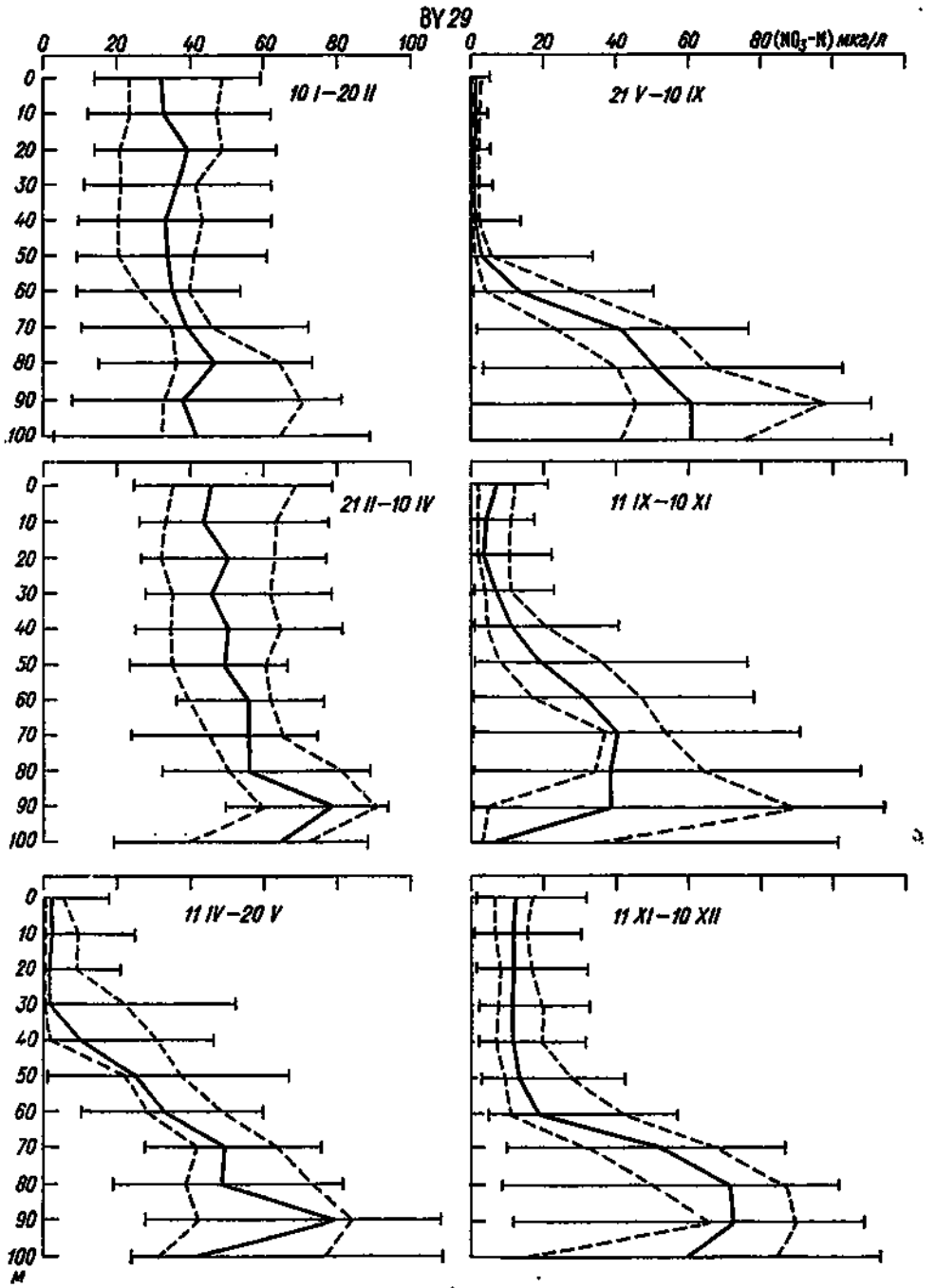

BY 29
0 20 40 60 80 100
0 20 40 60 80 (NO3-N) мкг/л
10 I–20 II
21 V–10 IX
21 II–10 IV
11 IX–10 XI
11 IV–20 V
11 XI–10 XII
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
м

Рис. 14.13.

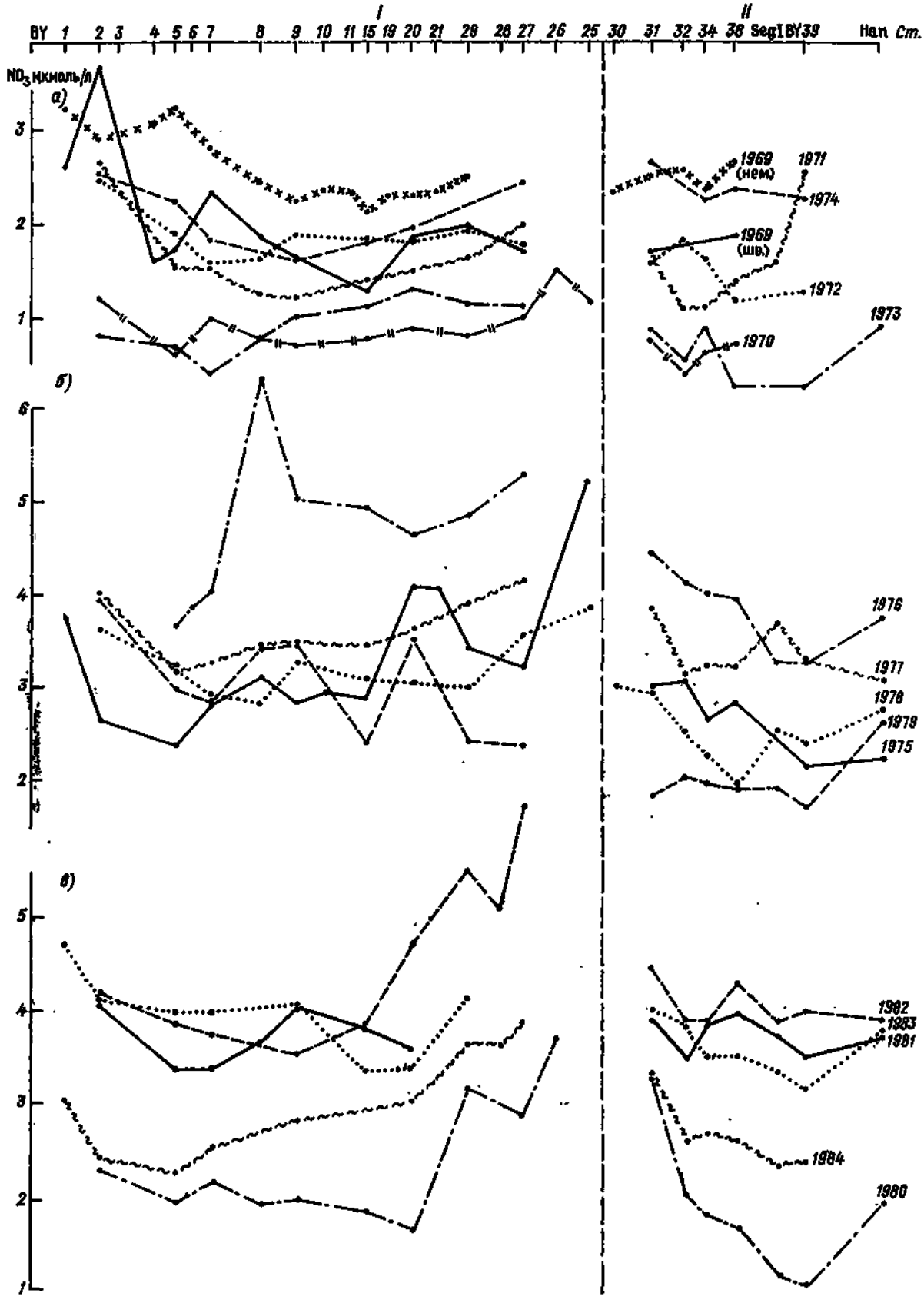


Рис. 14.14. Концентрации нитратов в зимний период на поверхности восточного (I) и западного (II) продольных разрезов по данным шведских наблюдений, сгруппированным по годам.

Схема расположения станций показана на рис. 12.28 *г*.

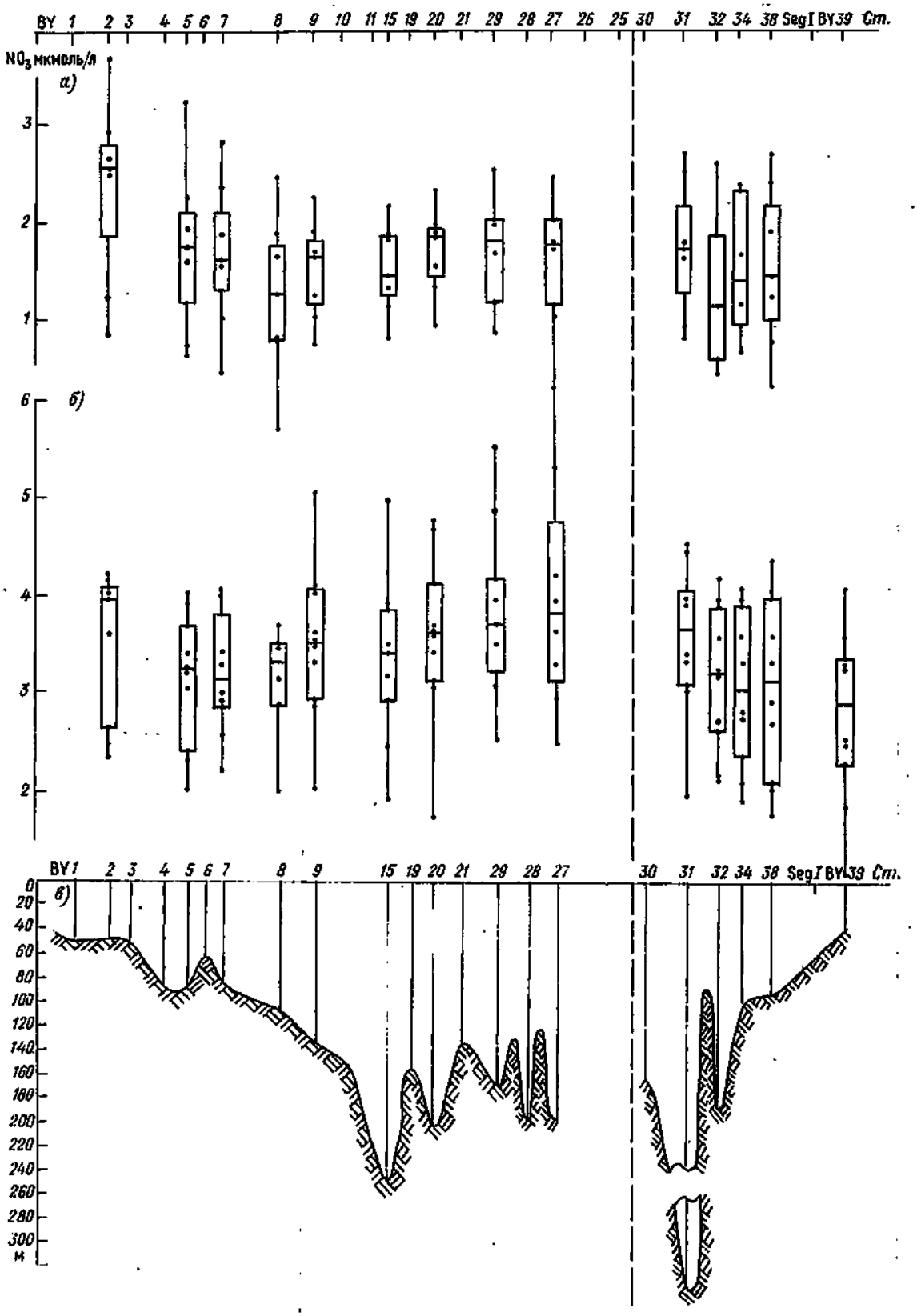


Рис. 14.15. Результаты квартильного анализа данных, представленных на рис. 14.14.

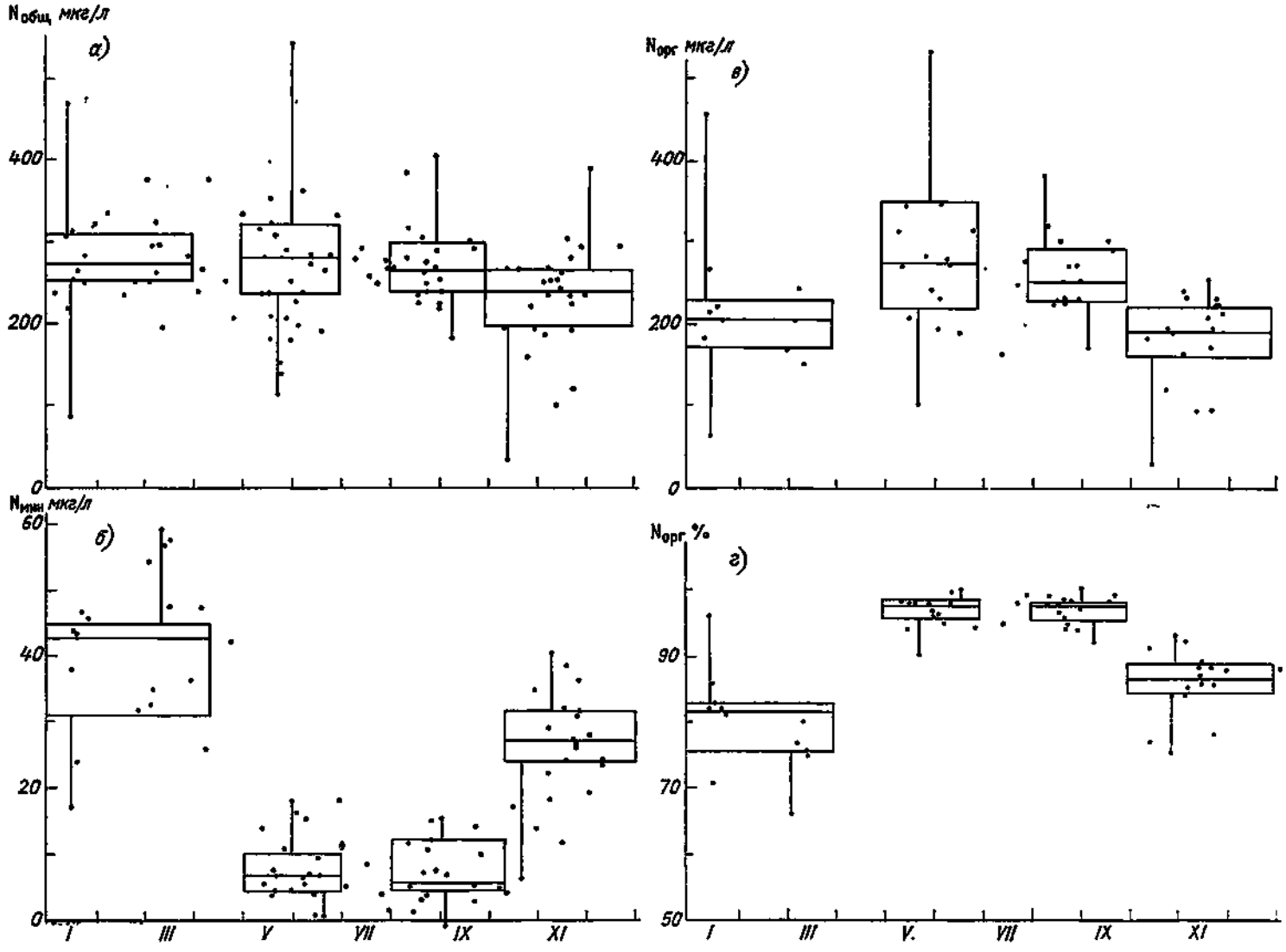


Рис. 14.16. Годовой ход концентраций общего (*а*), минерального (*б*) и органического (*в*) азота и процентного содержания органического азота (*г*) на поверхности Готландской впадины (ст. BY 15) по данным квартильного анализа.

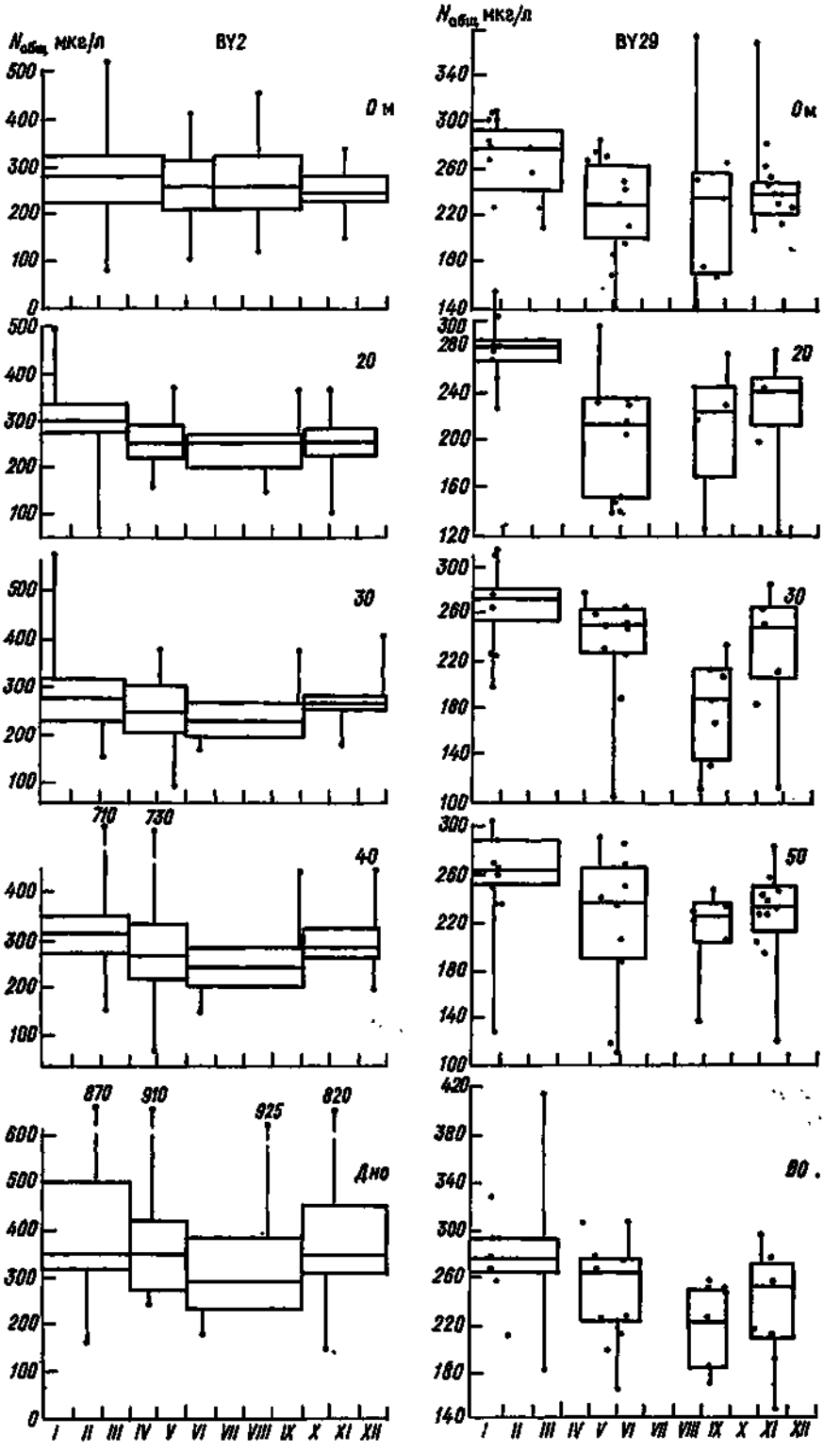


Рис. 14.17. Годовой ход концентраций общего азота в толще вод Арконской впадины (ст. BY 2) и в северной части моря (ст. BY 29) по данным квартильного анализа.

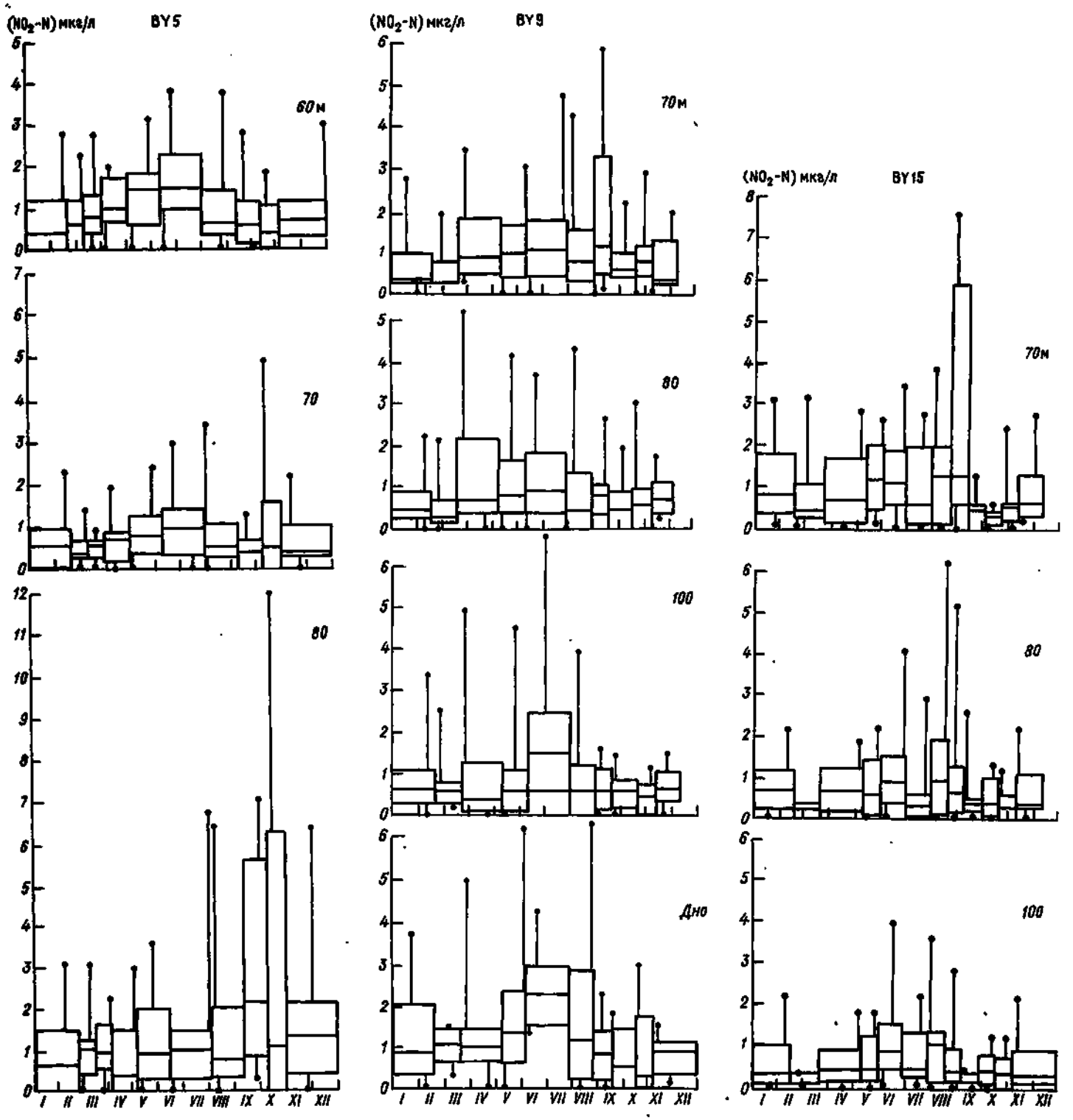


Рис. 14.18. Годовой ход концентраций нитритов в активном глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) и в глубинном слое юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и Борнхольмской впадины (ст. BY 5) по данным квартильного анализа.

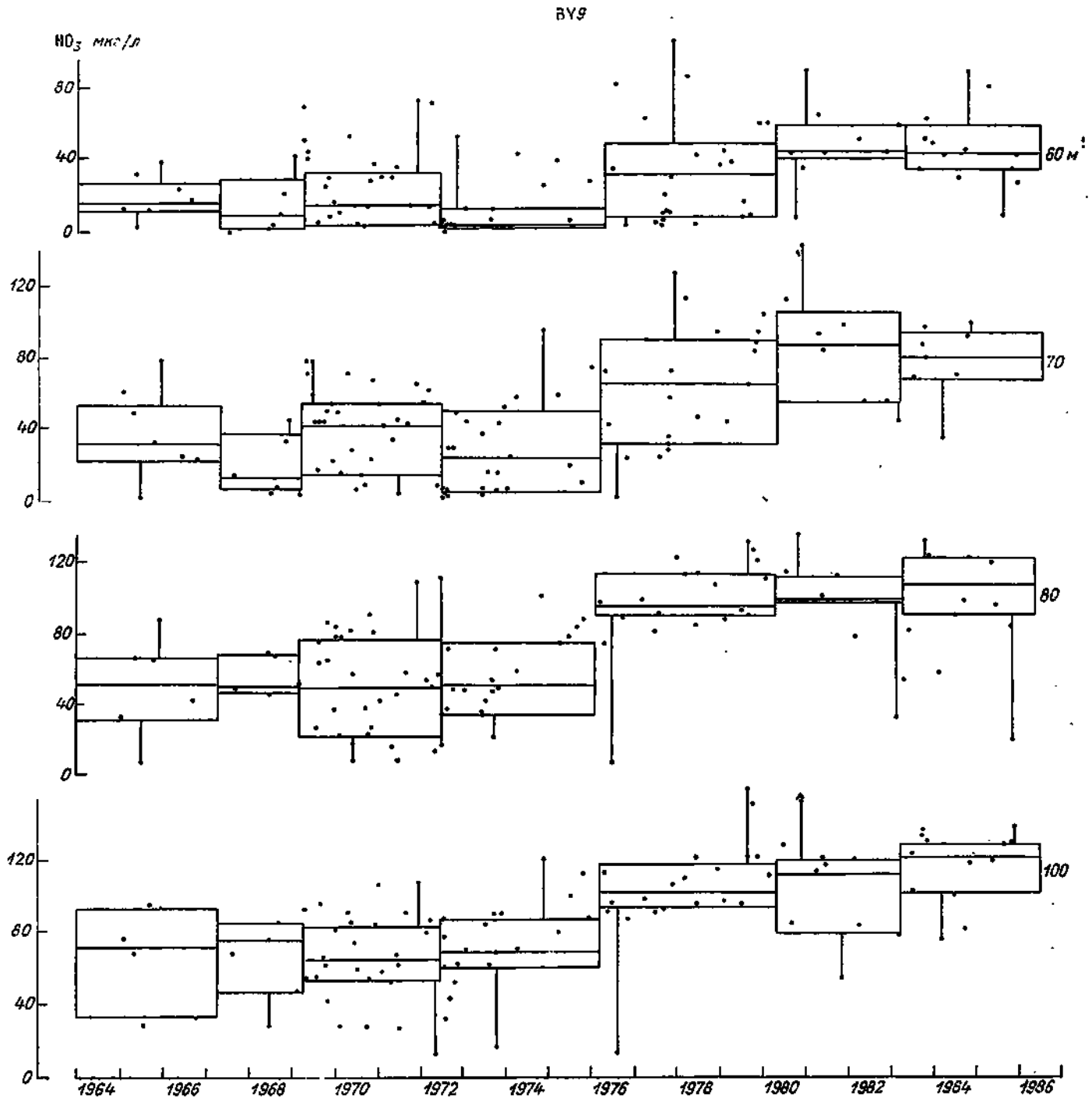


Рис. 14.19. Квартильные оценки концентраций нитратов в глубинном слое юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и в активном глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15).

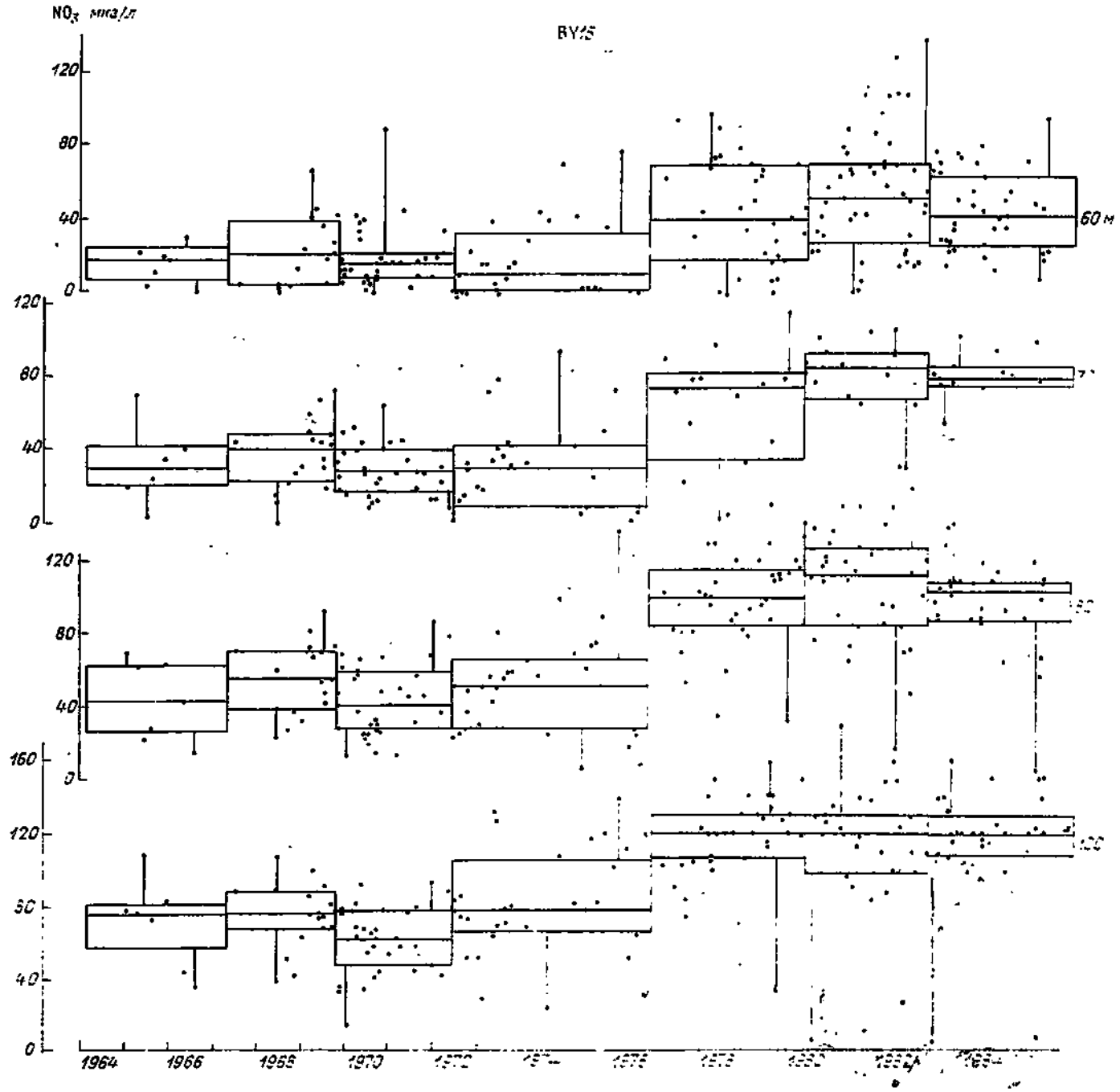

NO3 мг/л
BY15
120
80
40
0
60 м
120
80
40
0
120
80
40
0
160
120
80
40
0
1964
1966
1968
1970

Рис. 14.19.

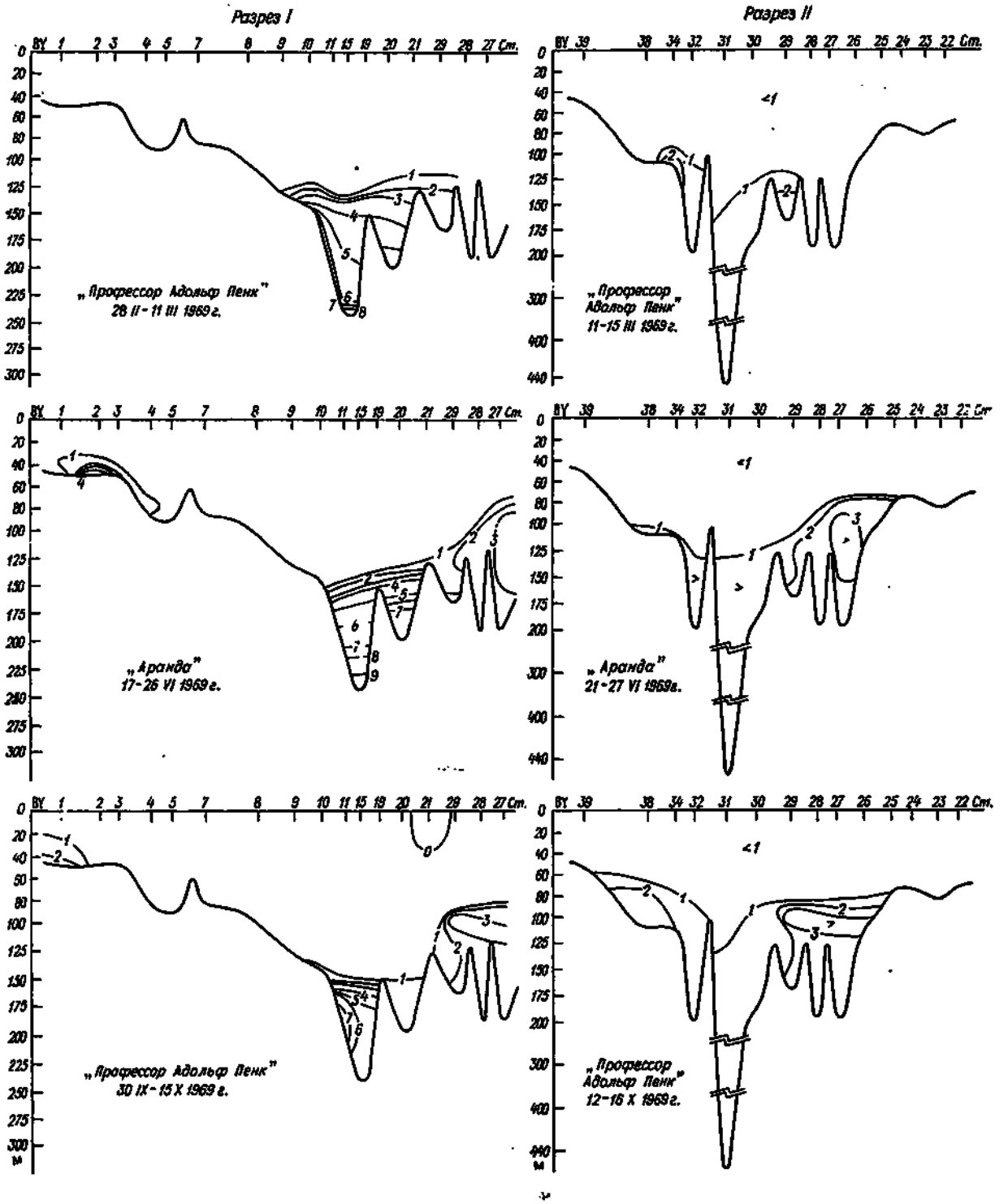


Рис. 14.20. Распределение концентраций аммония на восточном (I) и западном (II) продольных разрезах в 1969—1970 гг.

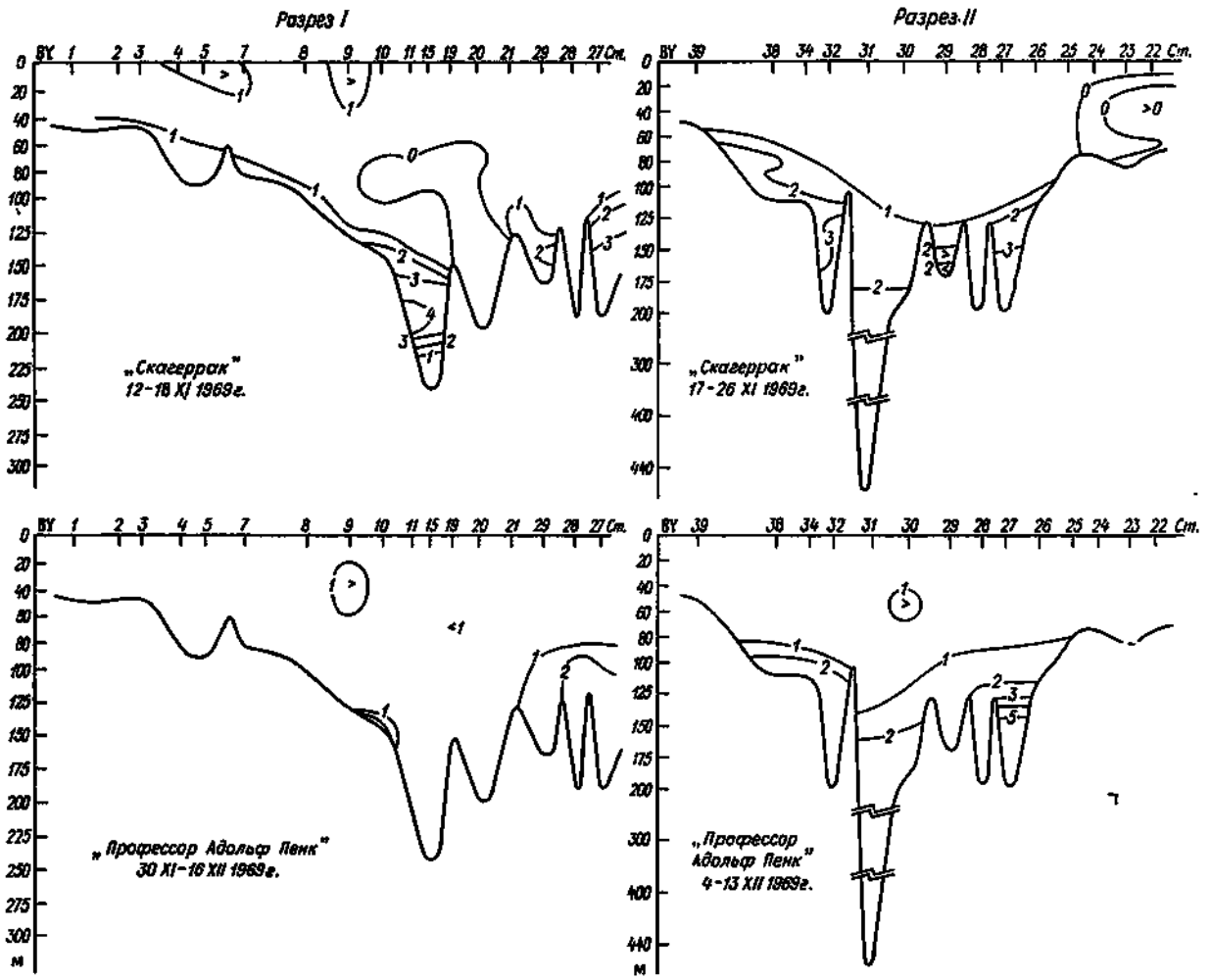

Разрез I
Разрез II
„Скагеррак"
12-16 XI 1969г.
„Скагеррак"
17-26 XI 1969г.
„Профессор Адольф Пенк"
30 XI-16 XII 1969г.
„Профессор Адольф Пенк"
4-13 XII 1969г.
м

Рис. 14.20.

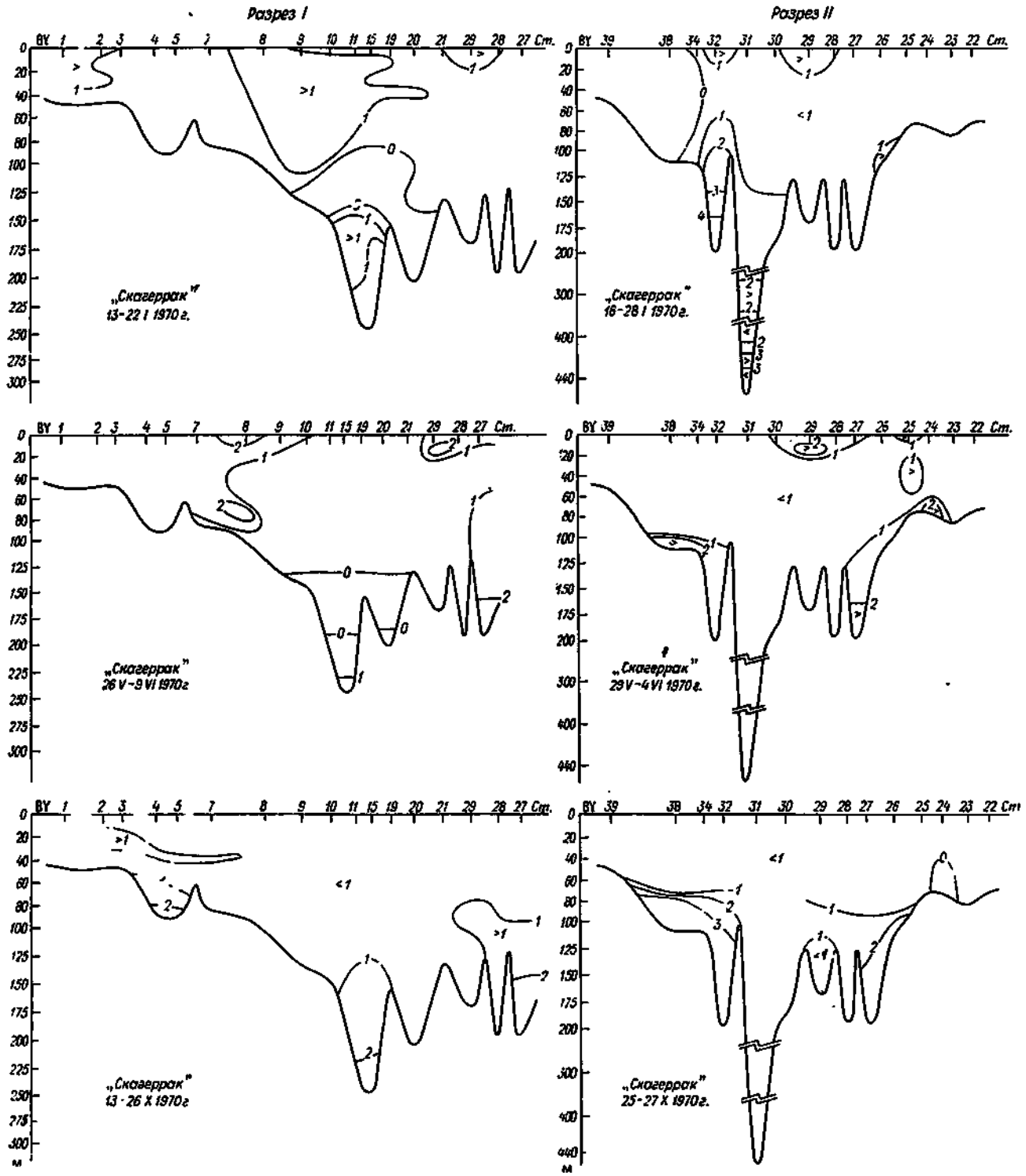

Разрез I
Разрез II
„Скагеррак"
13-22 I 1970 г.
„Скагеррак"
16-28 I 1970 г.
„Скагеррак"
26 V-9 VI 1970 г.
„Скагеррак"
29 V-4 VI 1970 г.
„Скагеррак"
13-26 X 1970 г.
„Скагеррак"
25-27 X 1970 г.

Рис. 14.20.

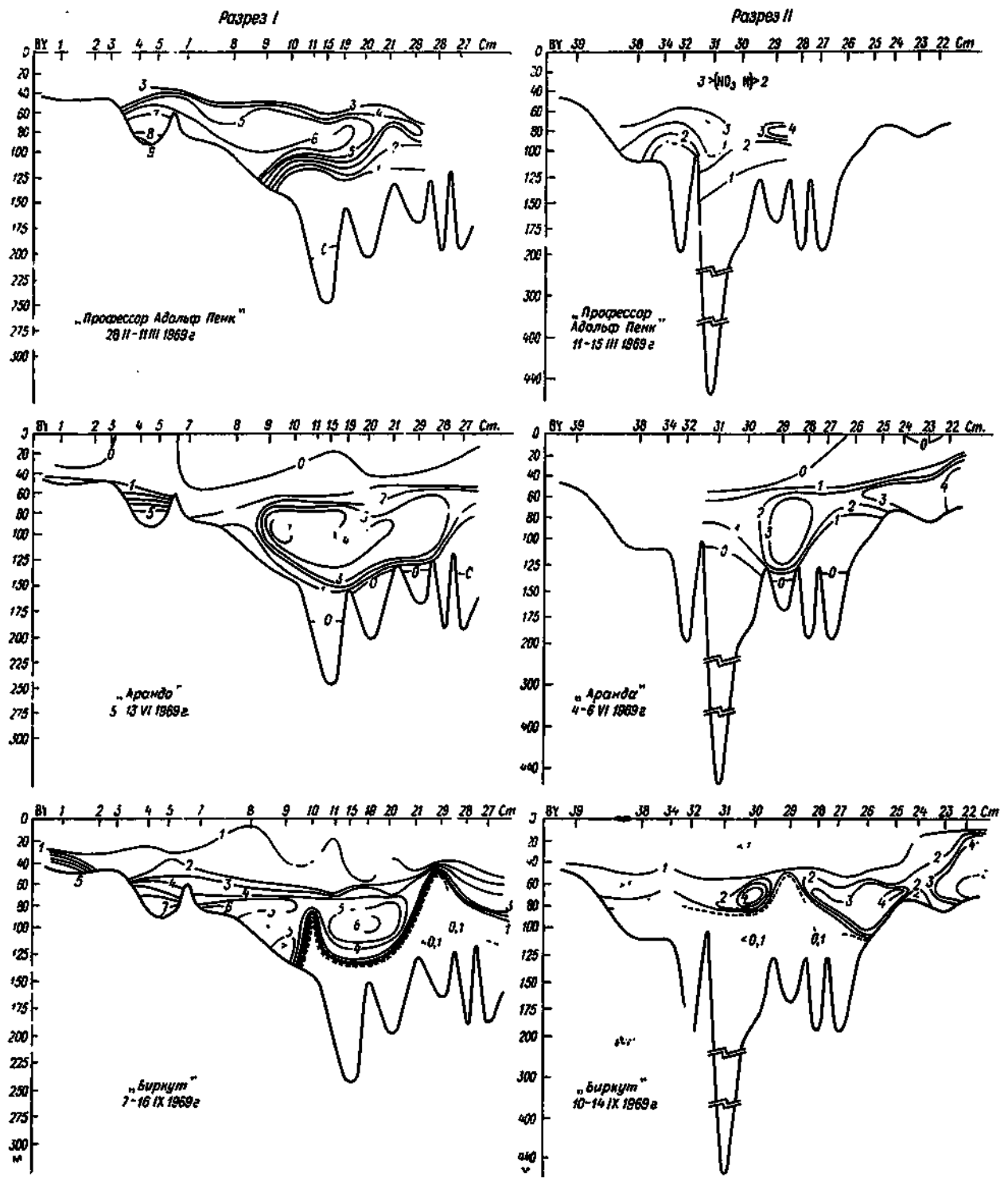


Рис. 14.21. Распределение концентраций нитратов на восточном (I) и западном (II) продольных разрезах в 1969—1970 гг.

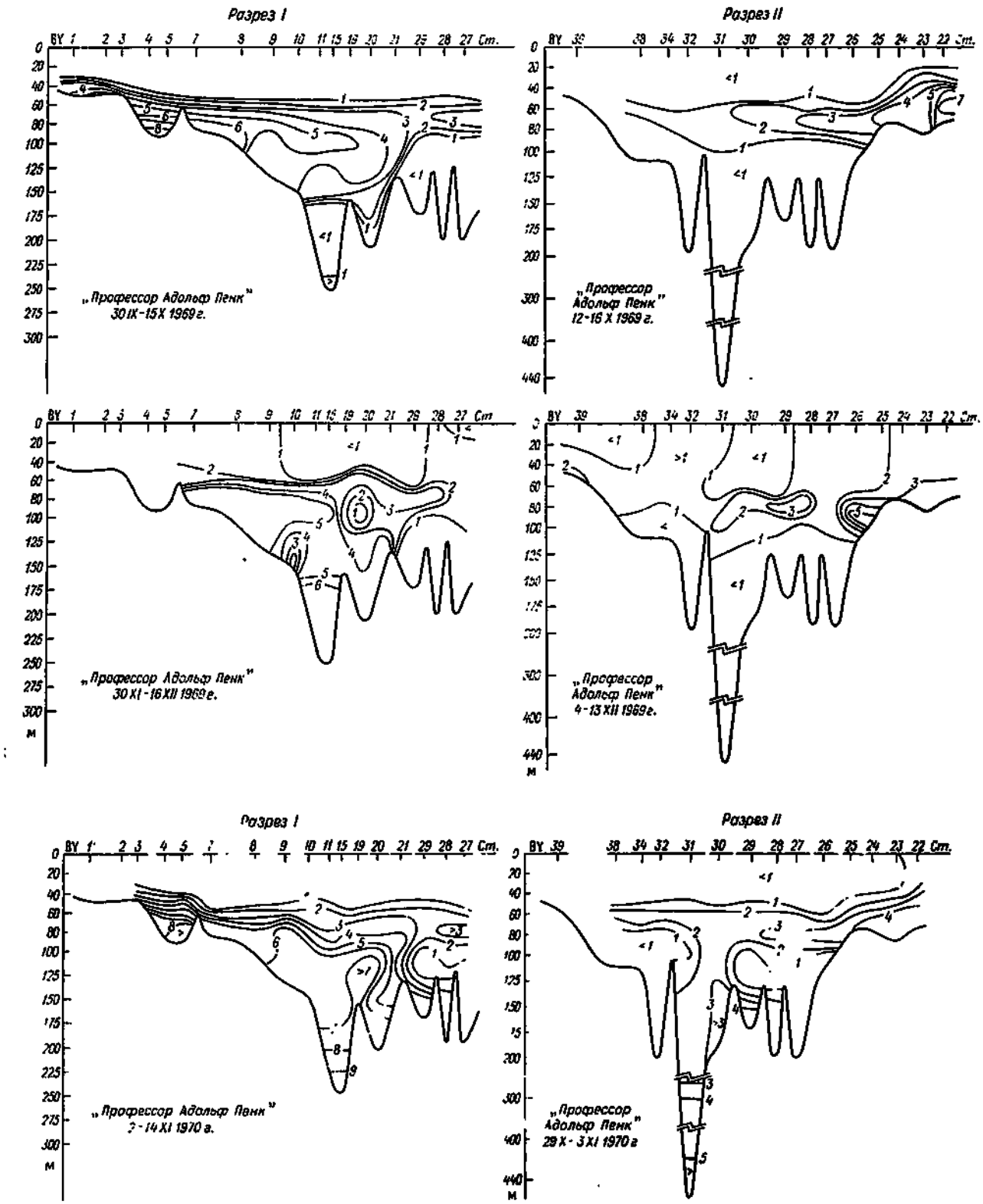

Разрез I
Разрез II
„Профессор Адольф Пенк"
30 IX-15 X 1969 г.
„Профессор Адольф Пенк"
12-16 X 1969 г.
„Профессор Адольф Пенк"
30 XI-16 XII 1969 г.
„Профессор Адольф Пенк"
4-13 XII 1969 г.
Разрез I
Разрез II
„Профессор Адольф Пенк"
2-14 XI 1970 г.
„Профессор Адольф Пенк"
29 X-3 XI 1970 г.

Рис. 14.21.

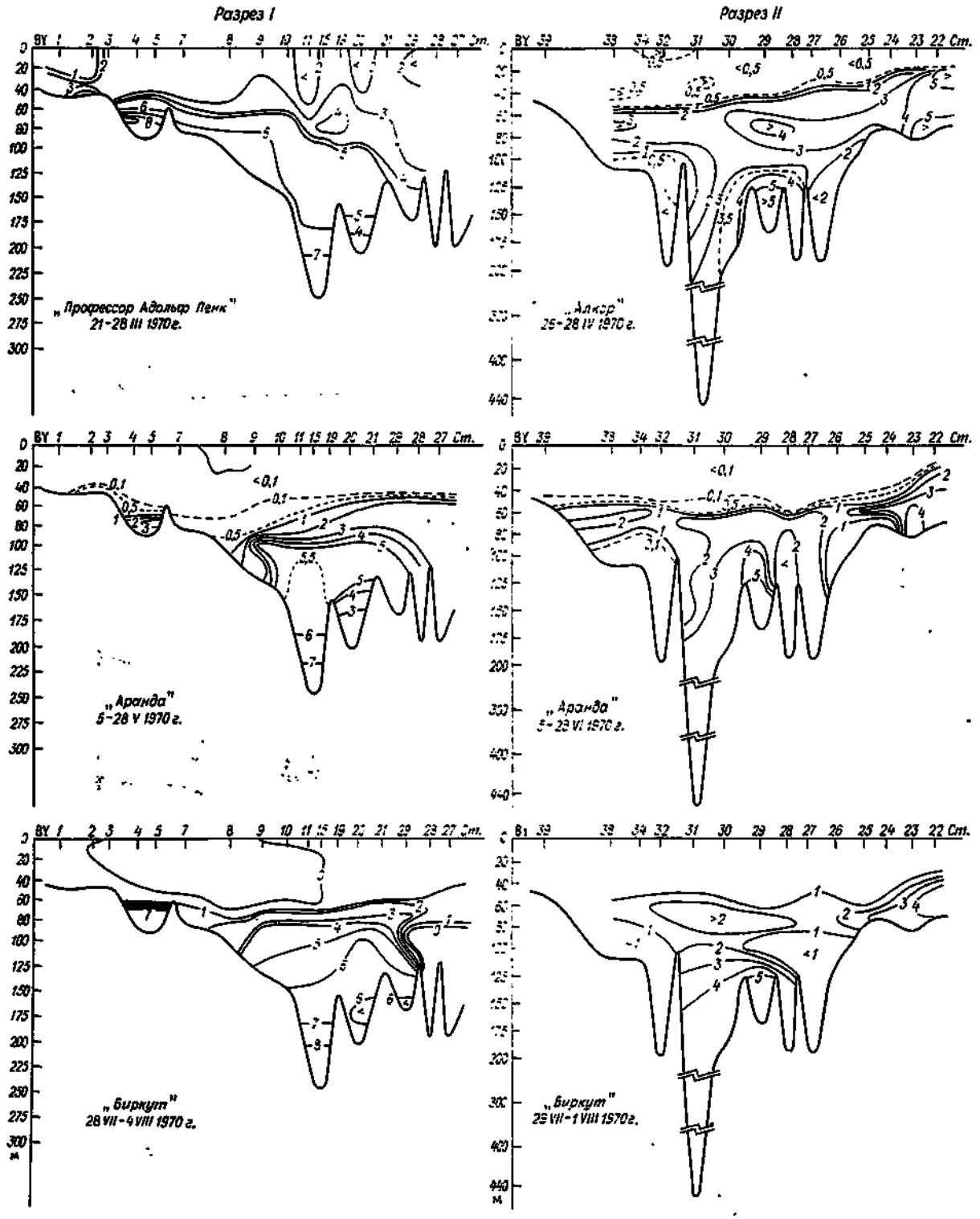

Разрез I
Разрез II
„Профессор Адольф Пенк"
21–28 III 1970г.
„Алкор"
25–28 IV 1970 г.
„Аранда"
5–28 V 1970 г.
„Аранда"
5–29 VI 1970 г.
„Биркут"
28 VII–4 VIII 1970 г.
„Биркут"
29 VII–1 VIII 1970г.

Рис. 14.21.

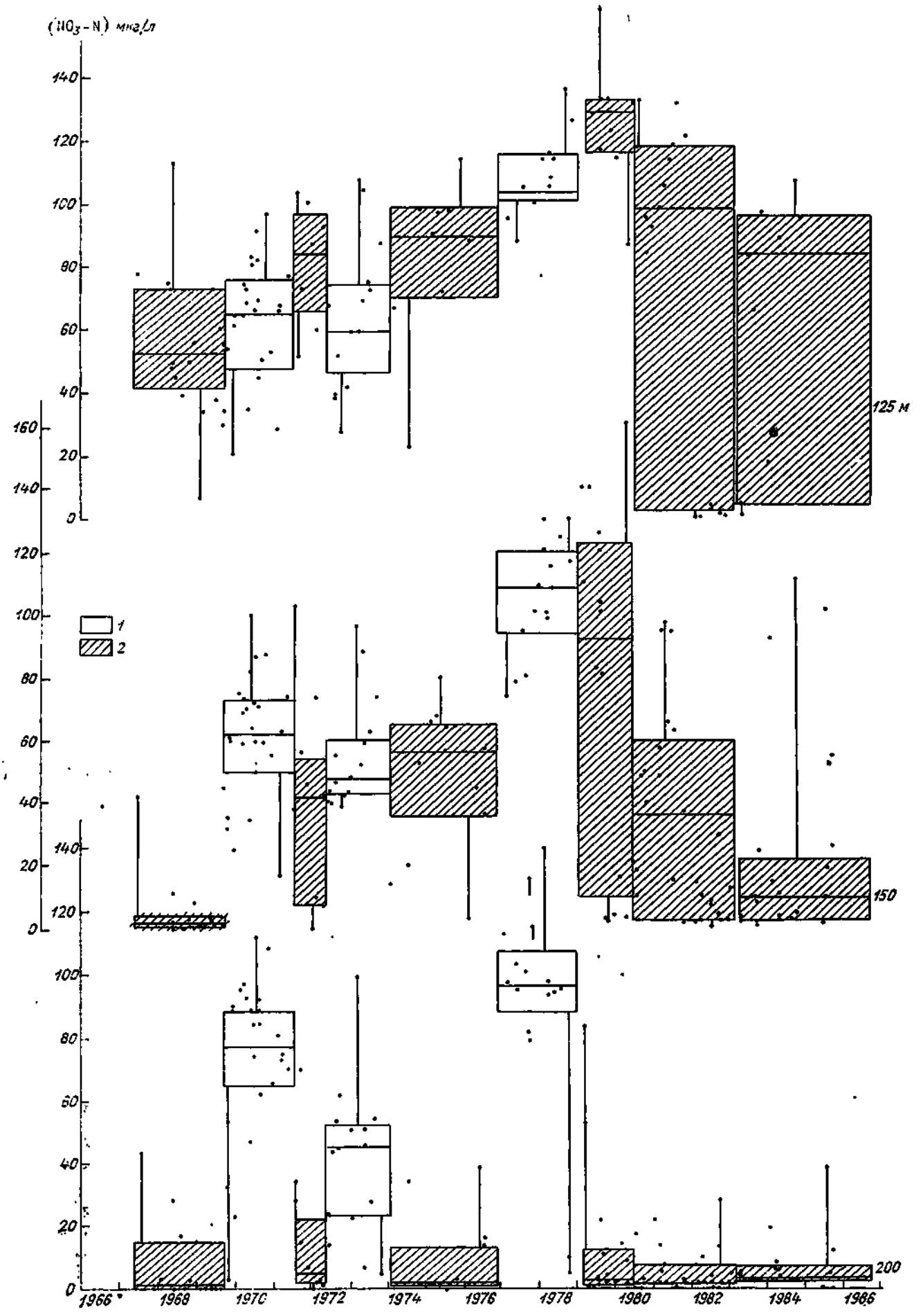


Рис. 14.22. Квартильные оценки концентраций нитратов в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) для интервалов кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условий у дна.

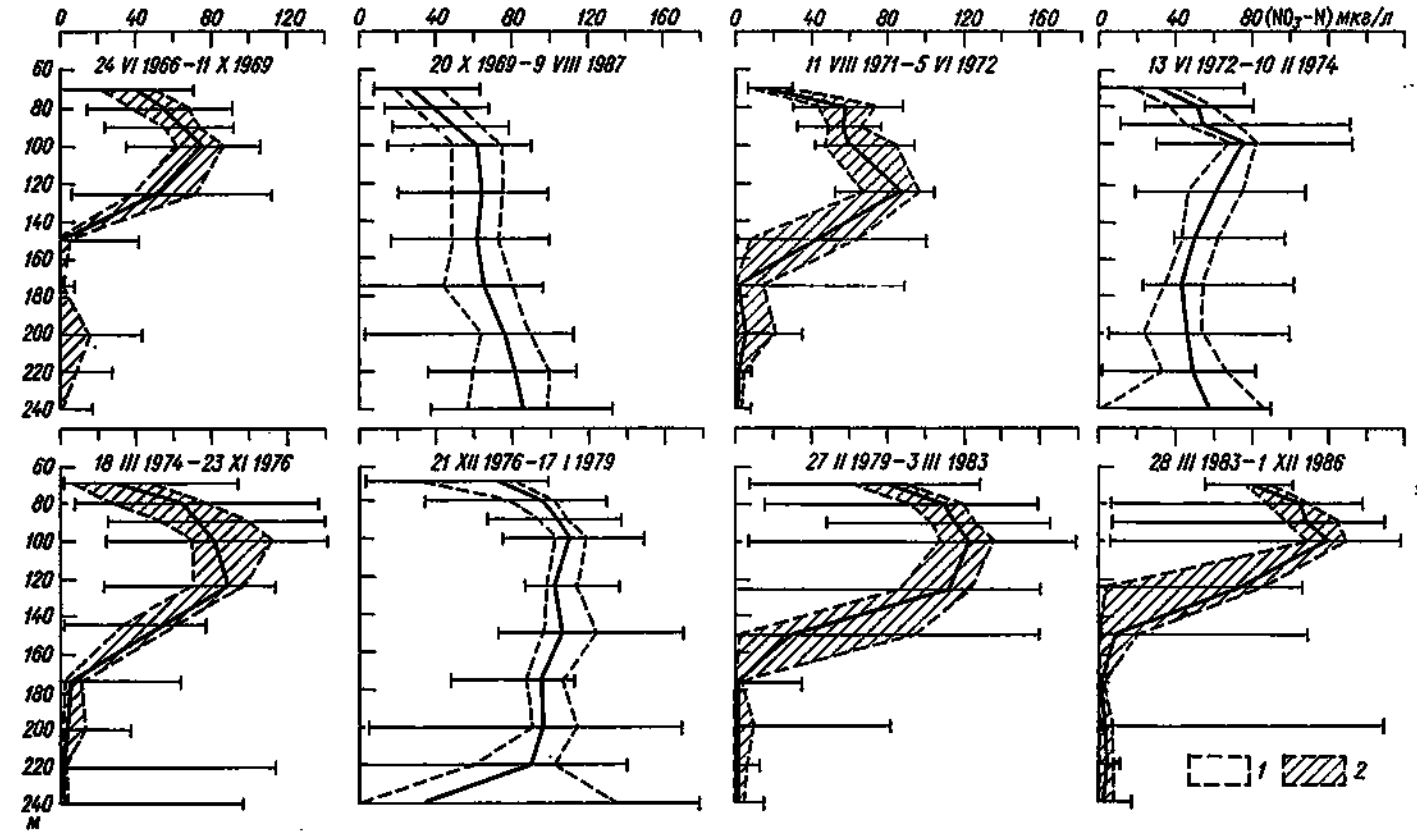


Рис. 14.23. Вертикальное распределение концентраций нитратов в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) для интервалов кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условий у дна по данным квартильного анализа.

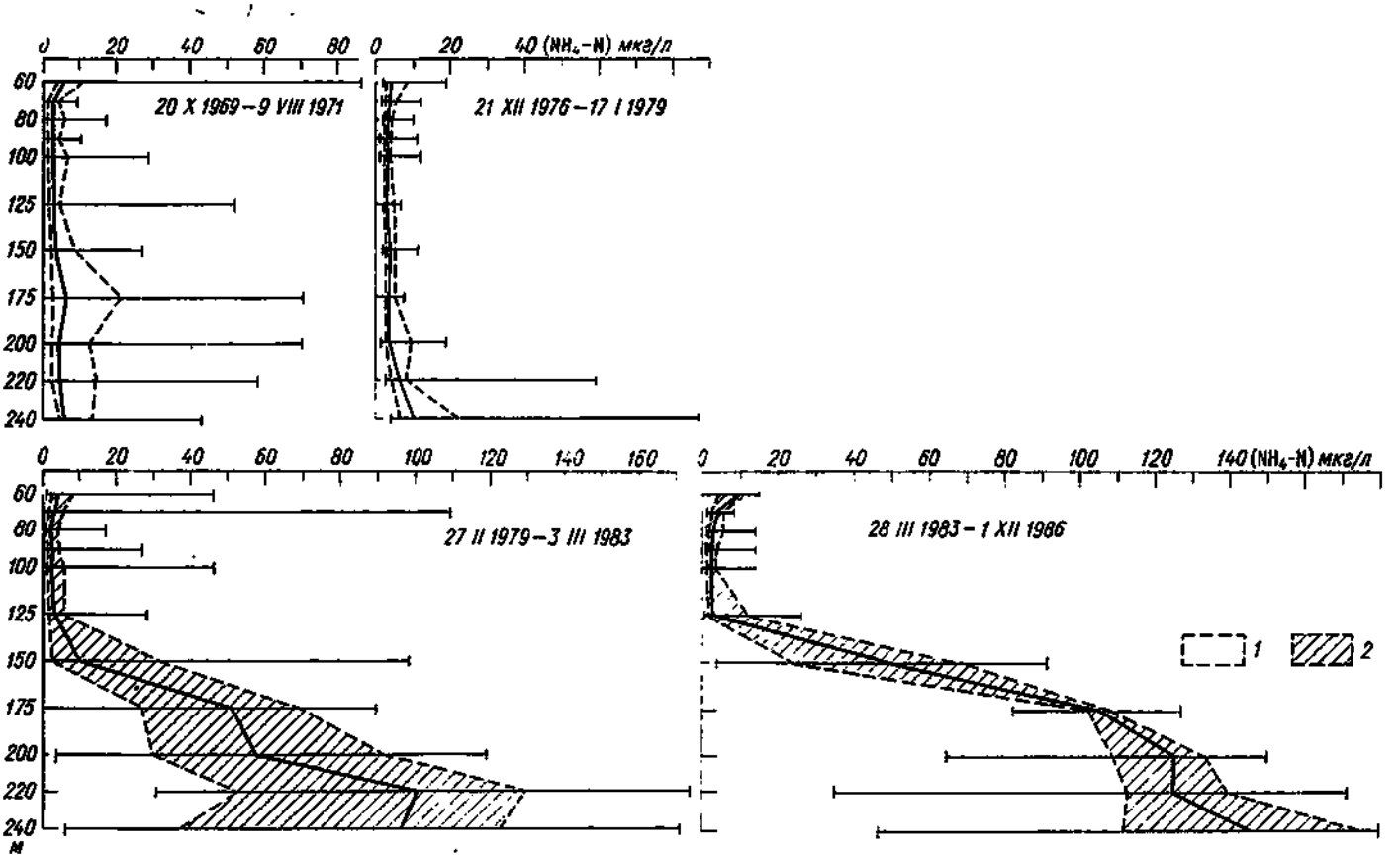


Рис. 14.24. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций аммония в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) для интервалов кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условий у дна.

Таблица 14.3

Статистические характеристики концентраций общего азота (мкг/л) за период 1969—1984 гг.

Горизонт, м	$\bar{x}$	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
			Ст. BY 2				
0	260	100	210	260	310	520	87
10	260	130	220	260	310	448	81
20	260	100	220	260	300	500	82
30	260	150	210	260	290	580	86
40	280	120	220	280	330	460	79
Дно	340	140	280	340	420	920	67
			Ст. BY 5				
0	240	90	200	250	270	490	69
10	250	140	220	240	270	350	61
20	240	140	210	250	270	380	59
30	230	110	190	240	260	390	65
40	220	120	190	220	250	490	67
50	230	100	190	230	260	500	62
60	260	160	240	260	290	490	58
70	300	110	270	290	330	560	55
80	300	160	270	310	320	660	57
Дно	320	120	270	310	370	640	55
			Ст. BY 9				
0	230	70	190	230	270	370	56
10	260	140	230	260	280	460	43
20	250	130	210	240	280	460	42
30	240	130	200	240	280	460	46
40	230	90	200	230	260	500	46
50	240	70	180	250	270	550	46
60	260	80	210	270	290	550	44
70	270	80	210	280	300	560	43
80	300	100	260	300	340	510	46
90	310	120	270	310	340	470	45
100	310	140	280	310	330	390	41
Дно	330	110	290	330	390	650	40
			Ст. BY 15				
0	270	80	240	260	290	470	101
10	270	130	240	270	290	390	90
20	250	110	210	250	270	380	52
30	240	130	210	240	270	420	55
40	230	110	190	230	260	490	54
50	230	90	210	230	260	390	53
60	270	110	240	270	290	420	79
70	260	140	220	270	300	370	53
80	280	140	240	280	320	390	60
90	290	180	270	290	320	420	51
100	300	200	270	300	320	450	54
125	280	180	230	270	330	450	50
150	260	160	230	270	300	480	51
175	270	170	220	270	320	400	46
200	280	150	230	280	350	470	54
220	360	180	290	360	450	590	79
Дно	360	180	270	370	440	690	47
			Ст. BY 29				
0	240	140	210	240	270	370	45
10	250	150	220	250	280	320	39
20	240	120	200	240	270	330	38
30	240	100	200	250	270	310	37
40	240	110	210	250	270	330	35
50	240	110	210	240	260	310	40
60	250	150	210	260	290	460	34
70	270	130	240	270	300	550	34
80	280	110	240	280	300	570	37
90	280	150	260	280	290	340	29
100	270	180	230	270	300	570	35
125	280	140	240	280	310	390	36
150	260	130	220	260	290	340	34
Дно	260	160	210	260	290	540	37

лежащих слоях — концентрации нитратов в общем возрастают в аэробных условиях практически на всех горизонтах (см. рис. 14.22 и 14.23). Напротив, убыль нитратов вследствие денитрификации, продолжающаяся в течение последних 14 лет, оказалась, по-видимому, нескомпенсированной увеличением содержания аммония, что привело к снижению суммарного содержания минеральных соединений азота (см. рис. 14.22—14.24, табл. 14.7).

Рассматривая процесс денитрификации, необходимо отметить, что из-за фиксированных и сравнительно редких по глубине стандартных горизонтов наблюдений, содержащихся в анализируемой информационной базе, оказалось крайне затруднительно продемонстрировать такую особенность вертикального распределения нитритов, как их вторичный максимум, который обнаруживается при учащенном [397] или непрерывном [275] отборе проб. Этот максимум наблюдается в области резкого падения концентраций нитратов и вызван накоплением NO_2^- как промежуточного продукта процесса денитрификации. В качестве некоторого отражения этого явления могут, по-видимому, служить повышенные значения верхней квартили (рис. 14.25, табл. 14.5).

При анаэробных условиях в придонном слое концентрации общего азота часто оказываются выше, чем при аэробных (см. табл. 14.8). При этом суммарное содержание минерального азота оказывается ниже во всем придонном слое за исключением, быть может, слоев, наиболее близких ко дну — месту активной аммонификации (см. рис. 14.24, табл. 14.7). Судя по статистическим характеристикам, увеличение содержания общего азота происходит за счет органической фракции, возможно, вследствие замедленного и/или недостаточно полного и глубокого разложения органического вещества в анаэробных условиях (см. табл. 14.9).

14.2. Фосфор

В морской воде фосфор представлен в виде минеральных и органических соединений, имеющих как растворенную, так и взвешенную форму. Наиболее распространенными и изученными растворенными неорганическими соединениями фосфора являются ортофосфат-ионы PO_4^{2-}, обычно называемые фосфатами. Органические соединения фосфора входят в состав детрита и встречаются в виде коллоидов и растворенных молекул.

Характерная особенность биогеохимического круговорота фосфора — физико-химические процессы, в результате которых происходит переход фосфатного фосфора из растворенной формы во взвешенную и обратно, что в значительной степени определяет закономерности транспорта фосфора и вертикального распределения его различных форм:

— соосаждение с гидроокислами металлов (главным образом железа и марганца) в процессе коагуляции и флоккуляции растворенных органических (главным образом гуминовых) веществ при окислительных (аэробных) условиях;

— высвобождение фосфатов из «гумино-железофосфатных» комплексов как взвешенных в воде, так и находящихся на поверхности донных отложений при восстановительных (анаэробных) условиях;

— обратимая сорбция фосфатов на частицах глины и окислов металлов в воде и в донных отло-

Таблица 14.4

Многолетние статистические характеристики концентраций аммонийного азота (мкг/л) в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Mo	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
						Ст. BY 5								
60	4	0	2	4	7	21	78	4	1	3	3	8	33	15
70	3	0	2	3	5	19	77	6	1	3	5	12	51	15
80	3	0	1	3	6	35	78	43	0	7	43	79	181	15
Дно	5	0	3	4	8	63	68	86	11	36	90	126	154	10
						Ст. BY 15								
100	3	0	1	3	6	28	50	3	0	1	3	6	46	61
125	3	0	2	3	5	52	41	4	0	2	3	8	28	48
150	4	0	3	4	7	27	50	17	0	4	12	41	99	57
175	5	0	2	4	9	70	43	49	0	18	51	75	127	45
200	5	0	3	4	9	70	50	68	4	29	70	104	150	60
225	5	0	3	5	9	59	46	82	4	50	78	120	174	49
Дно	8	0	4	7	15	43	36	107	13	81	107	133	180	49
						Ст. BY 29								
80	4	0	3	4	6	18	39	3	1	2	4	4	28	12
100	4	0	2	4	7	28	40	6	1	3	4	11	49	13
125	4	1	2	4	6	24	39	24	2	21	25	28	51	13
150	4	0	2	4	8	23	40	30	2	25	27	43	51	13
Дно	5	0	2	4	10	35	40	40	28	32	38	50	57	12

Таблица 14.5

Многолетние статистические характеристики концентраций нитритного азота (мкг/л) при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
						Ст. BY 5								
60	0,9	0,0	0,3	0,8	1,7	11,0	183	1,0	0,0	0,5	1,0	1,6	8,1	43
70	0,6	0,0	0,3	0,6	1,0		122	0,7	0,0	0,2	0,7	1,1	11,2	30
80	0,9	0,0	0,3	0,7	1,8	15,0	194	2,5	0,0	0,8	2,0	5,0	17,7	46
Дно	1,3	0,0	0,5	1,0	2,6	22,0	176	1,1	0,0	0,3	1,0	2,1	17,7	40
						Ст. BY 15								
60	1,5	0,0	0,3	1,4	2,9	10,0	68	1,8	0,0	0,6	1,7	3,2	12,0	133
70	0,7	0,0	0,3	0,6	1,4	6,0	53	0,9	0,0	0,3	0,6	2,0	7,6	79
80	0,5	0,0	0,1	0,4	0,9	6,0	76	0,7	0,0	0,2	0,6	1,2	10,0	138
90	0,4	0,0	0,1	0,3	0,8	6,0	75	0,5	0,0	0,2	0,4	1,1	11,8	135
100	0,4	0,0	0,1	0,3	0,7	6,0	76	0,4	0,0	0,1	0,4	0,8	9,2	139
125	0,3	0,0	0,0	0,3	0,6	4,0	44	0,3	0,0	0,0	0,3	0,6	7,6	73
150	0,4	0,0	0,1	0,4	0,8	9,0	67	0,5	0,0	0,2	0,4	1,0	14,0	124
175	0,6	0,0	0,1	0,6	0,9	5,0	43	0,3	0,0	0,1	0,3	0,6	12,6	63
200	0,5	0,0	0,1	0,4	1,0	9,0	72	0,5	0,0	0,1	0,3	1,3	8,3	133
225	0,8	0,0	0,3	0,7	1,3	10,0	49	0,4	0,0	0,0	0,3	0,8	5,0	89
Дно	1,1	0,0	0,5	1,0	1,9	8,0	48	0,6	0,0	0,1	0,3	1,5	10,0	84
						Ст. BY 29								
80	0,4	0,0	0,3	0,3	0,8	4,2	34	0,4	0,0	0,3	0,3	0,5	2,7	15
100	0,3	0,0	0,2	0,3	0,4	5,2	37	0,3	0,0	0,0	0,3	0,4	1,7	17
125	0,4	0,0	0,2	0,3	0,8	4,3	35	0,2	0,0	0,0	0,3	0,3	2,4	16
150	0,4	0,0	0,2	0,3	0,6	3,4	35	0,2	0,0	0,0	0,2	0,3	2,4	16
Дно	0,7	0,0	0,3	0,7	1,2	8,7	39	0,3	0,0	0,1	0,3	0,3	2,4	16

Таблица 14,6

Многолетние статистические характеристики концентраций нитратного азота (мкг/л) в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
					Ст. BY 5									
60	60	0	20	63	94	190	129	48	1	28	42	81	99	20
70	85	1	54	89	108	185	104	86	1	39	98	107	140	21
80	102	10	80	102	126	190	130	49	0	3	39	116	140	22
Дно	98	8	70	100	123	165	110	3	0	1	2	9	121	16
					Ст. BY 15									
60	19	0	6	16	35	98	64	41	0	20	39	65	140	140
70	31	0	16	31	44	98	54	52	0	27	50	80	130	71
80	50	2	31	51	68	130	66	93	6	68	95	115	160	120
90	65	11	43	64	89	140	65	99	8	72	103	120	165	112
100	80	16	62	77	104	150	67	109	7	80	112	130	180	114
125	73	21	54	73	94	137	55	85	1	51	88	111	163	68
150	73	17	52	71	98	170	65	23	0	3	14	62	160	102
175	66	1	41	65	92	115	56	2	0	1	1	3	91	58
200	78	3	52	81	96	170	65	4	0	1	2	9	43	97
225	77	0	46	80	101	139	55	2	0	1	2	4	28	107
Дно	75	0	37	78	104	180	46	2	0	1	1	5	37	70
					Ст. BY 29									
80	56	10	39	55	76	107	42	54	1	37	53	73	95	18
100	61	0	34	64	80	116	43	28	1	8	26	54	76	19
125	61	1	41	57	88	124	42	2	0	1	1	6	102	18
150	58	1	37	55	87	149	43	1	0	0	1	1	91	17
Дно	56	1	29	57	83	149	42	1	0	0	1	1	2	15

Таблица 14.7

Многолетние статистические характеристики суммарного содержания (мкг/л) минеральных соединений азота в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
					Ст. BY 5									
60	64	5	32	66	93	163	59	72	6	35	82	90	116	14
70	90	14	66	99	113	187	62	83	34	52	86	106	129	14
80	99	17	74	102	118	161	67	74	36	58	69	99	181	14
Дно	98	12	66	101	123	176	58	81	13	38	85	115	136	8
					Ст. BY 15									
60	31	3	19	27	48	112	41	48	2	33	45	68	120	54
70	38	8	28	38	50	102	35	71	15	37	78	90	176	44
80	54	15	37	51	77	141	48	99	13	79	101	117	151	55
90	68	18	52	66	90	151	47	104	25	78	107	123	158	54
100	84	16	71	79	107	162	47	110	13	84	113	130	172	54
125	87	45	67	88	108	137	30	95	6	57	102	118	165	45
150	82	29	67	78	106	181	41	66	4	43	64	92	176	49
175	89	56	78	88	100	115	31	58	5	33	58	82	129	42
200	91	28	73	93	106	183	44	69	13	32	70	102	139	53
225	102	22	84	105	116	155	32	89	33	57	88	124	175	45
Дно	87	17	49	92	113	193	33	108	13	80	106	138	181	40
					Ст. BY 29									
100	69	14	40	72	93	118	34	51	17	28	51	72	118	14
125	73	14	45	77	95	126	32	34	23	28	31	49	104	13
150	67	19	42	65	96	129	32	34	11	25	33	46	94	13
Дно	63	6	39	62	88	135	34	41	22	32	40	51	59	12

Таблица 14.8

Многолетние статистические характеристики концентрации общего азота (мкг/л) в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
Ст. BY 5														
60	270	160	240	250	290	490	43	260	180	210	270	310	320	13
70	300	170	270	290	340	420	41	310	220	290	310	340	560	11
80	300	160	270	300	320	660	43	310	190	280	320	330	330	12
Дно	320	120	260	310	360	780	45	380	170	310	380	440	500	9
Ст. BY 15														
60	240	170	210	240	290	330	14	270	110	250	280	300	420	63
70	230	170	190	240	260	350	17	280	140	250	290	310	370	34
80	260	180	230	260	280	390	17	290	140	260	300	320	380	41
90	280	230	250	280	310	420	16	310	181	270	310	340	370	33
100	290	120	250	390	320	450	18	310	200	280	310	330	390	34
125	270	190	230	260	320	340	12	280	180	230	270	340	630	35
150	270	170	240	280	300	480	16	260	160	230	260	300	340	33
175	280	220	250	270	320	320	12	270	170	220	270	330	400	31
200	280	150	240	270	330	470	17	300	150	240	310	360	450	35
225	300	190	250	300	330	380	15	380	180	300	390	460		66
Дно	280	110	210	270	380	690	15	390	200	310	390	470		30
Ст. BY 29														
80	270	110	230	280	310	570	25	280	200	250	290	300	330	8
100	280	180	250	280	300	570	24	240	190	230	240	270	310	9
125	290	140	250	290	320	390	25	230	190	220	230	260	320	9
150	270	90	220	280	290	340	25	250	170	230	240	260	270	8
Дно	280	90	230	280	330	540	29	240	170	200	240	260	280	8

Таблица 14.9

Многолетние статистические характеристики [числитель — трехсредние, знаменатель — $(x_{0,25}—x_{0,75})$] концентраций органического азота и его процентного содержания в сумме общего азота при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия	Анаэробные условия	Аэробные условия	Анаэробные условия
	$N_{орг}$ мкг/л	$N_{орг}$ %	$N_{орг}$ мкг/л	$N_{орг}$ %
Ст. BY 15				
60	210 170—240	210 180—240	87 80—91	81 75—86
70	200 170—220	200 170—240	84 74—92	73 69—80
80	190 160—220	190 160—210	76 64—86	63 60—68
90	200 160—240	190 170—210	72 63—81	62 59—67
100	180 140—200	200 180—210	67 60—72	62 55—68
125	150 140—180	190 170—210	61 54—66	65 59—72

Продолжение табл. 14.9

Горизонт, м	Аэробные условия	Анаэробные условия	Аэробные условия	Анаэробные условия
	$N_{орг}$ мкг/л	$N_{орг}$ %	$N_{орг}$ мкг/л	$N_{орг}$ %
150	180 140—200	200 170—210	65 58—74	74 68—81
175	180 150—200	220 190—260	63 58—66	77 72—83
200	180 140—210	220 180—260	64 60—71	73 68—84
225	200 180—210	240 200—290	67 62—74	72 66—79
Дно	210 160—300	280 220—320	76 60—90	70 66—47
Ст. BY 29				
100	200 170—240	190 170—220	73 62—84	79 69—88
125	210 180—250	200 190—210	73 63—82	84 79—88
150	190 170—220	190 170—210	74 62—86	84 80—88
Дно	210 170—270	190 180—210	76 62—84	82 80—84

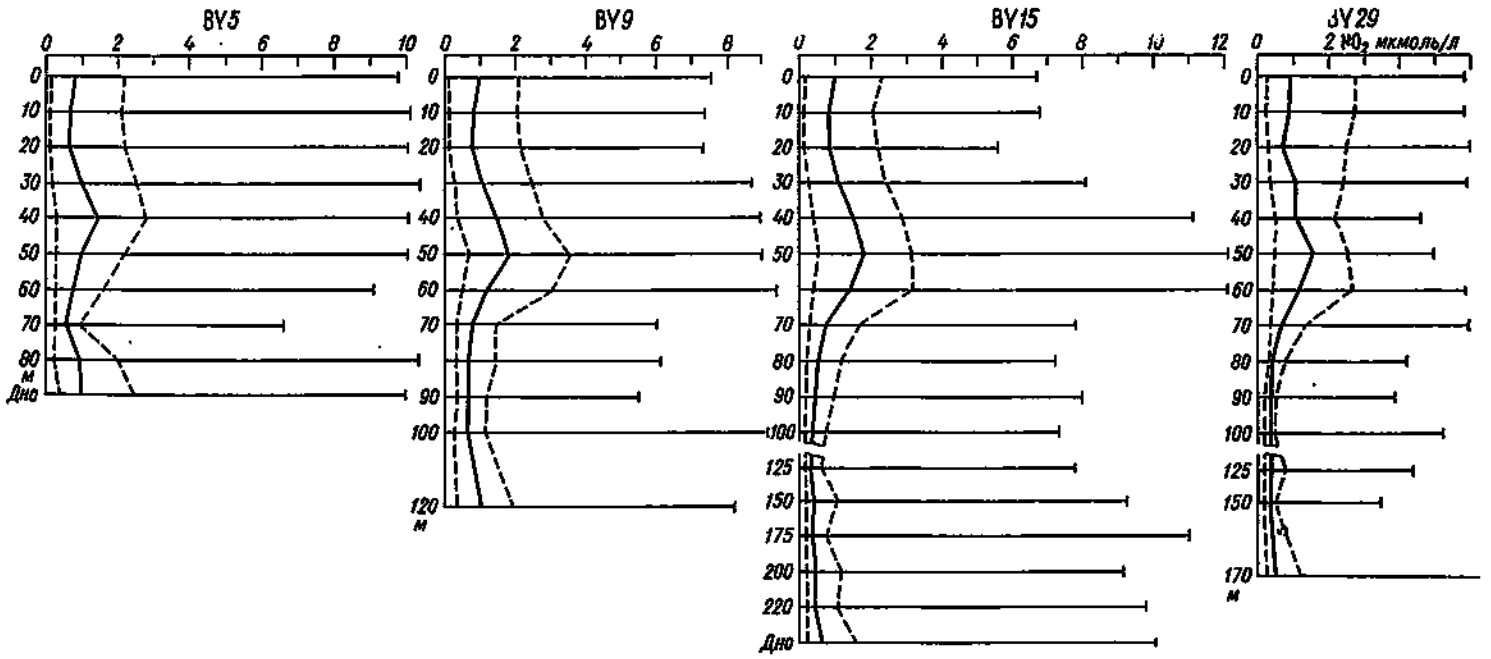


Рис. 14.25. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций нитритов в толще вод Борнхольмской впадины (ст. BY 5), юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), Готландской впадины (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29).

жениях; адсорбция усиливается с увеличением концентрации фосфатов и понижается в присутствии органического вещества и с повышением pH.

14.2.1. Динамика содержания фосфора в верхнем слое

Динамика содержания фосфора в верхнем слое открытых районов Балтийского моря определяется главным образом соотношением продукционно-деструкционных процессов и характеризуется ярко выраженным сезонным ходом (табл. 14.10—14.13), все основные закономерности которого представлены на рис. 14.26.

В поверхностном слое осенне-зимняя аккумуляция фосфатов осуществляется за счет процессов минерализации органического вещества и транспорта фосфора в виде фосфатов из глубинных слоев, органического фосфора и фосфатов — с речным стоком. Минерализация, по-видимому, имеет большее значение осенью, на что указывают снижение концентраций органического фосфора и незначительные изменения содержания общего фосфора, а транспорт, судя по одновременному возрастанию содержания фосфатов, органического и общего фосфора, играет большую роль зимой.

Начинающаяся весной утилизация биогенов фитопланктоном сначала, при наступлении равенства скоростей аккумуляции и утилизации фосфатов, прерывает возрастание их концентраций и приводит к формированию годового максимума, а затем — к снижению до минимальных летних значений. Концентрация органического фосфора имеет два максимума, обусловленных цветением фитопланктона. Первый из них приходится на весну, второй — на позднее лето — раннюю осень. Эти максимумы разделяет период летних минимальных значений, который связан как с интенсивной седиментацией органического вещества за пределы фотической зоны, на что указывает снижение содержания общего фосфора, так и с процессами минерализации, приводящими к снижению процентного содержания органического фосфора. С разрушением термоклина, затуханием фотосинтеза и наступлением осенне-зимней конвекции годовой цикл замыкается.

Особенностью сезонной динамики фосфора в Балтийском море является возникновение промежуточного максимума содержания фосфатов в июле—августе, вызванное не столько повышеной оборачиваемостью фосфора вследствие экскреции зоопланктона и интенсивной минерализации, сколько недоиспользованием фосфатов фитопланктоном из-за лимитации первичной продукции азотом. Это явление может, по-видимому, стимулировать цветение сине-зеленых водорослей, эффективно использующих «избыток» фосфора благодаря способности удовлетворять свои потребности в азоте за счет фиксации N_2.

Рассмотренные закономерности прослеживаются на всей акватории моря с некоторыми пространственными различиями — продолжительность вегетационного сезона и амплитуды изменений увеличиваются с севера на юг и юго-запад (рис. 14.27—14.32). В Арконской впадине (ст. BY 2) летний промежуточный максимум обнаруживается также и в концентрациях общего и органического фосфора (рис. 14.30*в* и 14.32*в*), что, по-видимому, может быть связано не только с близостью обогащенных придонных вод к поверхностным в этом мелководном районе, но и с активными гидродинамическими процессами, вызванными летней адвекцией вод из Датских проливов (см. п. 10.2.3).

На рис. 14.28, 14.30—14.34 можно проследить вертикальную структуру динамики фосфора в верхнем слое. Истощение запасов фосфора, вызванное весенней утилизацией фосфатов и последующей седиментацией органического вещества, благодаря слабому развитию термоклина в начале лета охватывает практически весь верхний слой вплоть до галоклина. Однако по мере развития термической стратификации аккумуляция фосфатов, начинающаяся в июле на верхней границе галоклина вслед-

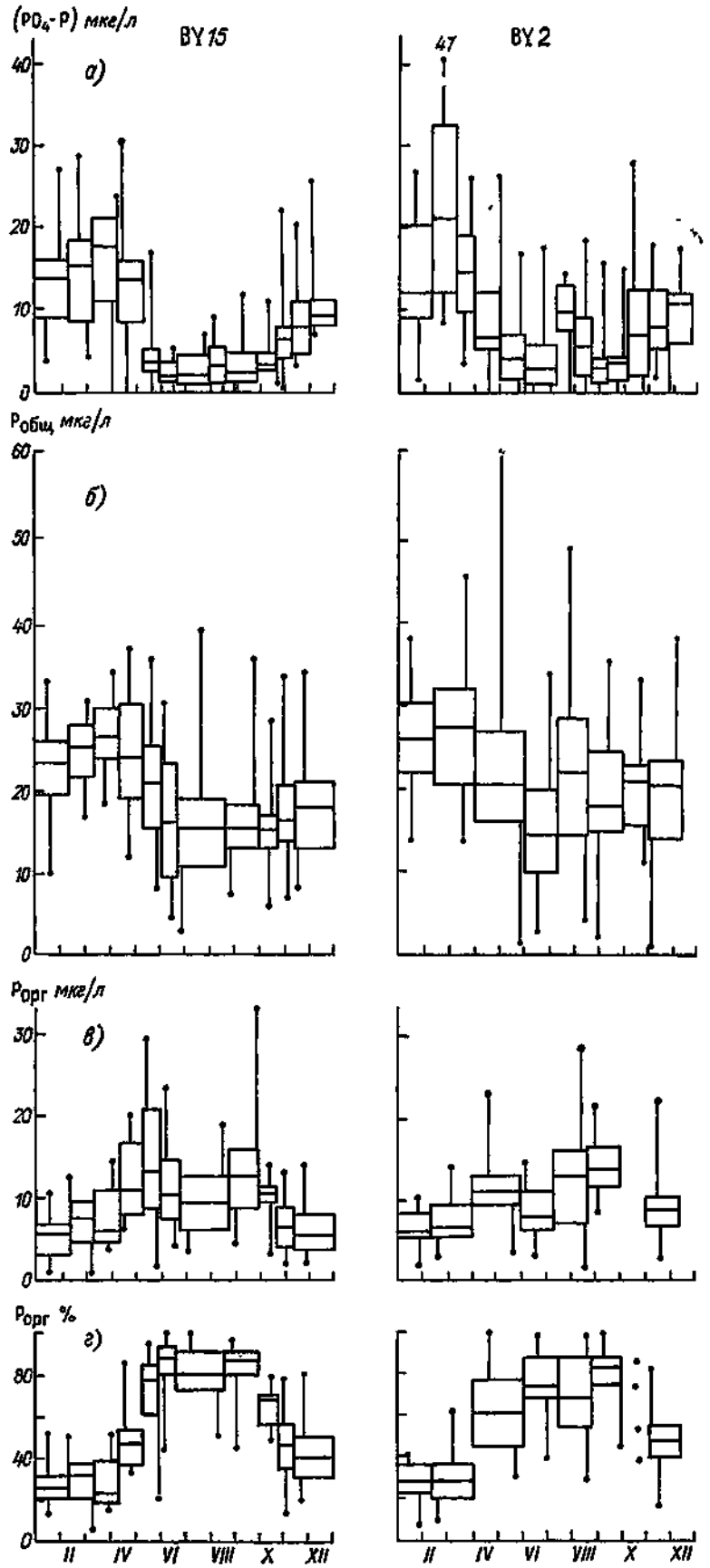


Рис. 14.26. Годовой ход концентраций фосфатов (*а*), общего (*б*) и органического (*в*) фосфора и процентного содержания органического фосфора (*г*) на поверхности центральной части моря (ст. BY 15) и Арконской впадины (ст. BY 2) по данным квартильного анализа.

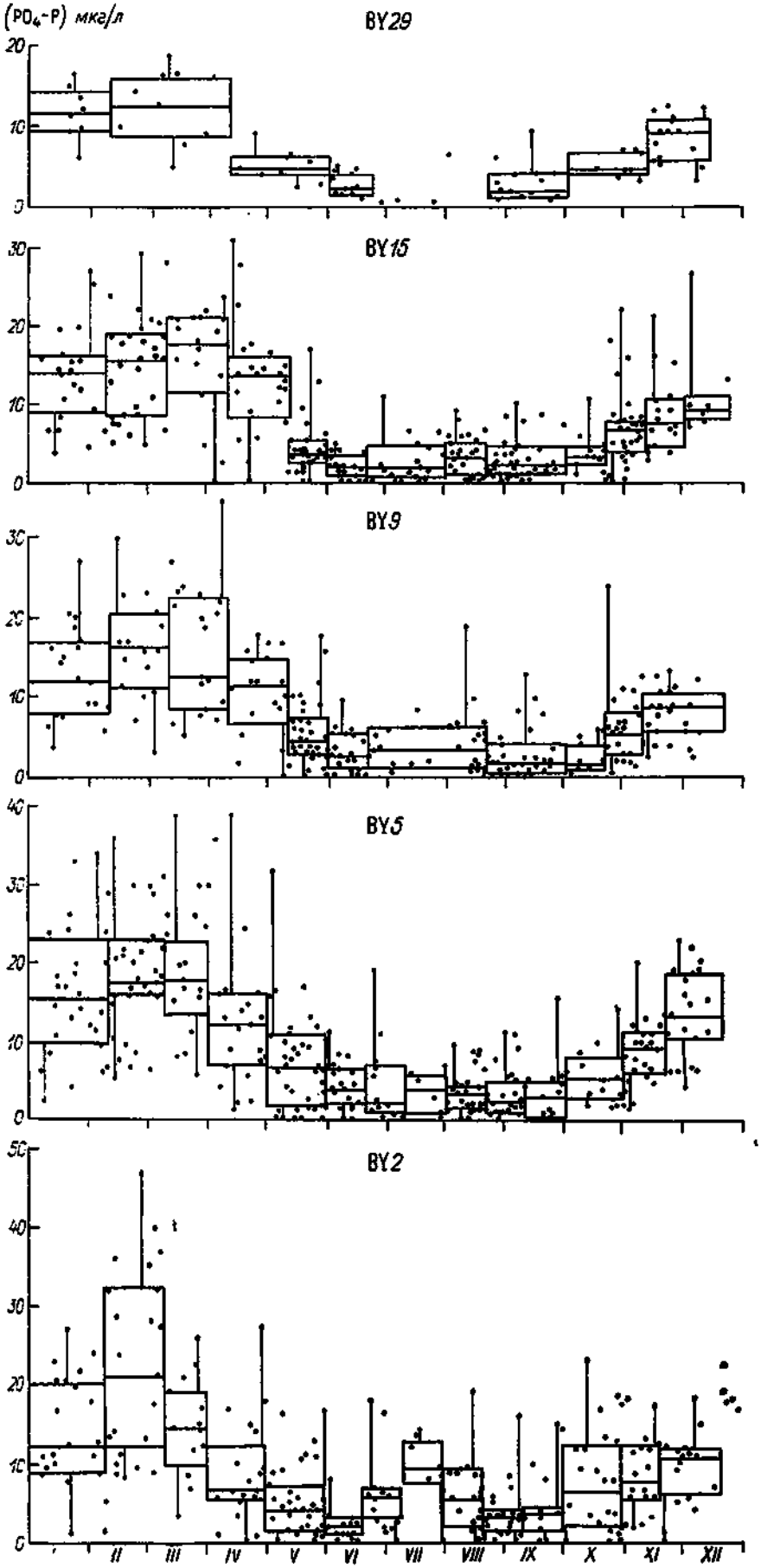


Рис. 14.27. Годовой ход концентраций фосфатов на поверхности восточного продольного разреза по данным квартильного анализа для базовых станций.

Статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — $(x_{0.25}—x_{0.75})$] содержания минерального PO_4, общего $P_{общ}$ и органического $P_{орг}$ фосфора и процентного содержания $P_{орг}$ в сумме общего в верхнем слое Арконской впадины (ст. BY 2) для основных фаз года

Горизонт, м	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$
	мкг/л			%	мкг/л			%
	Начало зимы (1 I—10 II)				Конец зимы (11 II—10 III) *			
	$n=23$	$n=25$	$n=10$	$n=10$	$n=23$	$n=22$	$n=9$	$n=9$
0	13 9,0—20	26 22—30	6,5 5,6—8,4	29 22—36	22 12—32	27 20—32	7,0 5,6—9,6	28 20—35
10	13 9,6—20	26 20—34	7,4 5,4—10	34 24—40	22 14—33	29 23—34	6,9 5,0—9,6	28 22—34
20	14 8,7—22	26 21—32	8,0 6,5—9,8	35 28—52	22 14—33	30 26—35	6,5 4,6—7,7	26 20—32
30	16 12—21	28 21—34	6,9 5,8—9,4	32 23—46	24 18—35	29 24—34	6,4 5,6—6,8	25 20—28
40	25 19—30	35 27—40	7,3 5,4—9,8	23 16—32	29 22—42	35 31—41	7,7 5,6—12	23 17—27
Дно	32 29—35	46 39—55	12 6,8—19	24 18—29	38 30—52	38 31—44	16 7,1—38	24 19—29
	Ранняя весна (11—31 III)				Фаза вспышки (1 IV—31 V) **			
	$n=12$	$n=22$	$n=9$	$n=9$	$n=19$	$n=43$	$n=24$	$n=24$
0	14 10—19	27 20—32	7,0 5,6—9,6	28 20—35	7,8 5,4—12	21 16—27	11 9,4—13	62 45—77
10	14 9,6—18	29 23—34	6,9 5,0—9,6	28 22—34	7,5 4,0—14	22 17—28	13 10—16	70 51—82
20	15 9,3—18	30 26—35	6,5 4,6—7,7	26 20—32	8,4 4,2—16	19 16—23	9,8 8,2—11	59 47—68
30	15 9,6—20	29 24—34	6,4 5,6—6,8	25 20—28	9,7 5,2—17	21 17—24	9,8 8,3—12	57 38—68
40	20 14—24	35 31—41	7,7 5,6—12	23 17—27	15 5,6—26	31 21—40	11 8,4—14	47 32—65
Дно	21 11—28	38 31—44	16 7,1—38	24 19—29	22 16—31	48 37—61	24 14—34	46 32—55
	Начало лета (1 VI—10 VII)				Пик лета (11 VII—20 VIII)***			
	$n=25$	$n=32$	$n=17$	$n=17$	$n=30$	$n=32$	$n=14$	$n=14$
0	3,2 1,2—5,8	15 9,8—20	8,1 6,2—11	77 68—88	5,6 2,1—9,2	22 15—28	12 7,1—16	71 55—89
10	2,2 0,6—5,0	14 8,7—22	7,7 5,9—9,6	79 55—93	4,6 1,8—9,2	20 15—26	12 7,1—14	75 63—88
20	3,6 1,2—7,2	15 9,3—21	6,1 4,3—8,7	65 52—79	8,9 3,7—15	22 16—29	12 8,8—15	66 44—82
30	6,4 1,8—11	19 11,8—27	6,8 5,0—8,0	50 40—58	14 7,9—21	29 23—38	9,1 7,4—11	40 26—57
40	12 6,8—18	26 17—37	6,2 2,8—10	33 21—40	25 18—33	35 27—45	7,8 6,2—10	26 20—30
Дно	20 14—24	33 22—43	7,4 3,8—14	26 16—34	37 24—47	49 39—57	7,6 3,2—14	14 7—26
	Конец лета (21 VIII—30 IX)****				Начало осени (1—31 X)			
	$n=11$	$n=28$	$n=18$	$n=18$	$n=24$	$n=15$	$n=4$	$n=4$
0	3,3 1,5—4,3	19 15—25	14 12—16	83 77—88	7,0 2,2—12	20 15—23	16 11—20	63 46—80
10	4,0 2,5—5,3	18 13—24	12 9,6—15	77 62—89	4,8 2,7—9,0	21 18—25	11 9,4—12	68 44—76
20	6,8 4,0—13	19 15—26	10 7,2—13	57 43—75	6,5 3,7—11	22 17—26	9,9 8,1—11	61 43—70
30	16 9,6—29	24 19—30	8,6 6,8—12	36 26—51	11 6,2—16	26 17—33	8,0 7,5—8,7	49 43—63
40	32 21—46	38 30—48	8,2 5,6—11	27 17—32	22 16—28	37 28—43	9,1 8,4—11	27 24—28
Дно	64 40—87	51 44—60	8,3 4,7—13	17 13—21	37 30—50	55 45—63	9,1 7,7—12	18 12—20

Продолжение табл. 14.10

Горизонт, м	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$
	мкг/л			%	мкг/л			%
	Середина осени (1—20 XI)				Конец осени — начало зимы (21 XI—20 XII)*****			
	$n=18$	$n=27$	$n=17$	—	$n=16$	—	—	—
0	8,4 5,6—12	20 14—24	8,4 6,2—9,9	—	10 6,3—12	—	—	—
10	8,9 5,6—12	19 15—24	8,3 6,5—9,9	—	11 9,0—12	—	—	—
20	9,8 5,9—13	21 16—24	8,0 5,6—9,6	—	12 10—14	—	—	—
30	12 7,7—15	21 17—26	7,2 4,6—11	—	14 11—19	—	—	—
40	24 20—31	32 24—38	7,0 5,0—9,0	—	28 22—32	—	—	—
Дно	52 30—86	58 40—82	17 8,1—31	—	40 34—48	—	—	—

* Данные для $P_{общ}$, $P_{орг}$ и процентного содержания $P_{орг}$ объединены для периодов 1 II—10 III и 11—31 III.
** Для PO_4 период 1—30 IV.
*** Для PO_4 период 1—20 VIII.
**** Для PO_4 период 11—30 IX.
***** Данные для $P_{общ}$, $P_{орг}$ и процентного содержания $P_{орг}$ объединены для периодов 1—20 XI и 21 XI—20 XII.

Таблица 14.11

Статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — $(x_{0,25}—x_{0,75})$] содержания минерального PO_4, общего $P_{общ}$ и органического $P_{орг}$ фосфора и процентного содержания $P_{орг}$ в сумме общего в верхнем слое Борнхольмской впадины (ст. BY 5) для основных фаз года

Горизонт, м	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$
	мкг/л			%	мкг/л			%
	Начало зимы (1 I—10 II)				Конец зимы (11 II—31 III)*			
	$n=30$	$n=20$	$n=16$	$n=16$	$n=16$	$n=24$	$n=17$	$n=17$
0	16 10—23	25 20—31	5,4 4,4—7,0	24 16—36	18 13—23	28 22—34	6,4 4,0—9,6	24 12—32
10	16 10—22	26 21—29	6,9 5,6—8,7	29 22—36	19 12—23	28 24—32	5,6 3,5—7,1	20 11—28
20	16 10—21	24 16—31	6,0 3,4—8,2	25 17—36	18 13—23	28 24—34	5,7 3,8—7,1	22 12—28
30	16 9,8—22	24 17—32	7,1 4,4—9,2	29 22—38	18 11—22	28 26—32	5,7 3,4—7,5	21 9—28
40	16 9,8—23	26 21—33	7,6 5,8—9,0	32 26—37	17 11—22	30 25—38	5,8 4,4—7,0	21 16—28
50	21 14—27	30 25—34	8,2 4,8—10	27 24—31	22 16—29	32 26—39	5,5 4,0—7,4	17 12—21
60	33 23—42	42 31—57	7,8 5,0—10	17 10—24	31 23—37	46 34—58	4,7 3,8—6,0	11 7—13
	Ранняя весна (1—30 IV)				Фаза вспышки (1—31 V)			
	$n=23$	$n=13$	$n=9$	$n=9$	$n=39$	$n=19$	$n=15$	$n=15$
0	12 7,4—16	25 21—30	11 8,0—15	47 25—65	6,6 2,0—11	21 17—27	12 8,0—15	62 47—76
10	12 7,1—18	25 22—30	10 6,1—14	42 20—55	6,8 2,9—10	22 19—24	13 9,6—16	60 45—70
20	12 6,6—17	23 18—30	9,6 6,7—12	45 22—60	7,6 2,2—12	22 18—25	11 9,0—13	52 37—72
30	13 8,4—17	27 18—32	8,4 5,6—14	30 16—64	8,4 4,0—12	20 17—23	8,8 6,8—11	46 34—64
40	15 10—21	26 16—33	7,6 3,8—11	31 15—47	9,4 5,6—14	22 18—27	9,4 7,1—11	45 31—61
50	20 12—32	29 20—37	5,4 2,4—8,5	19 8—30	15 9,9—22	26 20—33	9,0 7,0—10	37 26—49
60	32 26—39	38 33—48	4,3 1,8—7,4	13 4—21	20 13—27	35 31—42	9,6 7,0—11	29 20—34

Горизонт, м	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$
	мкг/л			%	мкг/л			%
	Начало лета (1 VI—10 VII)**				Пик лета (11 VII—20 VIII)***			
	$n=22$	$n=37$	$n=23$	$n=23$	$n=25$	$n=19$	$n=10$	$n=10$
0	4,0 1,9—6,5	16 13—20	9,2 5,4—13	71 56—88	3,2 1,8—4,3	14 11—19	1.1 9,0—14	81 64—90
10	4,1 2,8—6,2	14 12—17	8,5 5,9—12	69 56—84	3,4 1,8—5,6	14 12—18	11 8,6—12	79 60—93
20	5,7 3,6—7,6	16 12—18	8,0 5,8—11	60 47—76	4,0 1,5—7,9	16 11—20	8,7 4,6—11	71 41—91
30	6,1 4,0—8,1	15 11—20	7,0 5,4—9,2	50 42—65	7,4 4,3—10	19 16—23	9,7 5,9—13	55 40—72
40	7,8 5,3—9,9	17 11—24	6,1 3,6—8,8	41 30—50	9,1 4,4—12	19 16—24	8,8 6,8—11	47 37—62
50	14 7,8—19	24 15—32	5,9 4,0—9,3	30 19—41	16 10—20	27 23—35	8,8 5,0—14	30 19—37
60	20 13—26	31 22—36	7,6 4,7—10	25 20—31	18 11—23	31 26—40	8,0 4,9—13	25 15—32
	Конец лета (21 VIII—30 IX)****				Начало осени (1—31 X)			
	$n=12$	$n=30$	$n=19$	$n=19$	$n=17$	$n=10$	$n=4$	$n=4$
0	3,0 0,6—5,0	15 11—18	12 10—15	84 78—90	5,2 2,8—8,1	14 12—16	9,0 7,4—12	72 68—74
10	2,8 0,2—5,0	13 10—16	10 7,5—13	79 72—87	3,8 1,4—7,2	12 10—14	9,2 7,2—12	73 64—78
20	4,1 1,1—7,0	14 10—17	10 8,4—12	78 70—88	3,3 1,3—6,3	13 11—16	8,8 7,1—9,9	72 64—76
30	6,6 2,0—14	16 13—20	8,4 6,0—11	60 43—74	5,8 2,5—8,8	15 13—20	8,8 7,0—11	57 47—74
40	16 9,8—21	22 18—25	6,8 4,0—9,6	35 24—46	11 4,8—18	23 20—27	6,5 5,0—8,0	27 21—30
50	19 14—24	27 21—36	7,2 5,1—9,6	27 22—34	23 15—29	32 27—34	6,6 4,8—8,4	26 20—31
60	33 26—44	36 27—47	7,4 3,8—10	21 12—29	27 18—36	44 39—50	6,8 5,8—7,7	22 19—25
	Середина осени (1—20 XI)				Осень — начало зимы (21 XI—20 XII)			
	$n=25$	$n=19$	$n=14$	$n=14$	$n=21$	$n=14$	$n=12$	$n=12$
0	8,8 6,8—11	17 13—22	6,5 5,0—8,0	42 28—49	14 10—19	21 18—24	7,4 6,0—9,6	33 24—41
10	8,2 5,1—11	19 15—23	7,6 5,6—9,3	45 35—58	14 9,3—17	21 18—24	8,2 7,0—9,5	36 30—46
20	8,6 5,9—12	17 14—19	6,4 5,0—8,0	42 29—58	12 7,0—16	21 19—25	7,9 6,9—9,2	35 26—45
30	8,2 6,9—10	17 14—20	8,1 5,5—9,8	47 40—56	12 6,2—16	20 18—22	6,7 4,0—9,3	35 20—46
40	9,3 6,2—13	19 16—22	7,7 3,7—11	45 22—56	12 8,8—18	20 18—23	6,8 5,8—7,7	34 29—39
50	22 13—29	32 22—41	6,9 4,7—9,4	24 12—43	22 19—27	30 26—34	6,6 5,3—8,0	23 16—27
60	34 28—40	43 39—50	5,4 4,3—7,1	14 10—20	37 32—45	47 43—51	3,7 1,8—4,9	8 3—12

* Для PO_4 период 11—31 III.
** Для PO_4 период 1—20 VI.
*** Для PO_4 период 1—20 VIII.
**** Для PO_4 период 1—30 IX.

Статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — $(x_{0,25}—x_{0,75})$] содержания минерального PO_4, общего $P_{общ}$ и органического $P_{орг}$ фосфора и процентного содержания $P_{орг}$ в сумме общего в верхнем слое Готландской впадины (ст. BY 15) для основных фаз года

Горизонт, м	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$
	мкг/л			%	мкг/л			%
	Начало зимы (1 I—10 II)				Конец зимы (11 III—10 IV)			
	$n=23$	$n=23$	$n=14$	$n=14$	$n=18$	$n=14$	$n=8$	$n=8$
0	13 9,0—16	23 20—26	5,6 3,4—6,8	25 20—31	17 11—21	26 24—30	7,0 5,0—11	25 19—38
10	13 7,9—16	23 19—26	6,0 4,6—7,4	26 23—30	16 9,9—21	25 21—28	4,8 4,2—5,4	21 15—26
20	11 7,4—15	23 18—26	5,4 3,4—8,0	28 19—37	15 8,7—21	25 21—28	5,7 4,6—6,7	24 20—29
30	11 7,6—16	23 20—25	5,2 3,0—8,8	28 18—40	15 10—20	25 21—28	5,8 4,9—6,5	24 22—26
40	14 9,4—20	24 20—27	5,7 3,4—8,0	26 19—32	17,0 12—21	25 21—28	5,8 4,7—7,4	24 19—29
50	12 8,5—16	22 16—25	7,3 4,8—9,6	33 28—40	15 8,7—21	24 23—25	4,7 4,2—5,2	20 17—23
60	18 13—22	26 20—30	5,7 3,8—8,8	24 15—34	20 16—24	27 24—33	4,8 3,7—5,9	18 14—22
	Ранняя весна (1 IV—10 V)				Фаза вспышки (11—31 V)			
	$n=24$	$n=23$	$n=10$	$n=10$	$n=30$	$n=28$	$n=16$	$n=16$
0	13 8,2—16	24 19—31	12 8,0—17	45 36—53	3,6 2,5—5,1	21 16—26	14 8,8—21	74 60—84
10	13 8,4—17	24 18—29	12 9,6—16	48 42—54	3,5 2,8—4,5	21 16—26	16 12—19	80 72—87
20	12 7,1—17	22 16—27	11 7,2—14	45 35—58	4,7 3,0—8,1	19 14—23	10 7,6—13	62 50—81
30	13 7,6—17	24 19—29	11 6,8—16	51 34—66	4,7 3,1—7,7	20 17—23	10 7,8—13	60 48—70
40	14 9,0—20	24 20—30	9,1 7,7—11	41 30—53	7,6 4,0—12	21 17—24	9,6 8,0—11	48 40—57
50	16 10—21	23 20—26	6,3 5,0—9,2	32 18—47	11 5,6—17	23 18—26	8,6 5,8—10	42 32—55
60	22 16—29	32 26—36	9,6 5,9—12	30 23—40	22 14—32	33 25—43	9,1 6,2—13,2	28 22—34
	Начало лета (1—20 VI)				Пик лета (1—20 VIII)			
	$n=22$	$n=20$	$n=15$	$n=15$	$n=28$	$n=42$	$n=23$	$n=23$
0	2,1 1,2—3,4	16 9,4—23	11 7,6—14	87 80—92	3,0 1,0—5,2	15 11—19	9.5 6,2—13	81 72—91
10	1,8 0,9—3,4	14 8,7—17	9,8 7,3—13	89 82—95	3,0 0,6—5,6	15 11—20	10 6,4—14	85 74—95
20	2,3 1,1—4,0	12 8,6—17	6,7 5,3—8,6	76 68—86	4,0 1,5—6,5	15 12—20	9,3 6,9—12	82 63—94
30	3,8 1,9—6,7	12 6,5—18	4,8 3,0—7,5	58 91—74	6,0 2,5—9,4	16 12—22	6,8 4,2—9,2	60 46—80
40	6,8 2,5—11	13 9,2—16	6,0 3,9—7,9	51 43—60	9,7 5,2—14	18 13—25	7,6 5,0—12	45 34—55
50	7,7 4,0—10	13 9,4—16	5,6 3,8—7,0	42 35—58	10 5,0—13	17 11—22	6,7 3,1—11	41 26—59
60	14 8,7—20	21 16—27	6,0 4,3—7,8	34 25—44	17 12—22	27 20—33	7,2 5,0—10	27 19—38

Горизонт, м	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$
	мкг/л			%	мкг/л			%
	Конец лета (21 VIII—30 IX)				**Начало осени (1—20 X)**			
	$n=35$	$n=41$	$n=19$	$n=19$	$n=11$	$n=12$	$n=5$	$n=5$
0	2,5 1,2—4,6	16 13—19	12 8,7—16	86 79—90	3,5 2,8—4,9	17 13—17	11 9,9—12	66 56—70
10	2,3 0,9—4,3	14 12—19	11 8,7—14	85 78—93	4,0 2,4—5,0	14 12—18	11 7,4—13	61 56—68
20	3,4 1,4—6,3	15 12—19	11 9,2—13	82 74—88	3,4 2,2—4,8	13 12—15	— —	— —
30	8,4 5,6—12	18 13—23	7,8 5,6—9,5	47 43—52	2,5 1,5—3,6	15 12—18	— —	— —
40	11 8,4—15	20 17—25	7,0 5,0—9,2	34 24—42	9,0 5,3—12	18 16—22	8,8 5,6—12	44 26—62
50	12 8,0—16	22 17—29	7,2 5,8—9,3	36 29—43	11 8,6—14	24 20—27	10 5,4—15	48 28—61
60	18 13—22	27 23—30	6,7 5,0—9,3	27 20—35	19 16—24	33 25—37	7,4 3,8—9,9	27 15—36
	Пик осени (21 X—10 XI)				**Конец осени (11 XI—20 XII)**			
	$n=29$	$n=19$	$n=12$	$n=12$	$n=18$	$n=7$	$n=29$	$n=13$	$n=13$
0	6,2 3,9—7,7	17 14—21	6,6 4,3—9,0	46 35—56	7,7 4,6—11	8,9 8,2—9,4	17 13—21	5,8 4,0—8,0	40 30—50
10	6,3 4,0—8,6	16 16—18	8,1 6,8—9,2	52 44—59	8,2 6,2—11	7,6 6,5—8,6	18 14—21	5,5 4,4—7,7	40 29—51
20	6,8 4,6—8,8	17 14—19	8,4 6,6—10	50 41—59	7,8 7,1—9,0	8,4 6,3—9,3	18 14—21	6,4 3,3—9,8	46 36—60
30	6,5 4,2—8,7	17 15—21	8,7 7,7—9,9	53 49—60	8,5 7,1—12	8,4 6,2—9,4	18 15—22	6,6 3,9—11	45 33—61
40	8,5 5,8—12	18 16—21	7,2 6,5—8,2	43 39—47	9,4 6,2—15	11 7,8—16	18 14—21	6,9 4,4—10	40 30—51
50	12 6,2—19	24 20—27	7,6 4,5—12	37 26—51	11 8,1—17	7,2 6,0—8,7	15 12—19	5,7 4,0—7,2	39 32—49
60	18 12—22	31 26—36	6,4 5,2—8,2	22 16—29	17 11—26	20 9,6—35	28 17—39	7,0 4,8—10	27 18—37

Таблица 14.13

Статистические характеристики [числитель — трехсреднее, знаменатель — $(x_{0,25}—x_{0,75})$] содержания минерального PO_4, общего $P_{общ}$ и органического $P_{орг}$ фосфора и процентного содержания $P_{орг}$ в сумме общего в верхнем слое северной части моря (ст. BY 29)

Горизонт, м	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$
	мг/л			%	мг/л			%
	1-я половина зимы (1 I—10 II)				**2-я половина зимы (11 II—10 IV)**			
	$n=9$	$n=10$	$n=9$	$n=9$	$n=9$	$n=7$	$n=7$	$n=7$
0	12 9,6—15	20 16—22	8,6 4,0—13	38 26—51	13 8,7—16	21 20—22	7,7 5,1—11	35 24—47
10	12 9,3—14	20 15—23	6,0 3,1—9,0	34 23—40	12 11—14	21 19—24	7,5 5,6—8,7	34 30—41
20	13 11—14	19 14—23	6,0 3,1—8,4	36 28—42	12 10—14	22 20—24	7,4 5,6—10	36 29—44
30	12 9,9—14	19 13—22	7,4 3,4—9,9	36 26—46	12 9,9—15	20 16—24	5,1 3,8—7,2	26 19—33
40	12 10—14	20 15—24	7,1 3,1—9,0	39 23—52	12 10—14	21 18—26	6,5 5,0—8,2	32 23—38
50	13 10—14	20 14—23	5,2 2,1—9,0	27 20—40	13 11—15	20 17—26	5,3 3,4—7,7	23 19—33
60	14 12—15	22 16—27	6,2 3,4—11	34 14—47	15 13—17	21 19—26	6,8 4,8—9,3	31 21—38

Продолжение табл. 14.13

Горизонт, м	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$	PO_4	$P_{общ}$	$P_{орг}$	$P_{орг}$
	мг/л			%	мг/л			%
	Весна (11 IV—31 V)				**Начало лета (1—20 VI)**			
	$n=10$	$n=8$	$n=8$	$n=8$	$n=12$	$n=10$	$n=9$	$n=9$
0	4,9 4,0—5,9	18 15—21	14 11—17	75 69—82	2,3 1,5—4,0	11 8,4—15	9,0 6,9—11	81 73—85
10	4,2 3,6—5,2	19 16—21	15 12—18	78 71—81	2,0 0,9—3,6	12 11—13	9,6 8,6—11	85 73—93
20	4,9 4,2—5,6	15 13—17	10 7,2—13	65 55—76	4,1 1,9—5,8	10 8,4—13	6,1 3,1—9,0	60 43—73
30	5,1 3,7—6,2	16 12—19	9,8 6,8—13	64 51—73	5,4 3,4—7,0	12 9,3—13	6,4 3,7—11	53 40—68
40	8,0 5,8—9,9	19 16—22	9,0 6,4—11	45 36—54	7,2 3,9—11	14 8,1—17	6,8 4,1—8,3	51 39—67
50	9,8 7,8—12	20 17—23	9,2 7,2—11	42 36—54	11 7,0—16	18 15—22	4,8 3,4—7,2	32 28—43
60	15 10—19	24 20—29	9,4 8,0—11	34 26—45	24 12—42	25 19—41	3,5 0,0—6,2	9 0—13
	Конец лета (21 VIII—30 IX)				**I-я половина осени (1 X—10 XI)**			
	$n=15$	$n=13$	$n=12$	$n=12$	$n=8$	$n=6$	$n=6$	$n=6$
0	2,2 1,2—4,0	13 10—15	11 7,2—14	86 81—91	4,9 4,0—6,8	13 11—15	7,4 5,3—9,0	56 43—71
10	1,9 1,0—2,6	12 11—13	10 9,0—12	85 80—91	4,6 3,6—6,4	12 9,3—15	7,3 5,9—8,4	57 51—63
20	2,6 1,2—4,2	11 8,7—13	8,8 4,4—13	74 58—85	4,4 3,4—6,6	12 9,9—14	6,9 5,9—8,3	54 46—63
30	6,5 4,6—9,4	14 9,9—20	7,2 4,5—12	50 45—56	5,3 3,0—6,6	13 11—16	6,7 5,0—7,7	52 49—57
40	9,0 5,6—13	17 13—23	7,8 6,4—8,8	44 36—51	7,6 3,1—13	18 14—21	6,3 4,1—9,3	42 20—56
50	13 9,2—15	18 13—22	6,3 4,6—8,1	33 28—38	17 8,7—26	30 28—34	5,4 4,9—6,2	18 16—22
60	19 14—24	27 24—32	5,9 1,8—9,0	22 8,0—29	37 21—61	59 48—70	6,4 2,2—8,1	10 8,6—12
	2-я половина осени (11 XI—10 XII)							
	$n=16$	$n=10$	$n=10$	$n=10$				
0	9,1 5,8—12	14 13—16	5,4 3,1—8,0	38 24—58				
10	8,2 5,9—9,8	15 13—16	6,9 4,9—9,6	46 32—61				
20	8,0 5,1—9,6	15 13—18	7,2 5,2—9,9	48 30—65				
30	7,6 5,9—9,6	15 12—17	7,8 6,2—10	48 34—61				
40	8,1 6,0—9,8	15 13—17	7,4 5,9—10	48 34—62				
50	10 7,9—14	17 12—21	6,2 4,0—9,9	36 23—51				
60	20 9,6—27	31 22—39	12 6,5—24	33 20—51				

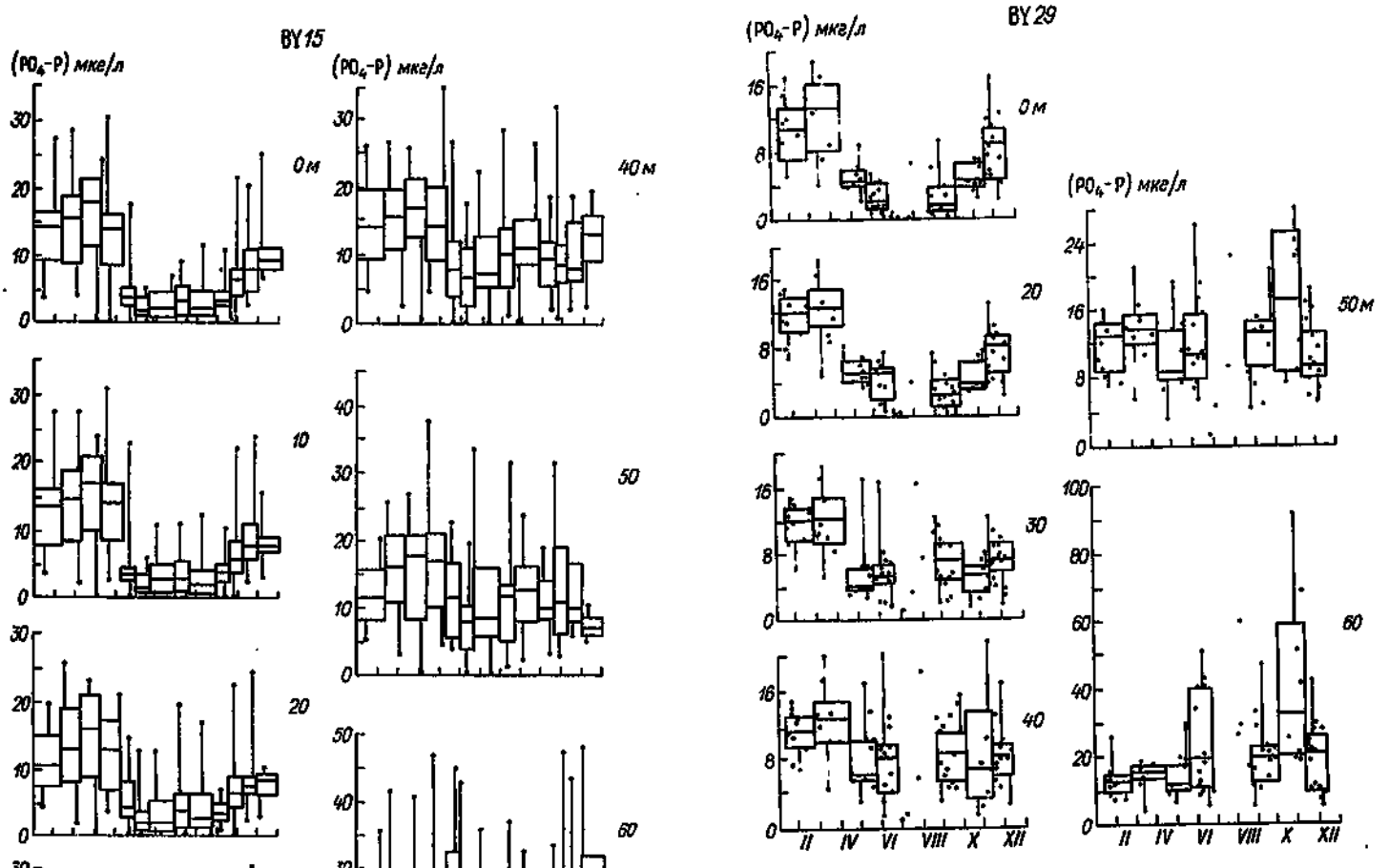


Рис. 14.28. Годовой ход концентраций фосфатов на стандартных горизонтах верхнего слоя Готландской впадины (ст. BY 15), северной части моря (ст. BY 29) и Арконской впадины (ст. BY 2) по данным квартильного анализа.

ствие усиления процессов минерализации оседающего легкоокисляемого органического вещества, охватывает весь холодный промежуточный слой. Кратковременное снижение концентраций в этом слое происходит лишь с развитием осенне-зимней конвекции вследствие смешения его вод с поверхностными обедненными водами.

Рассмотренные выше закономерности внутригодовых изменений происходят на фоне заметной синоптической и межгодовой изменчивости.

Анализ имеющихся в информационной базе данных серии многосуточных станций, полученных в Готландской впадине в 1969—1970 гг. при проведении Международного года Балтики, показывает (рис. 14.35), что в периоды медленных или незначительных изменений (зимой и летом) отношение интерквартильного расстояния к медиане (аналог коэффициента вариации) не превышает, как правило, 25 %, тогда как в переходный весенний период направленных изменений его значения достигают сотен процентов. Эти же данные позволяют продемонстрировать существенные межгодовые изменения как сроков наступления весеннего цветения, так и концентраций фосфатов, при которых оно проходит (ср. графики для апрелей 1969 и 1970 гг. на рис. 14.35).

На рис. 14.36 приведены данные годовых серий систематических наблюдений за динамикой общего фосфора, проведенных БалтНИИРХом в Готландской впадине. Хорошо видно, что на поверхности моря выявленная выше форма годового хода общего фосфора с максимумом в конце зимы и летним минимумом реализуется далеко не всегда. По мнению Юрковского [117], это может быть связано с изменениями концентраций органического вещества, обусловленными значительным влиянием речного стока. Уже на горизонте 10 м годовой ход общего фосфора близок к выявленному статистически (см. рис. 14.26).

Межгодовые и многолетние изменения запасов фосфатов прослеживаются и по данным измерений, выполненных на поверхности моря зимой, во время максимального ослабления утилизации биогенов водорослями (рис. 14.37). Как показывает элементарное обобщение данных этих наблюдений (рис. 14.38), распределение фосфатов на поверхности моря в общем отвечает существующим представлениям об источниках их поступления в море извне. На рубеже 60-х — 70-х годов минимальные концентрации отмечались на акватории восточной части Готландской впадины. Однако с течением времени на фоне общего увеличения концентраций (см. также п. 15.2) произошло существенное перераспределение зон повышенных и пониженных значений — концентрации на севере и северо-западе моря оказались заметно ниже, чем на юге и юго-западе, что, по-видимому, связано с принятием дей-

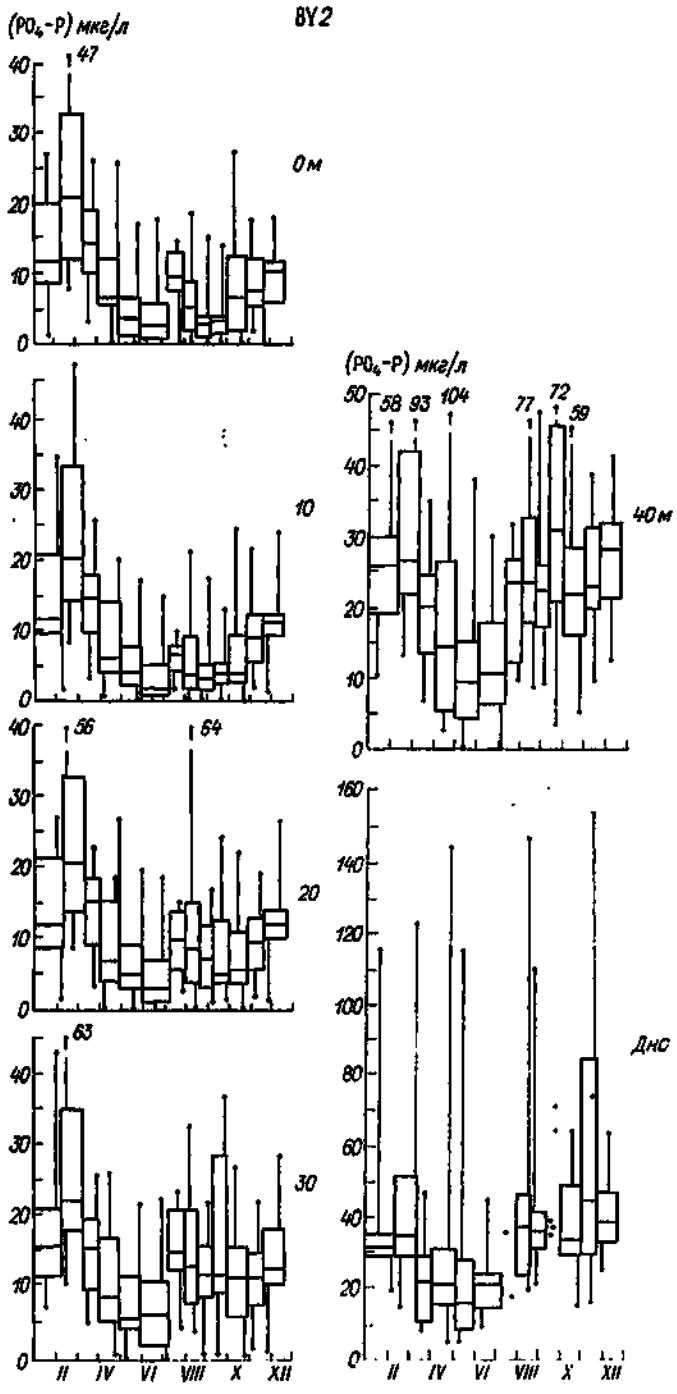


Рис. 14.28.

ственных мер по очистке сточных вод в Швеции и Финляндии.

14.2.2. Динамика содержания фосфора в глубинном слое

Отличительной чертой гидрохимического режима фосфора в глубинном слое Балтийского моря является спорадическая смена аэробных и анаэробных условий в придонных водах, обусловленная комплексом гидродинамических процессов водообмена через Датские проливы и последующего распространения североморских вод (см. п. 10.3). Инициированные этой сменой специфические процессы физико-химического соосаждения (или десорбции) фосфатов в водной толще и на поверхности донных отложений, так же как и связанные с нею (вслед-

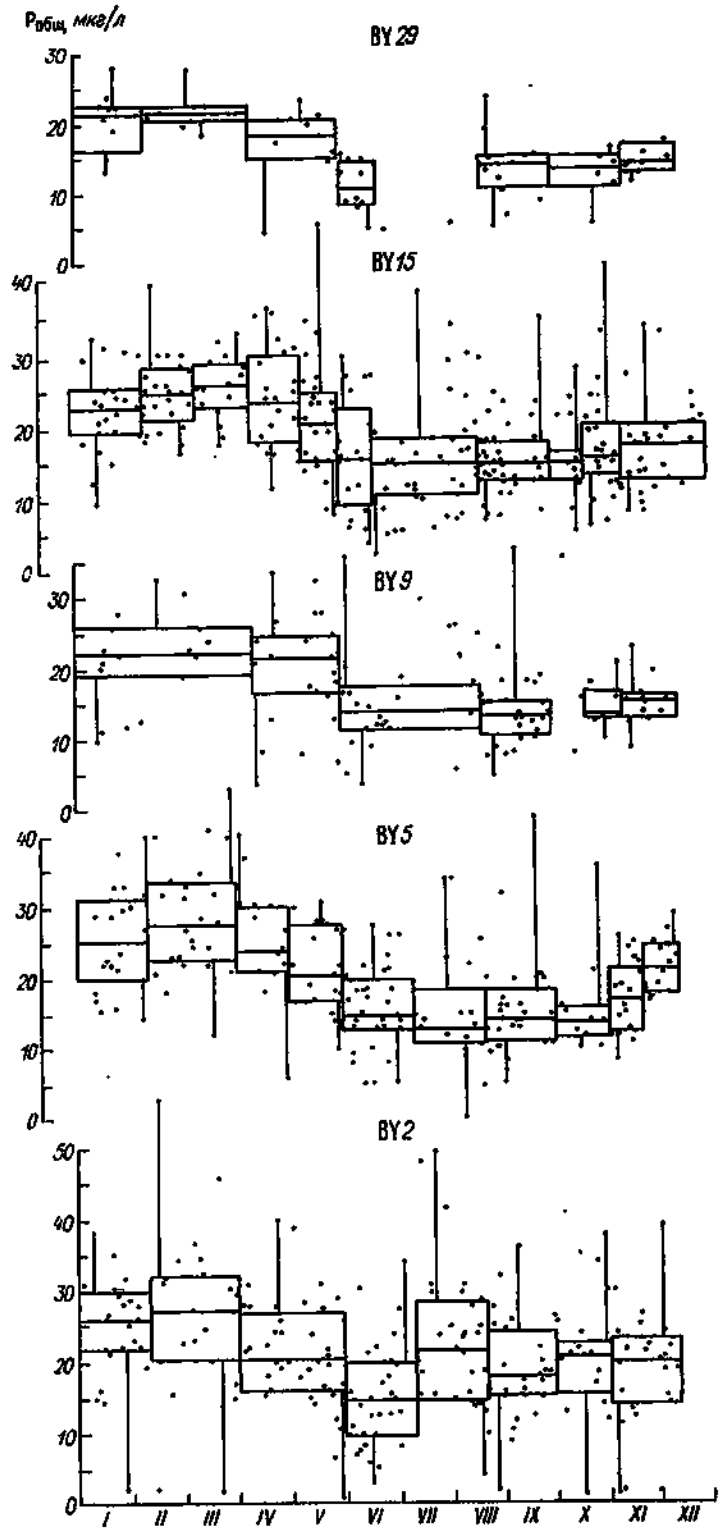


Рис. 14.29. Годовой ход концентраций общего фосфора на поверхности восточного продольного разреза по данным квартильного анализа для базовых станций.

ствие усиления или ослабления гидродинамической активности) и стимулированные ею (благодаря увеличению или уменьшению градиентов пространственного распределения) изменения условий транспорта соединений фосфора, протекают в межгодовом масштабе времени и разворачиваются на фоне процессов, обусловленных сезонной ритмикой и многолетними тенденциями. Результаты взаимодействия разномасштабных процессов по-разному про-

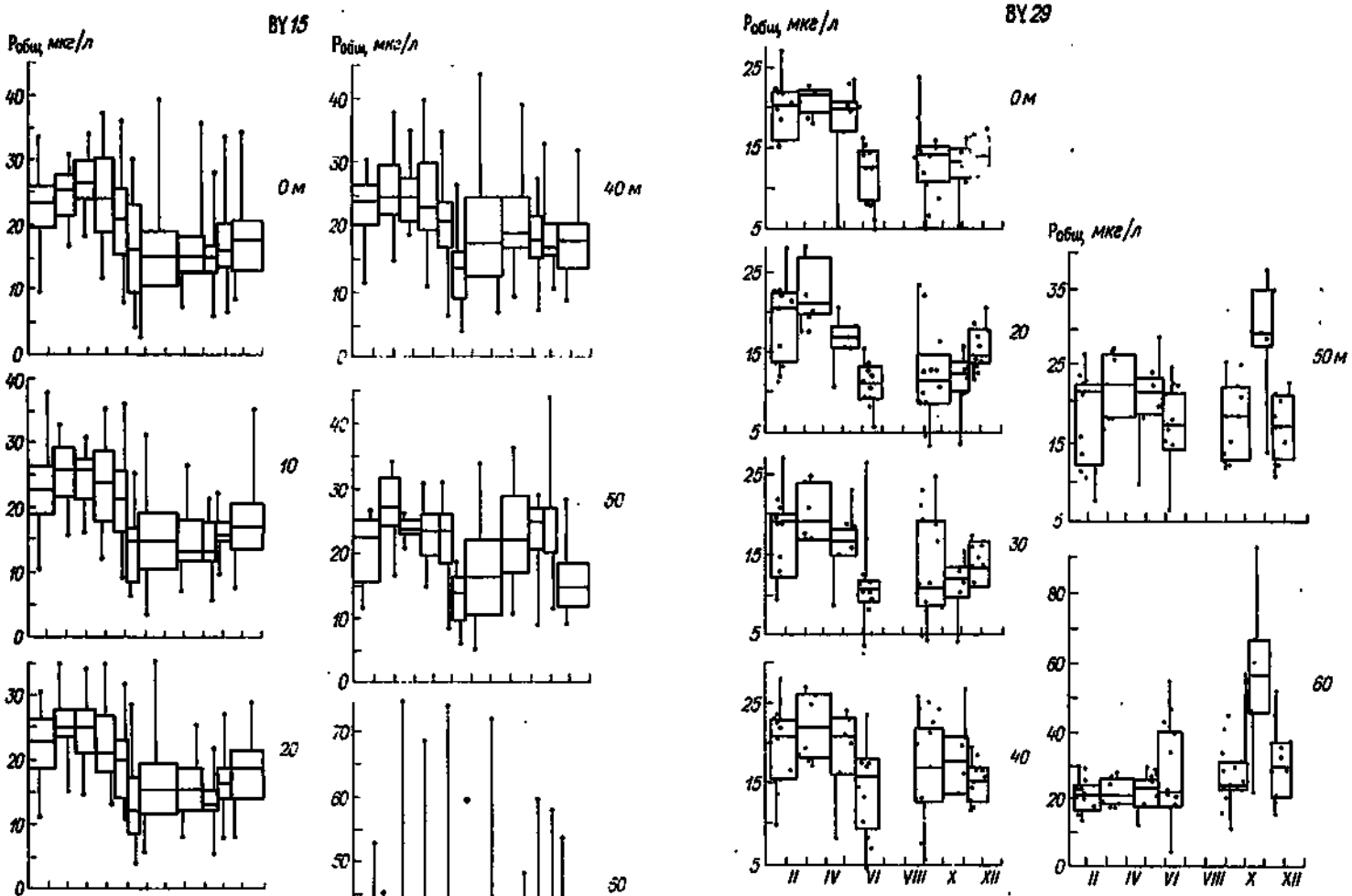


Рис. 14.30. Годовой ход концентраций общего фосфора на стандартных горизонтах верхнего слоя Готландской впадины (ст. BY 15), северной части моря (ст. BY 29) и Арконской впадины (ст. BY 2) по данным квартильного анализа.

являются в активном глубинном и придонном слоях моря.

Заметим, однако, что при любых условиях доминирующей формой фосфора в глубинном слое является минеральная. а содержание органического фосфора не превышает 5—15 мкг/л, доходя до 15 % общего фосфора в активном глубинном слое и снижаясь до 1 % в придонном слое (табл. 14.14 и 14.15).

Специфическая сезонная черта динамики содержания фосфора в активном глубинном слое — наличие летнего минимума концентраций, который можно, по-видимому, связать с процессами сорбции и соосаждения фосфатов, стимулированных повышенной седиментацией как автохтонного органического вещества, продуцированного фитопланктоном, так и притоком аллохтонных взвешенных веществ в результате весенних речных паводков (рис. 14.39 и 14.40). Снижение концентраций, приводящее к этому минимуму, охватывает весь активный глубинный слой (рис. 14.41), а сроки наступления этого минимума подвержены существенной межгодовой изменчивости (рис. 14.42).

Межгодовые изменения содержания фосфатов во всей толще глубинного слоя, обусловленные затоками североморских вод, проявляются на фоне многолетней тенденции увеличения концентраций PO_4^{2-} в глубинном активном слое и формируются в результате взаимодействия двух различных механизмов (рис. 14.43—14.46). Один из них связан с относительно слабыми затоками, распространяющимися в пределах активного глубинного слоя, другой определяется мощными затоками, проникающими до дна глубоководных впадин.

Слабые затоки приводят к снижению концентраций в тех районах, куда проникают относительно обедненные фосфатами воды, заглубляющиеся по мере своего распространения в соответствии с распределением солености. Продвижение этих вод может служить причиной и некоторого повышения концентраций в вышележащих слоях вследствие «вытеснения» старых вод с данного горизонта.

Мощные затоки обновляют воду глубоководных впадин, что приводит к формированию нескольких стадий на протяжении каждого из циклов, выделенных в п. 10.3 по изменениям солености. Вначале происходит быстрое снижение концентраций, вызванное не столько смешением с вновь поступившими водами, обедненными фосфатами, сколько сменой анаэробных условий на аэробные, в которых

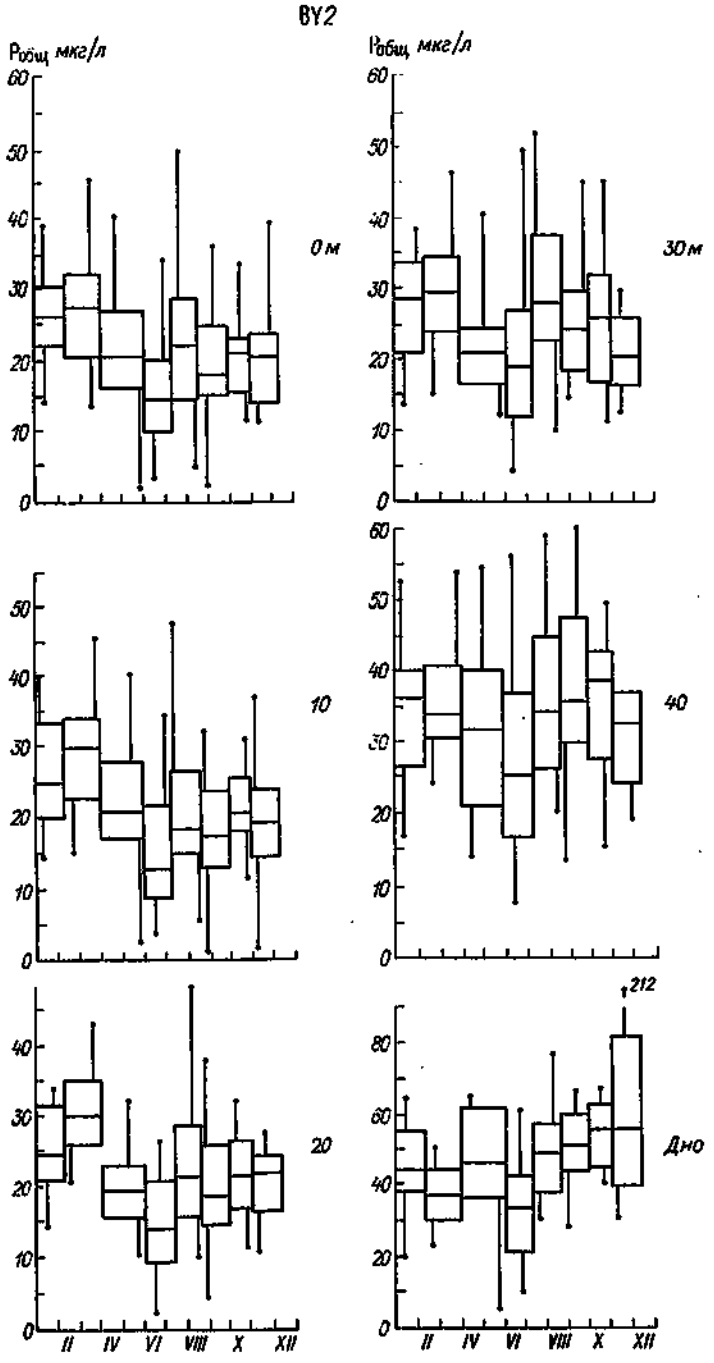


Рис. 14.30.

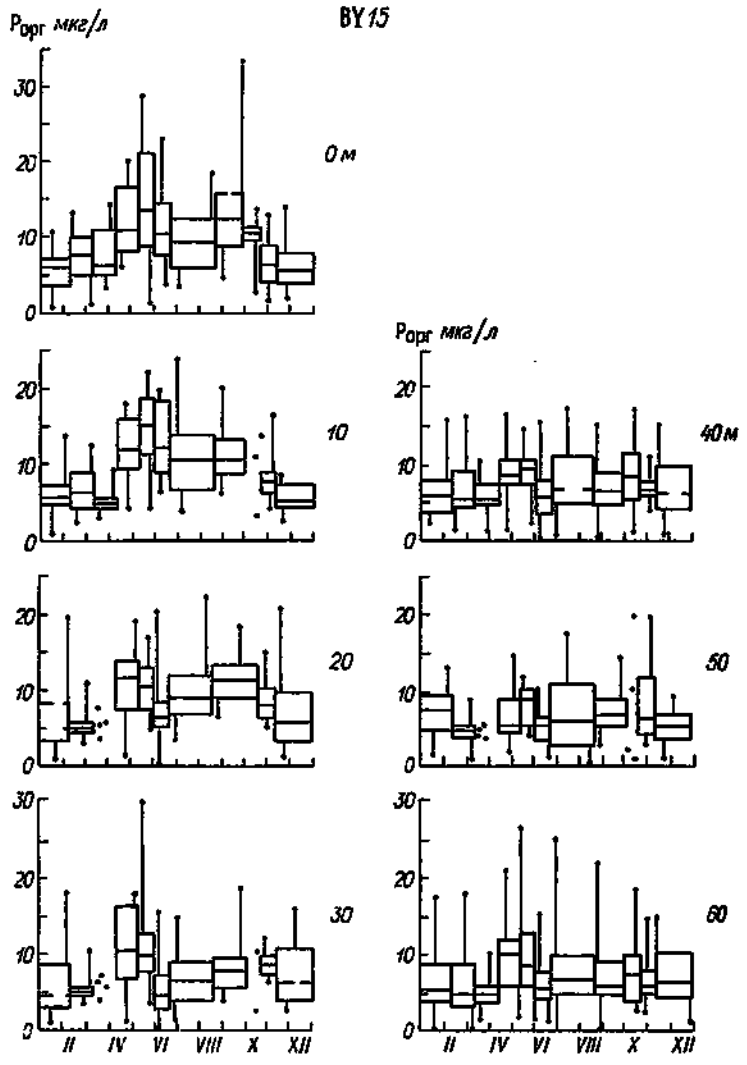


Рис. 14.31. Годовой ход концентраций органического фосфора на стандартных горизонтах верхнего слоя Готландской впадины (ст. BY 15), северной части моря (ст. BY 29) и Арконской впадины (ст. BY 2) по данным квартильного анализа.

происходит сорбция и соосаждение фосфатов. За этим следует стадия аэробной аккумуляции фосфатов, обусловленная деструкцией органического вещества. Вновь появившиеся анаэробные условия приводят к быстрому росту содержания фосфатов в воде вследствие их десорбции с взвешенных веществ и с поверхности донных отложений. Скорость протекания этих стадий так же, как и степень распространения соответствующих изменений в вышележащие горизонты, определяется сложным комплексом конкретных условий, к которым относятся, например, соотношения между концентрациями фосфатов в старых и новых водах, между степенью аэрации придонных слоев и скоростью биохимического потребления кислорода, между скоростями перемешивания («вытеснения») вод и сорбции/десорбции фосфатов в водной толще и на дне.

Динамику смены анаэробных условий аэробными можно, несмотря на очевидные методические различия в получении результатов измерений различными судами, проследить по материалам гидрохимических съемок, проведенных в 1969—1970 гг. по программе Международного года Балтики (рис. 14.47). Наиболее же отчетливо рассмотренные закономерности проявляются в глубинном слое Борнхольмской впадины (см. рис. 14.43), в которую более часто поступают затоки североморских вод, и в придонном слое Готландской впадины (см. рис. 14.45), в котором анаэробные условия господствуют в течение достаточно долгих промежутков времени.

Статистические различия режима фосфора в глубинном слое в зависимости от того, какие условия (аэробные или анаэробные) складываются у дна глубоководных впадин, представлены для всего рассматриваемого промежутка времени в табл. 14.14 и 14.15, а для нескольких конкретных циклов — на рис. 14.48 и 14.49.

14.3. Кремний

Кремний находится в морской воде в растворенной форме в виде ионов кремниевой кислоты SiO_2^{2-}

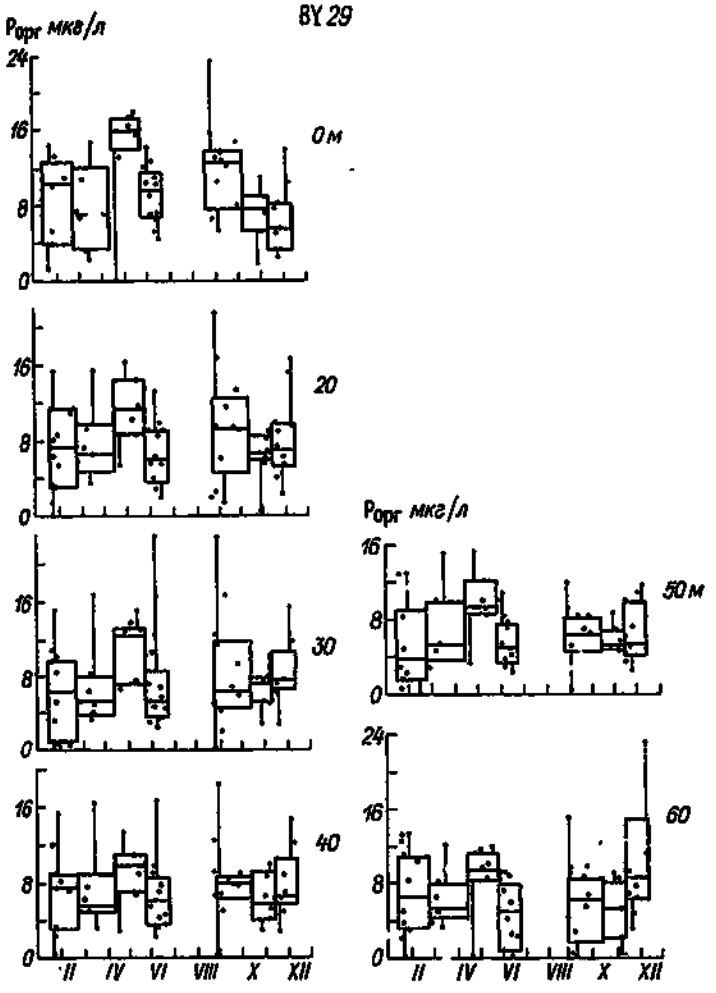


Рис. 14.31.

(силикаты). Он также входит в состав не только минеральных взвешенных веществ, но и в состав скелетных образований широко распространенных морских организмов — в состав створок диатомовых и игл радиоляриевых водорослей, спикул кремниевых губок и т. п.

В современных условиях Балтийского моря концентрации силикатов в поверхностных водах, по-видимому, не снижаются до значений, лимитирующих первичную продукцию фитопланктона (единицы — десятки мкг/л). Однако, учитывая наметившуюся в последние годы тенденцию уменьшения содержания кремния [142, 505] вследствие эвтрофикации моря (см. также п. 15.2), нельзя недооценивать возможность занятия кремнием положения лимитирующего биогена, по крайней мере, в определенных районах и в определенные фазы годового цикла.

По сравнению с азотом и фосфором временна́я динамика и пространственное распределение кремния определяются более ограниченным набором процессов — утилизацией фитопланктоном, главным образом диатомовым, оседанием кремнистых створок и других кремнийсодержащих останков организмов и минеральных взвешенных веществ под воздействием силы тяжести, регенерацией запасов силикатов при растворении как органогенного кремния, так и минеральных частиц. Важным источником поступления кремния извне является речной сток, в связи с чем можно отметить, что содержание силикатов в речных водах Швеции за последние два десятилетия возросло в 1,5 раза [509].

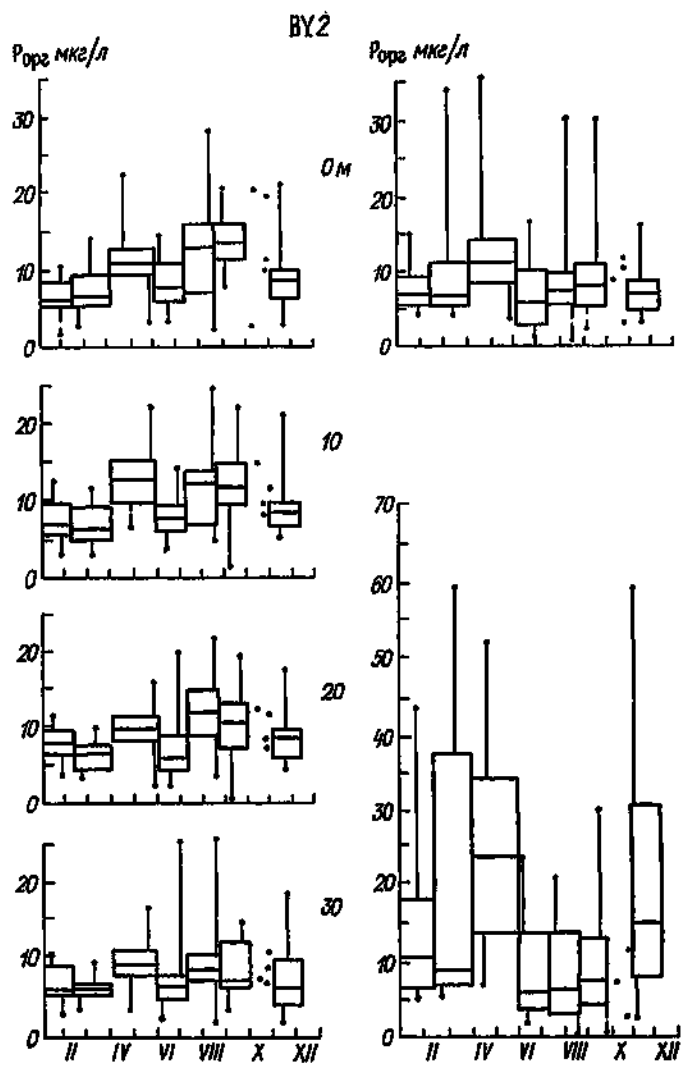


Рис. 14.31.

14.3.1. Динамика содержания силикатов в верхнем слое

Концентрация силикатов в верхнем слое Балтийского моря подвержена ярко выраженным сезонным изменениям (рис. 14.50). Зимняя аккумуляция силикатов, прослеживаемая по всему морю на всех горизонтах верхнего слоя (рис. 14.51), осуществляется, по-видимому, за счет конвекции, развивающейся по мере охлаждения поверхностных слоев воды. На это указывают положительные значения вертикальных градиентов концентраций кремния, постоянно существующих на верхней границе галоклина (рис. 14.52). С началом весеннего цветения диатомовых концентрации силикатов в фотической зоне снижаются до летних минимальных значений вследствие быстрой седиментации тяжелых кремнистых створок. Заметное восполнение запасов силикатов в поверхностных слоях наступает лишь с развитием осенней конвекции.

Рассмотренный характер сезонных изменений распространяется до глубины 30—40 м по всему морю, за исключением мелководной Арконской впадины (см. рис. 14.51 и 14.52). В более глубоких слоях усиление растворения створок диатомовых, связанное с замедлением скорости их оседания в холодной нижней части верхнего слоя и на границе с галоклином, поддерживает концентрации силикатов на достаточно стабильном уровне. В Арконской впадине эти процессы происходят на дне и их

Таблица 14.14

Многолетние статистические характеристики концентраций фосфатов (мкг/л) в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
Ст. BY 5														
60	26	1	18	26	35	116	249	31	6	23	31	38	72	56
70	38	3	28	38	49	121	176	64	12	51	65	75		39
80	47	4	35	48	58	180	241	106	10	67	106	144	221	50
Дно	50	5	37	50	61	210	215	173	20	130	162	239	309	34
Ст. BY 15														
80	54	9	45	54	63	87	129	55	12	43	55	67	97	255
90	58	19	48	59	66	88	128	63	14	53	63	74	112	242
100	60	24	49	60	69	95	128	69	15	58	69	80	140	244
125	65	28	58	65	71	95	104	75	29	68	74	85	173	195
150	79	30	71	78	90	147	124	103	54	82	100	129	210	222
175	87	36	72	85	104	134	101	131	66	109	129	155	183	170
200	83	34	70	81	100	200	122	148	5	125	149	168	283	204
220	80	29	68	79	92	200	119	165	77	144	166	182	357	194
Дно	73	47	61	73	84	139	51	193	98	162	193	224	298	72
Ст. BY 29														
80	68	13	56	69	76	105	53	70	42	65	70	74	105	22
100	80	26	74	80	87	149	54	84	69	80	83	90	108	23
125	81	53	73	82	88	141	54	92	72	87	91	98	117	22
150	85	53	74	86	93	133	54	95	75	90	95	99	121	23
Дно	88	53	80	88	96	133	54	100	87	95	100	106	124	24

Таблица 14.15

Многолетние статистические характеристики концентраций общего фосфора (мкг/л) в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
Ст. BY 5														
60	36	10	27	36	46	125	137	45	23	36	45	52	75	37
70	45	19	35	44	57	127	92	78	39	61	76	98	156	29
80	58	25	49	57	68	200	137	146	78	110	148	177	235	34
Дно	60	29	50	57	74	220	128	233	154	193	226	288	328	24
Ст. BY 15														
80	65	5	60	65	71	97	62	65	20	53	65	76	110	184
90	69	5	63	69	76	105	62	74	40	64	73	84	117	169
100	70	5	62	70	78	106	65	80	31	68	80	92	140	170
125	74	5	67	74	80	103	57	85	56	76	83	98	138	144
150	84	6	77	82	95	136	62	112	5	90	109	140	210	158
175	90	5	77	87	107	154	57	136	70	114	136	159	189	132
200	90	6	74	86	114	129	60	154	74	133	154	174	240	157
220	91	6	78	88	110	162	62	170	120	155	170	185	251	169
Дно	88	5	66	88	110	308	27	195	118	172	192	222	252	56
Ст. BY 29														
80	72	19	57	75	82	95	40	80	55	72	79	90	135	16
100	88	51	82	87	97	104	41	96	72	83	96	107	138	17
125	91	68	85	91	96	115	41	107	77	95	105	122	149	15
150	95	73	85	96	102	127	39	111	77	100	110	125	144	16
170	96	75	88	95	104	166	37	120	99	111	120	130	160	15

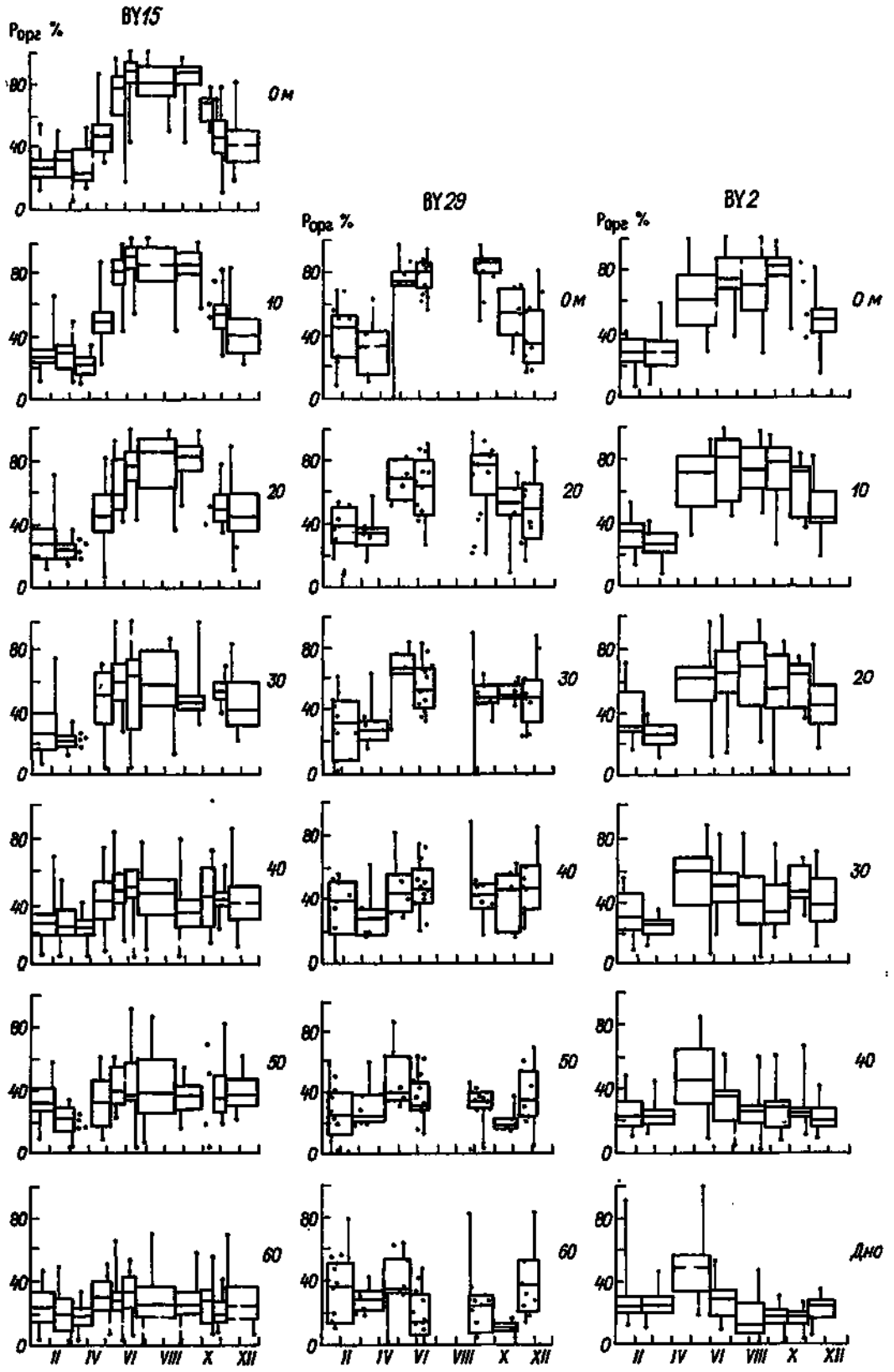


Рис. 14.32. Годовой ход процентного содержания органического фосфора на стандартных горизонтах верхнего слоя Готландской впадины (ст. BY 15), северной части моря (ст. BY 29) и Арконской впадины (ст. BY 2) по данным квартильного анализа.

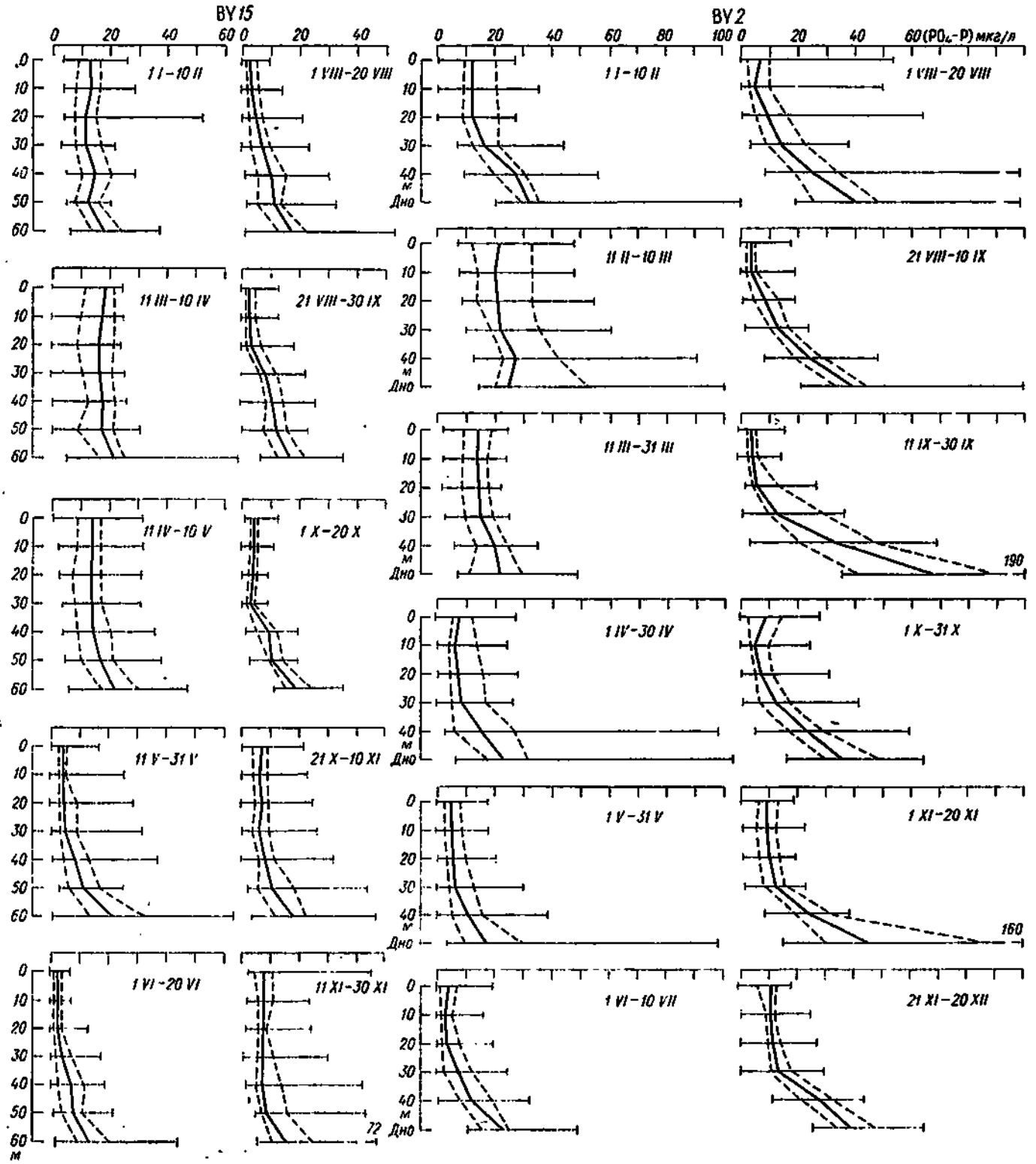


Рис. 14.33. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций фосфатов в верхнем слое Готландской (ст. BY 15) и Арконской (ст. BY 2) впадин.

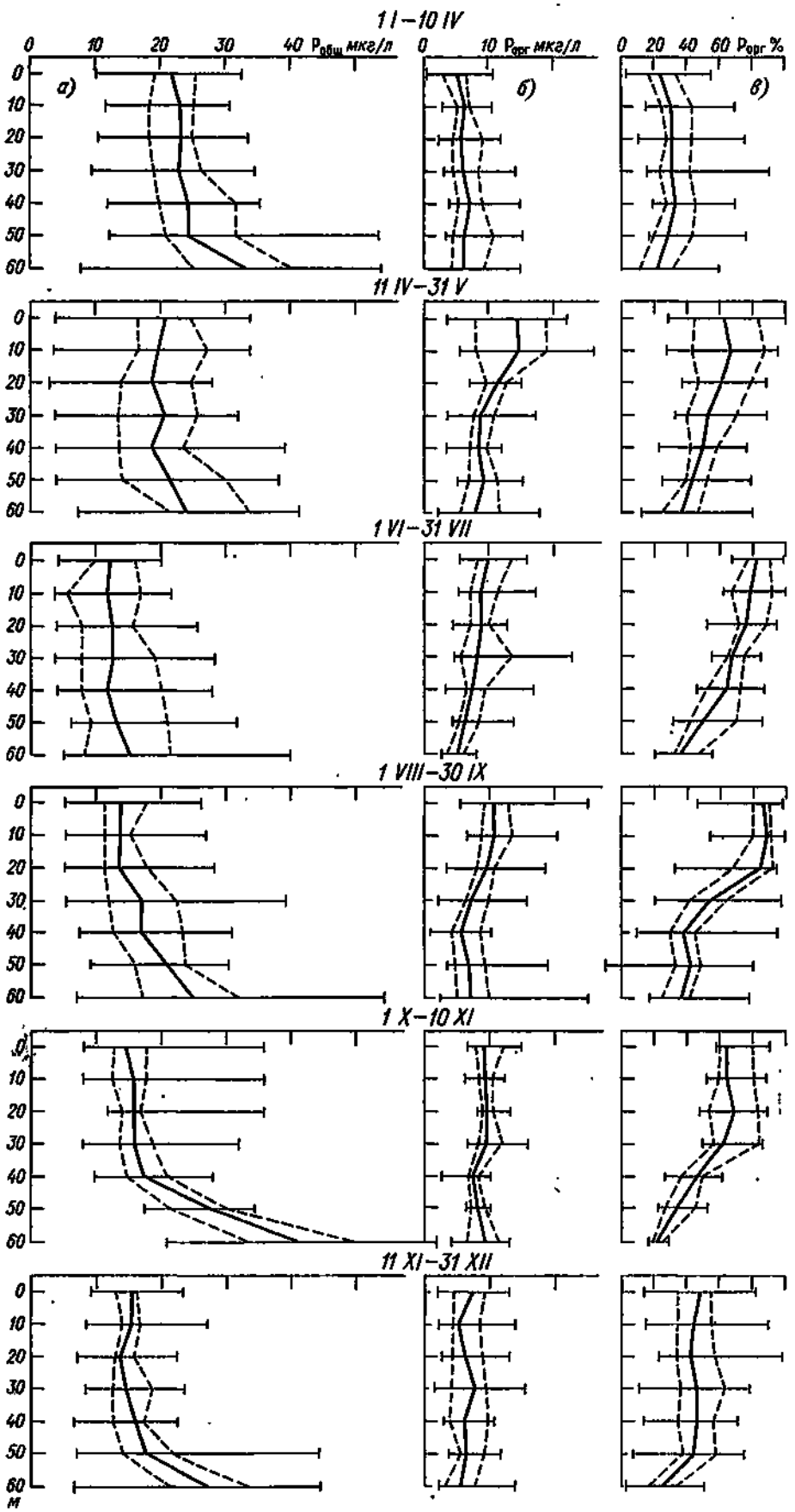


Рис. 14.34. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций общего (*а*), органического (*б*) фосфора и процентного содержания органического фосфора (*в*) в верхнем слое юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9).

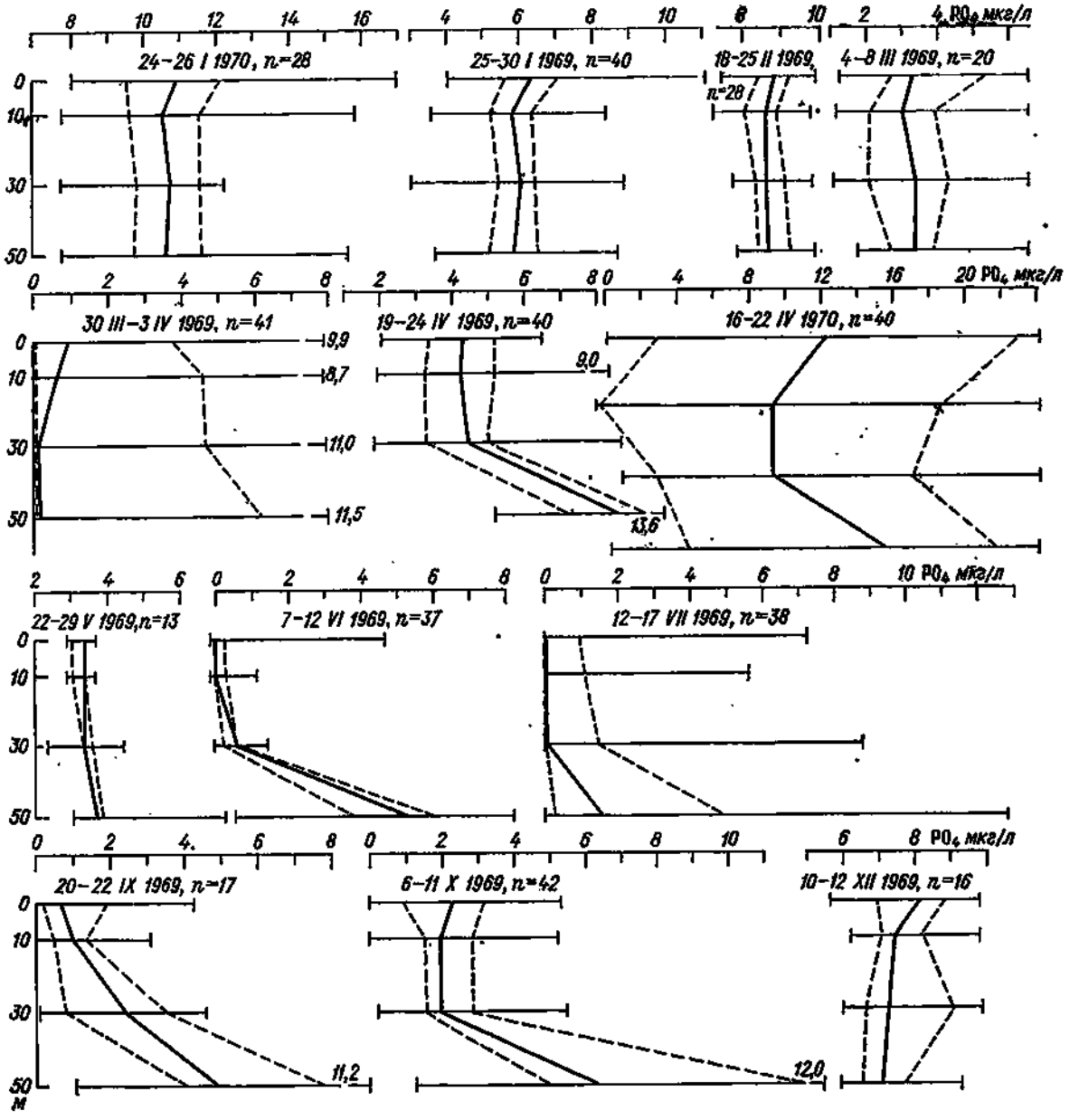


Рис. 14.36. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций фосфатов в верхнем слое Готландской впадины (ст. ВУ 15) по данным срочных наблюдений многосуточных серий в 1969—1970 гг.

влияние начинает сказываться в поверхностных слоях уже с июня (см. рис. 14.51 *а* и 14.52 *а*).

Межгодовые и многолетние изменения запасов силикатов в верхнем слое можно обнаружить по данным измерений, выполненных в 1969—1983 гг. на поверхности моря зимой, во время максимального ослабления утилизации биогенов водорослями (рис. 14.53). Как показывает элементарное обобщение данных, полученных различными экспедициями (рис. 14.54), за этот период произошло перераспределение содержания кремния в поверхностном слое — концентрации возросли в центральном и южном районах моря и несколько снизились на севере и западе.

14.3.2. Динамика содержания силикатов в глубинном слое

Увеличение концентрации силикатов с глубиной, начинающееся с верхней границы галоклина, распространяется на всю толщу глубинного слоя (табл. 14.16). При этом межгодовые изменения в активном глубинном слое, определяемые главным образом процессами транспорта, не приводят к существенным изменениям концентраций силикатов (рис. 14.55), тогда как в придонном слое возникновение анаэробных условий сопровождается некоторым увеличением содержания кремния (табл. 14.16, рис. 14.55—14.57).

Динамику изменений, сопровождающих смену анаэробных условий аэробными, можно, несмотря на очевидные различия методик измерений на различных судах, проследить по материалам гидрохимических съемок, проведенных в 1969—1970 гг. по программе Международного года Балтики (рис. 14.58).

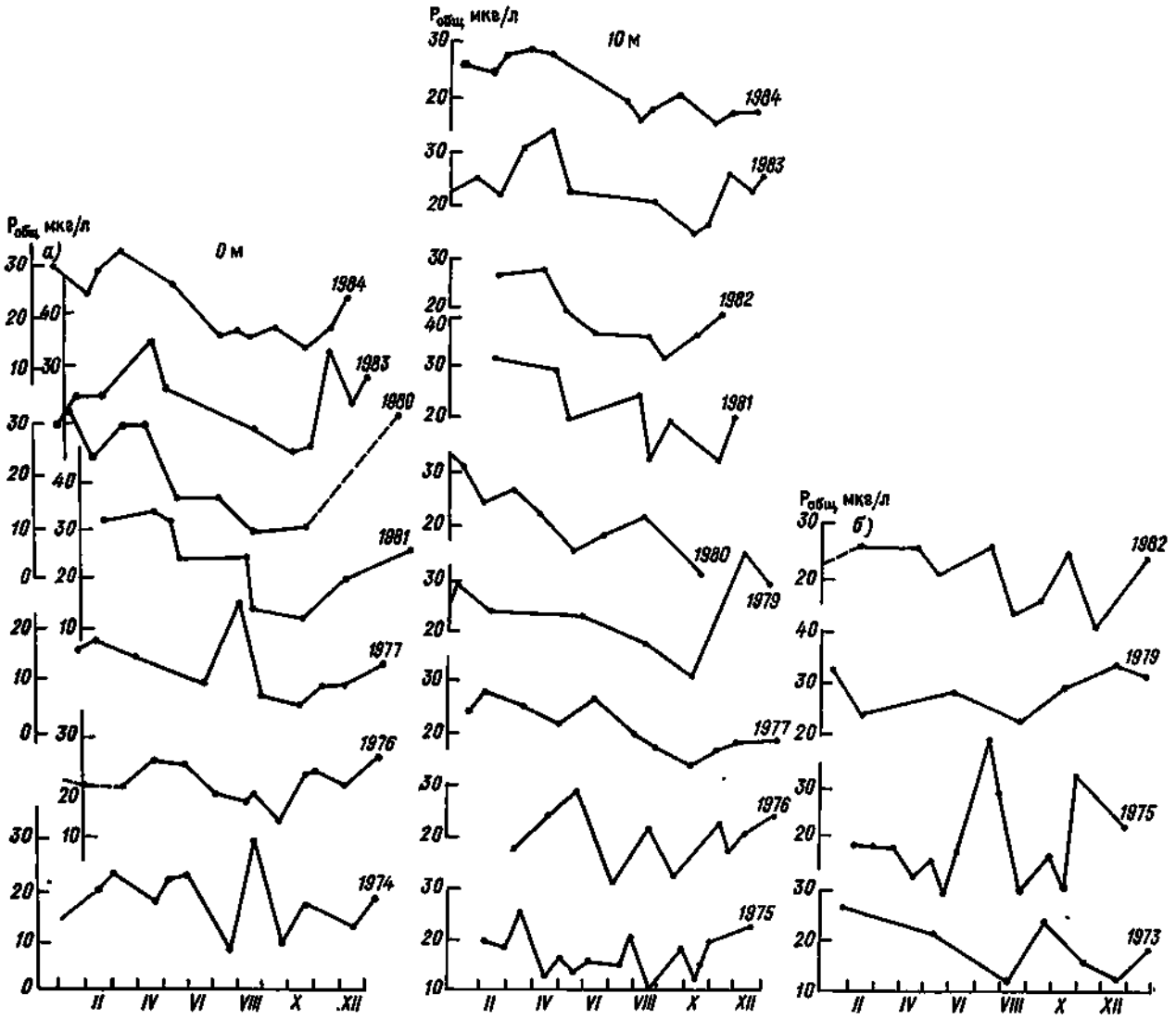


Рис. 14.36. Годовой ход концентраций общего фосфора на поверхности и на глубине 10 м (*а*) Готландской впадины по данным наблюдений БалтНИИРХа.

б — случаи нарушения закономерностей годового хода.

Таблица 14.16

Многолетние статистические характеристики концентраций кремния (мкг/л) в глубинном слое при аэробных и анаэробных условиях у дна

Горизонт, м	Аэробные условия							Анаэробные условия						
	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n	T	$x_{мин}$	$x_{0,25}$	Me	$x_{0,75}$	$x_{макс}$	n
						Ст. BY 5								
60	640	170	490	620	840	2390	140	730	180	560	750	870	1180	38
70	1030	331	760	1040	1290	2230	97	1460	830	1280	1460	1640	1890	20
80	1240	183	900	1260	1540	2480	139	1930	500	1610	1950	2200	2790	38
Дно	1410	220	990	1420	1810	2800	127	2160	660	1840	2150	2500	3250	28
						Ст. BY 15								
80	1270	420	1030	1260	1530	2170	68	1170	280	850	1200	1420	2240	113
90	1420	520	1210	1410	1660	2200	62	1390	530	1190	1400	1570	1960	100
100	1490	620	1350	1490	1650	2250	63	1480	510	1270	1480	1670	2020	102
125	1650	1250	1450	1660	1800	2360	40	1690	590	1470	1690	1920	2660	66
150	1850	910	1580	1870	2080	2810	59	1950	550	1690	1970	2190	2780	98
175	1950	1400	1650	1980	2190	2960	41	2290	1030	1990	2250	2660	3700	61
200	1890	1330	1640	1920	2060	3370	60	2360	660	2100	2370	2600	3230	89
225	1810	1240	1590	1800	2060	3370	51	2530	950	2280	2530	2810	3260	77
Дно	1850	620	1610	1830	2120	2810	40	2590	1170	2350	2600	2810	3210	62
						Ст. BY 29								
80	1380	430	1130	1380	1630	2400	45	1560	830	1340	1570	1740	1800	21
100	1710	810	1500	1690	1950	2560	46	1840	1100	1730	1810	2000	2350	20
125	1790	620	1540	1830	1960	2580	46	1910	1110	1830	1910	2010	2440	20
150	1820	750	1580	1830	2040	2640	46	1980	1340	1810	1970	2180	2620	21
Дно	1830	750	1570	1830	2090	3170	44	2000	1330	1810	1980	2250	2850	22

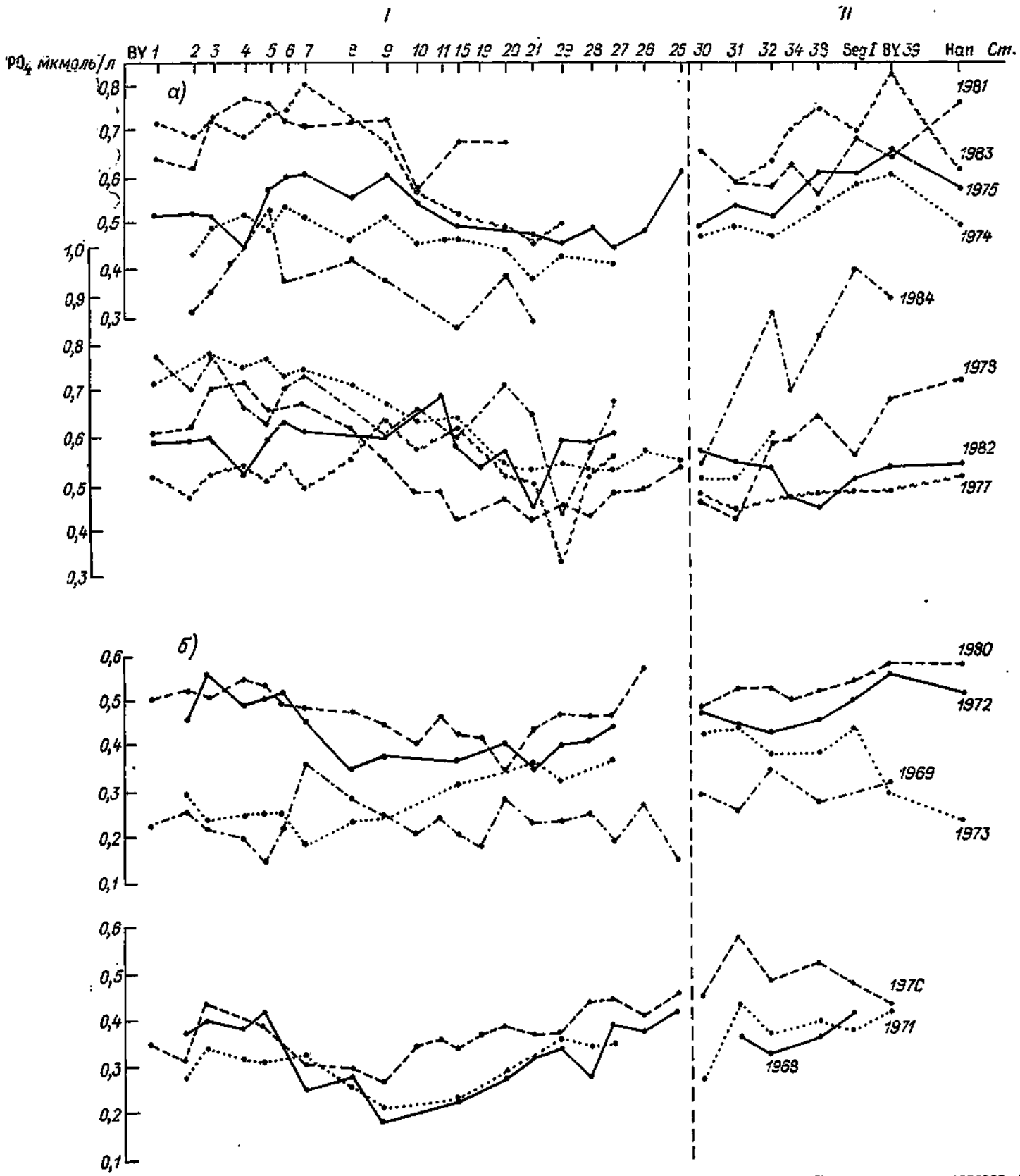


Рис. 14.37. Концентрации фосфатов в зимний период на поверхности восточного (I) и западного (II) продольных разрезов по данным шведских наблюдений, сгруппированным по годам.

Схема расположения станций показана на рис. 12.28 г.

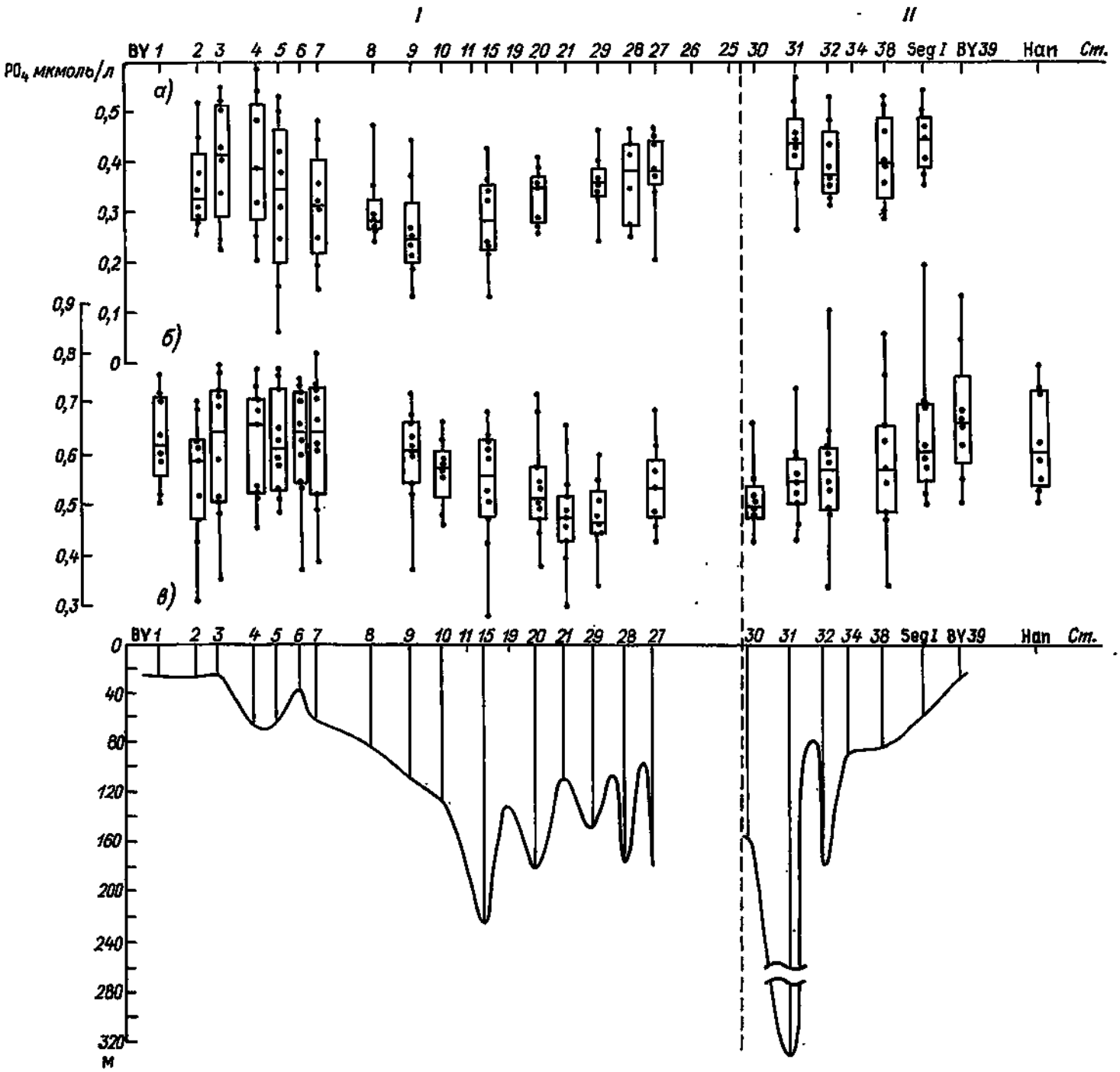


Рис. 14.38. Результаты квартильного анализа данных, представленных на рис. 14.37.

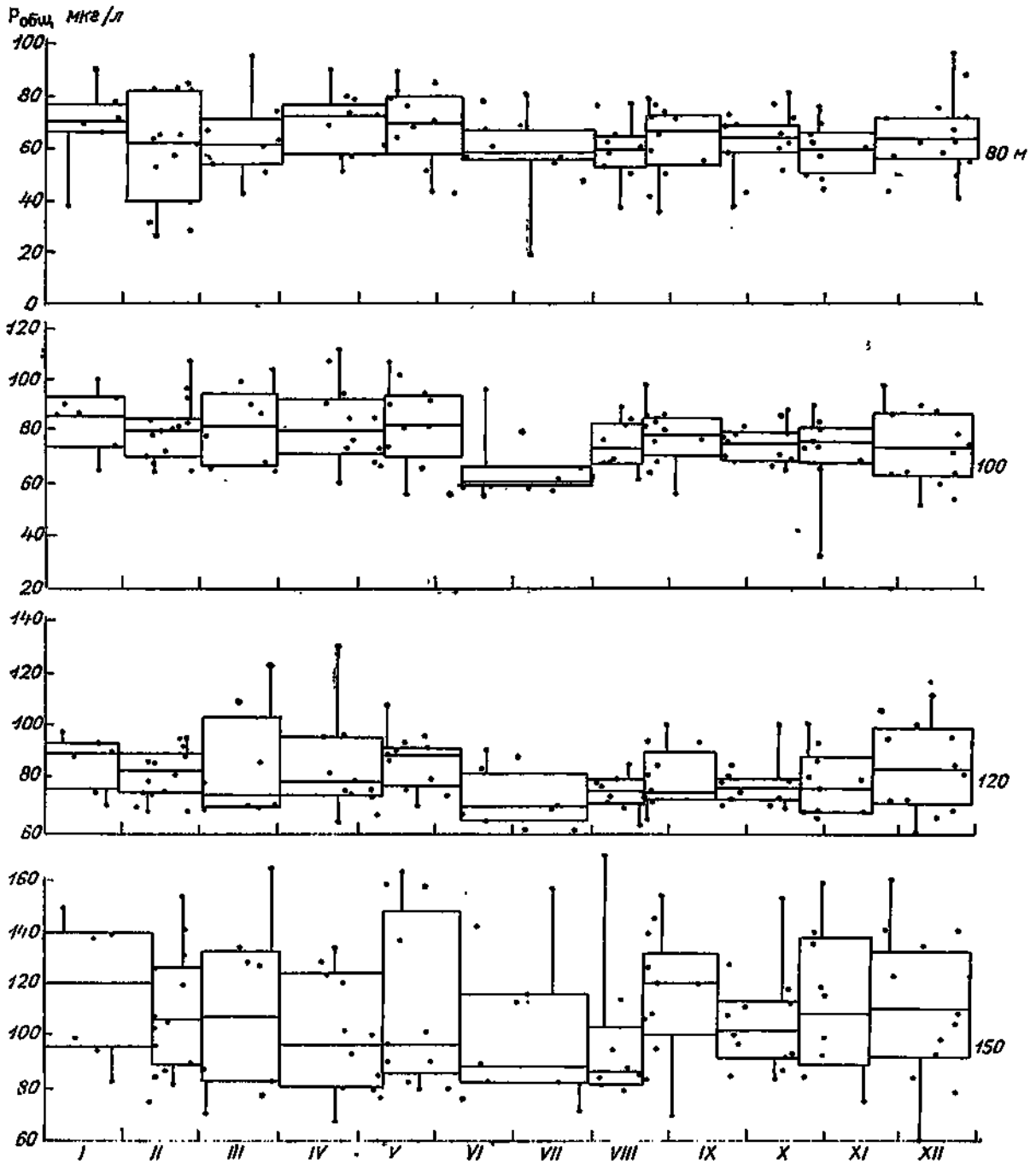


Рис. 14.39. Годовой ход концентраций общего фосфора в слое 80—150 м по данным квартильного анализа (наблюдения БалтНИИРХа).

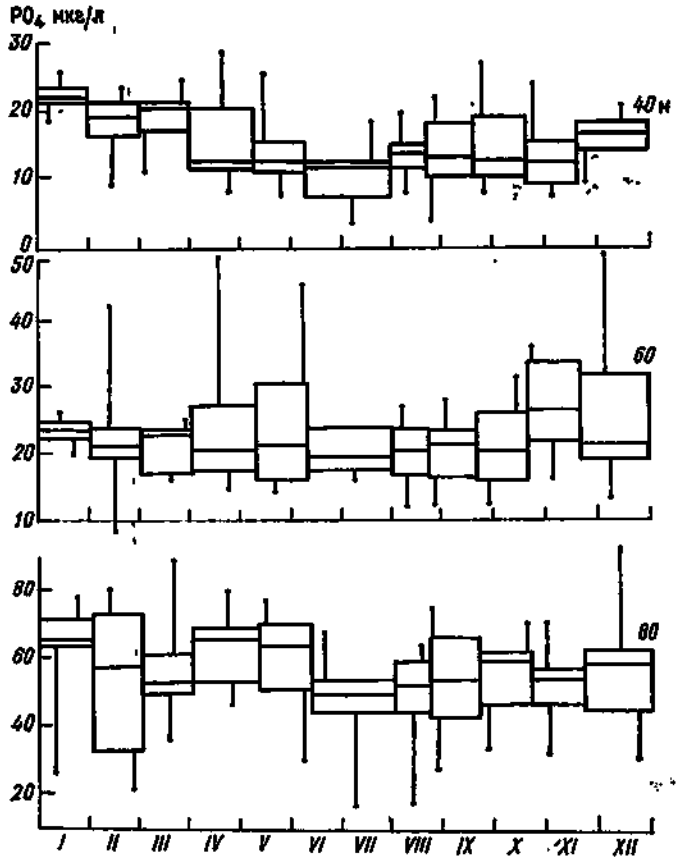


Рис. 14.40. Годовой ход концентраций фосфатов в слое 40—80 м по данным квартильного анализа (наблюдения БалтНИИРХа).

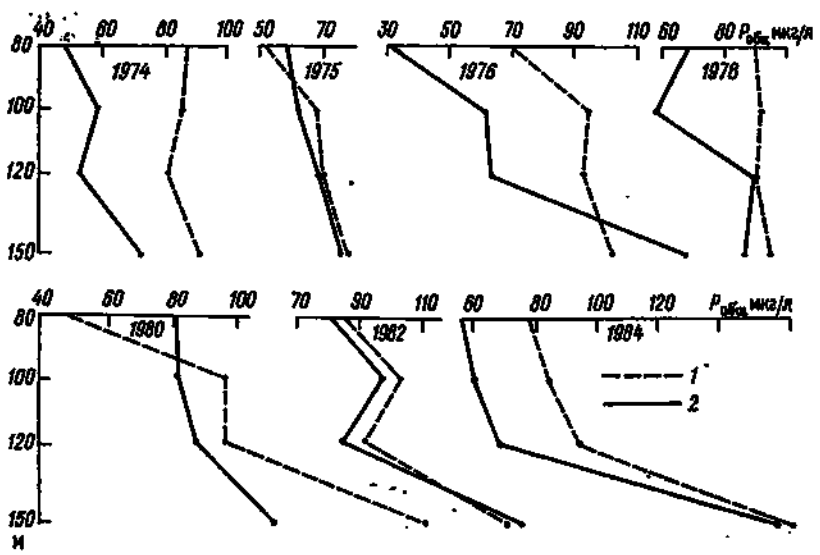


Рис. 14.41. Концентрации общего фосфора в активном глубинном слое Готландской впадины в мае (*1*) и июне—июле (*2*) в различные годы по данным наблюдений БалтНИИРХа.

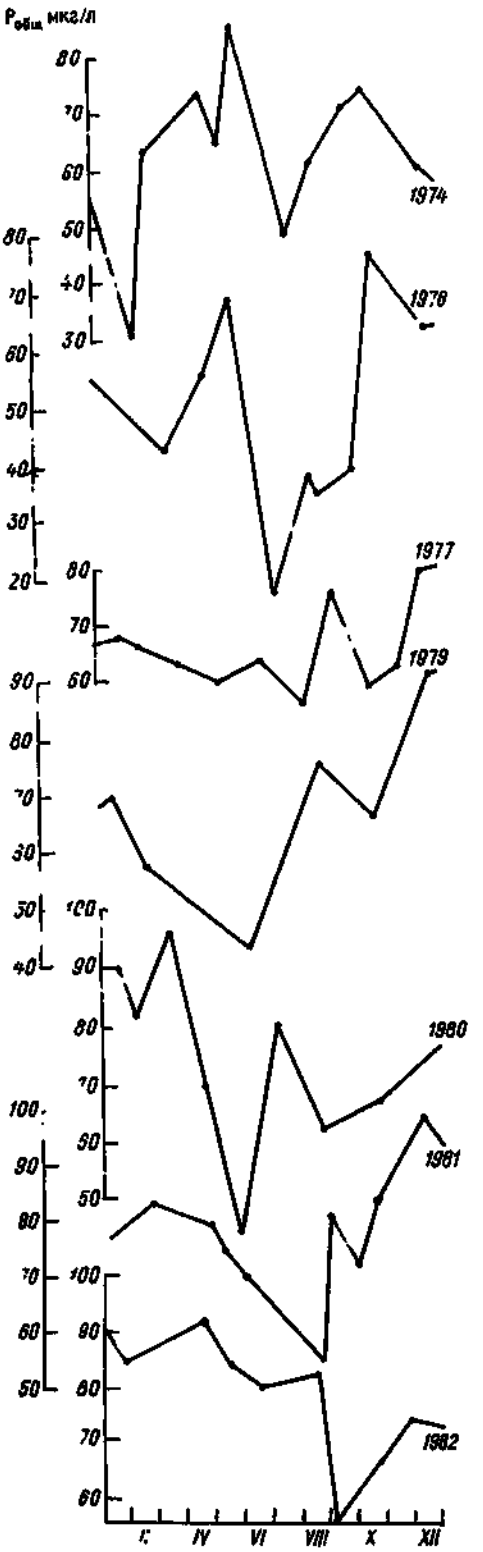


Рис. 14.42. Годовой ход концентраций общего фосфора на глубине 100 м в Готландской впадине для различных лет по данным наблюдений БалтНИИРХа.

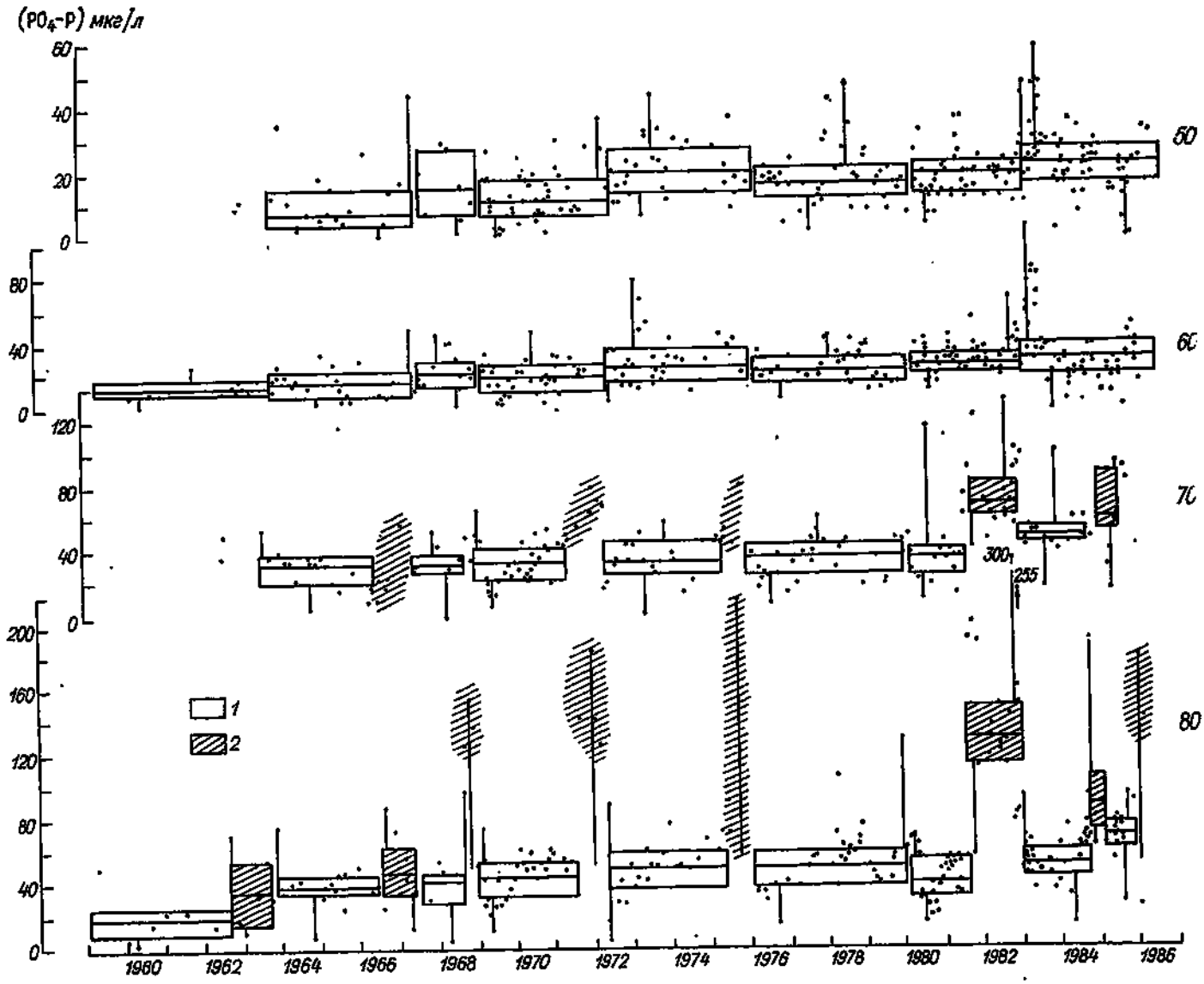


Рис. 14.43. Квартильные оценки концентраций фосфатов в Борнхольмской впадине (ст. BY 5) на глубинах 50 и 60 м в выделенных циклах и на глубинах 80 и 70 м при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

15. ЭВТРОФИКАЦИЯ

Под эвтрофикацией (эвтрофированием) обычно понимают повышение степени трофности (кормности) водоема, которое выражается в его обогащении органическим веществом и минеральными соединениями биогенных элементов и часто, в особенности на начальных этапах эвтрофирования, связано с увеличением биологической продуктивности водоема. В соответствии с таким определением к основным проявлениям (симптомам) эвтрофирования относят [95, 119, 190]:

— увеличение концентрации биогенных элементов (азота и фосфора) в воде и донных отложениях;

— увеличение биомассы и продукции пелагических и донных растений: фитопланктона, макрофитов (водорослей и трав, прикрепленных ко дну) и эпифитов (обрастаний);

— увеличение мутности и уменьшение прозрачности воды;

— повышение содержания растворенного кислорода в поверхностных водах и его понижение в глубинных водах вплоть до полного исчезновения и появления сероводорода;

— массовую гибель организмов в бескислородных условиях;

— изменение видового состава биологических сообществ.

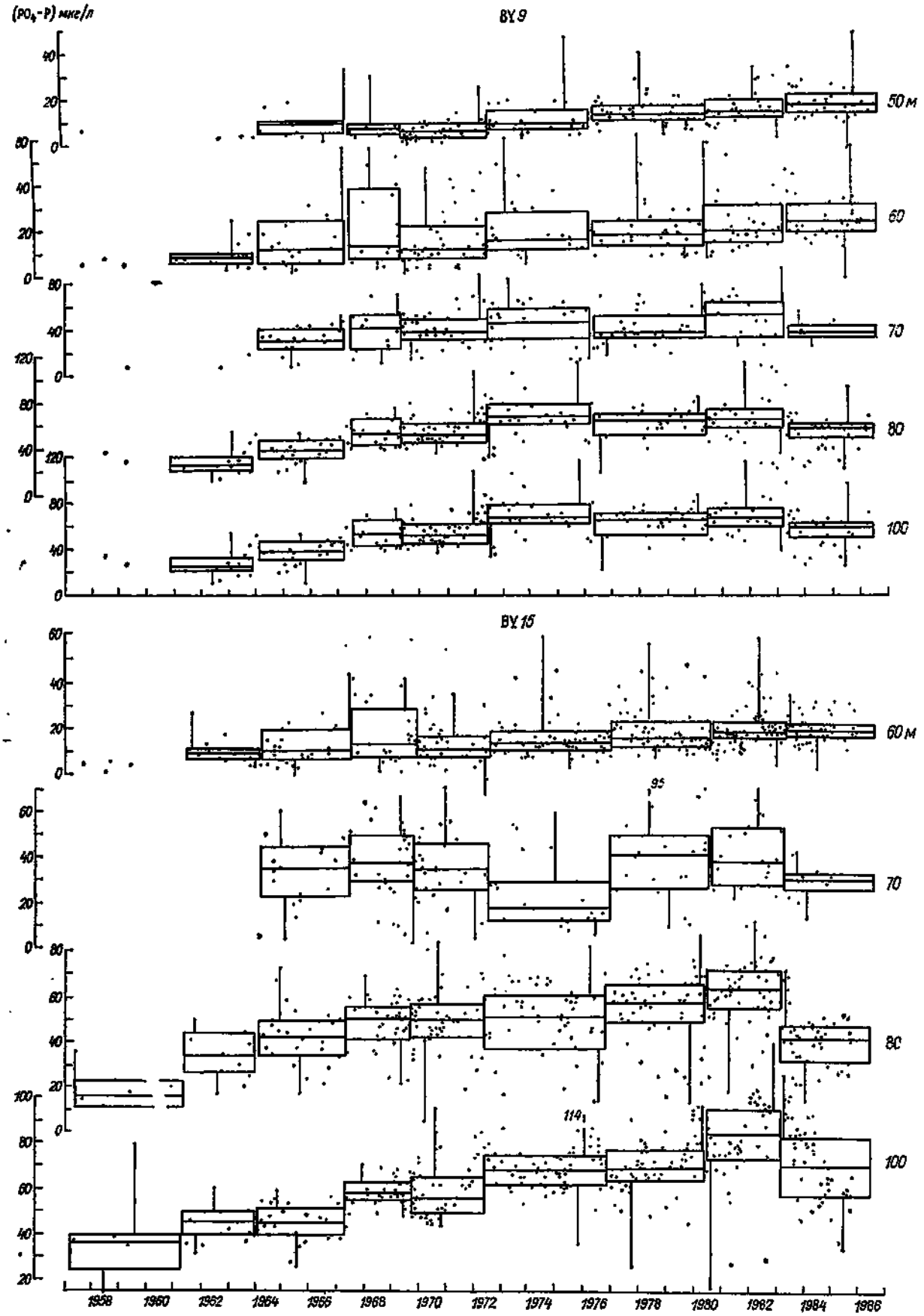
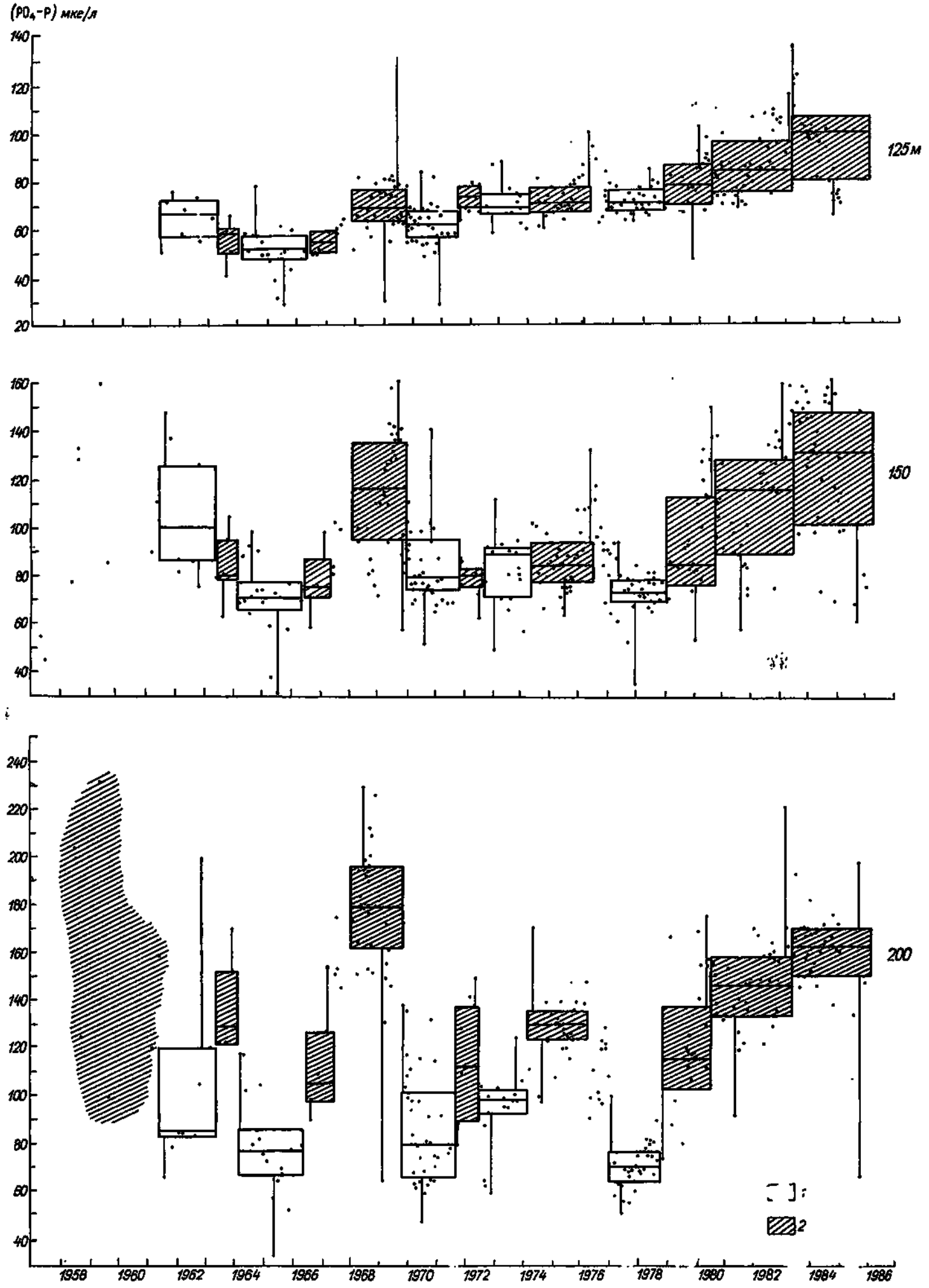


Рис. 14.44. Квартильные оценки концентраций фосфатов в активном глубинном слое юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9) и Готландской впадины (ст. BY 15).


(PO4-P) мкг/л
125 м
150
200
1
2
1958
1960
1962
1964
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1984
1986

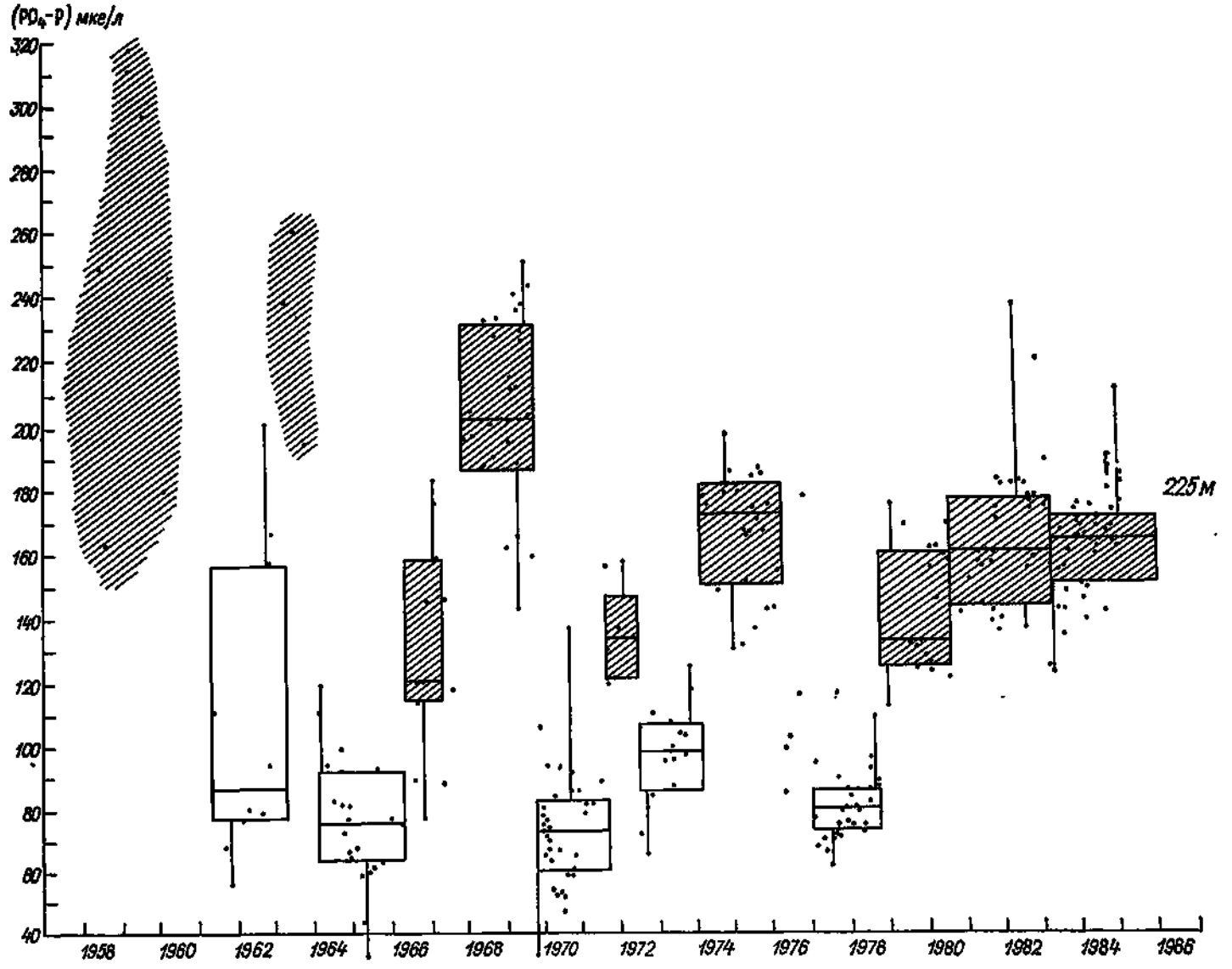


Рис. 14.45. Квартильные оценки концентраций фосфатов в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

Эвтрофированию, обусловленному естественным смывом минеральных и органических форм биогенных элементов с бассейна водосбора и их поступлением через атмосферу, подвержены все природные водоемы. Природная эвтрофикация наиболее ярко выражена и полно выявлена в пресноводных водоемах — хорошо известны случаи повышения трофности озер от олиготрофной до гипертрофной вплоть до заболачивания неглубоких озер [67, 95]. При этом скорость процесса тесно связана со сбалансированностью круговорота вещества, в особенности с теми его составляющими, которыми определяется соотношение между притоком и оттоком (импортом и экспортом) биогенных элементов. В целом же природное эвтрофирование — достаточно медленный процесс, протекающий в масштабах времени, близких к геологическим (тысячи и даже миллионы лет). По мере возрастания численности населения и резкого усиления его хозяйственной деятельности поступление эвтрофицирующих веществ с коммунальными и промышленными сточными водами, со стоками с интенсивно удобряемых сельскохозяйственных угодий и через загрязненную атмосферу возрастало в геометрической прогрессии, время эвтрофирования сократилось до десятилетий и процесс получил название антропогенной эвтрофикации. Поскольку причины, структурно-функциональные схемы и конечные проявления природной и антропогенной эвтрофикации одинаковы, именно временны́е масштабы процессов считаются наиболее важным критерием их различия — при медленной природной эвтрофикации водные экосистемы адаптируются к повышению трофности эволюционным путем, тогда как интенсивное антропогенное воздействие приводит к резким изменениям, которые могут нарушить сбалансированное функционирование системы и угрожать самому существованию ее биотических компонентов [480].

Антропогенная эвтрофикация пресноводных водоемов (от малых прудов до больших озер) уже давно превратилась в глобальную проблему [67, 95]. Наиболее впечатляющим и поучительным примером является катастрофическое эвтрофирование Великих озер в Северной Америке, которое, однако, не только удалось приостановить, но и обратить

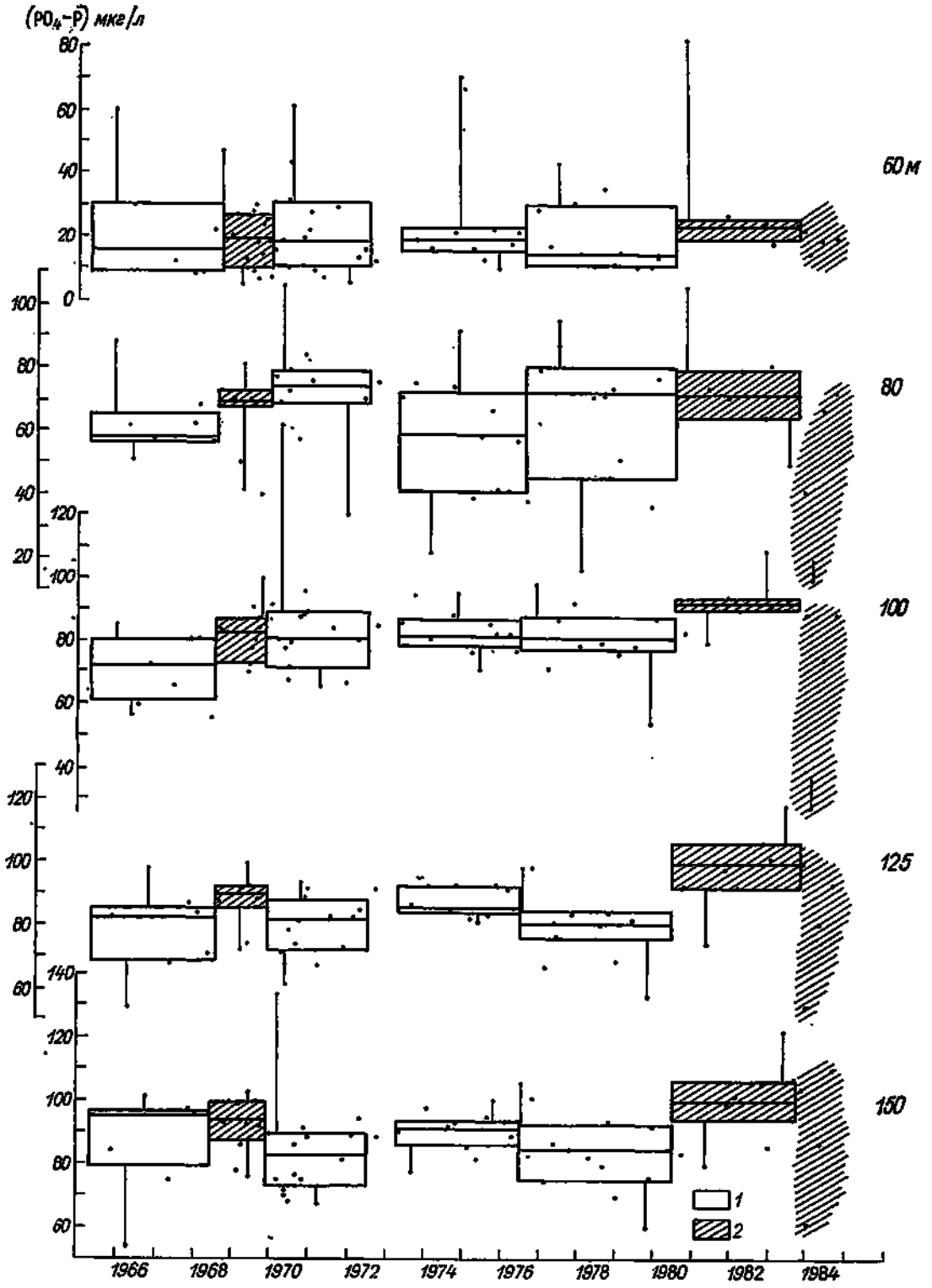


Рис. 14.46. Квартильные оценки концентраций фосфатов в глубинном слое северной части моря (ст. BY 29) при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

вспять благодаря дорогостоящим крупномасштабным природоохранным мероприятиям. Однако на протяжении последних двух десятилетий все более возрастает поток сведений об эвтрофировании прибрежных вод и Мирового океана. Те или иные симптомы эвтрофикации обнаруживаются не только в таких морях окраинного и средиземноморского типов, как Балтийское, Северное, Средиземное и Черное, но и во многих замкнутых и полузамкнутых бухтах и заливах на открытых побережьях практически всех континентов.

Особенно чувствительными к возрастающему поступлению минеральных и органических форм биогенных элементов оказываются эстуарии, нагрузка на которые формируется не только в прибрежной полосе, но и на гораздо больших площадях водосборных бассейнов. Балтийское море, площадь которого (414 тыс. км^2) почти в 4 раза меньше площади его водосбора (1620 тыс. км^2), с годовым объемом речного стока (450—500 км^3), составляющим свыше 2 % объема всего моря (21 700 км^3), во многих отношениях напоминает огромный бесприливной

эстуарий. Учитывая то, что на водосборном бассейне расположены густонаселенные страны с высокоразвитой промышленностью, интенсивным сельским и лесным хозяйством, естественно ожидать, что Балтийское море потенциально должно быть в большей степени подвержено эвтрофикации, чем многие другие водоемы. И действительно, на Балтике основные признаки эвтрофикации были выявлены раньше, чем на каких-либо других морских акваториях. Более того, анализ состояния морской среды Балтики в течение последних 10—15 лет привел экспертов Хельсинкской комиссии к выводу, что основные негативные изменения в море связаны именно с процессом эвтрофирования [136, 142].

Однако проблема выявления причин эвтрофикации Балтийского моря и определения соотношения между природными и антропогенными составляющими этого процесса не так проста, как может показаться на первый взгляд, и гораздо сложнее, чем в случае пресноводных водоемов. Сложность ее решения определяется специфическими физико-географическими особенностями моря, благодаря которым существенное значение во многих проявлениях эвтрофикации могут иметь чисто природные процессы и факторы (см. также гл. 10 и 12). В то же время научно обоснованное решение вопроса о причинах эвтрофикации открытого моря имеет не только академический интерес, но и отчетливо выраженное прикладное значение, злободневность которого связана с долговременными и крупными капиталовложениями балтийских стран в природоохранные мероприятия. Достаточно прямолинейно важность такого решения выражена проф. Герлахом: «Если же окажется, что наблюдавшиеся в Балтийском море изменения носят естественный характер и антропогенные факторы имеют второстепенное значение, то от многих мероприятий по очистке сточных вод, осуществляемых в странах Балтийского моря в настоящее время, можно будет отказаться» [18].

15.1. Балансы азота и фосфора

В соответствии с определением понятия «эвтрофикация» положительные значения балансов биогенных элементов в море, т. е. превышение скорости их включения в биогеохимический круговорот данного водоема над скоростью удаления из него, уже сами по себе могут служить доказательством эвтрофикации водоема и оценкой ее интенсивности. И действительно, некоторые современные оценки балансов, критически рассмотренные и сведенные воедино в [74, 75], достаточно достоверно указывают на накопление в море как биогенных элементов (табл. 15.1 и 15.2), так и органического вещества. Этому выводу не противоречит и ряд более поздних оценок отдельных статей или балансов в целом. Так, суммарное ежегодное поступление с суши и из атмосферы (без учета обмена с Северным морем) на акваторию, включающую прол. Каттегат, оценивается значениями 1060 тыс. т азота и 53 тыс. т фосфора [342]. Близкие оценки даются и в работах [507, 509]: годовые балансы (приход—расход=баланс, тыс. т) акватории, не включающей

Таблица 15.1

Оценки баланса азота (тыс. т/год) в Балтийском море (числитель — оценка на основе водообмена по Брогмусу, знаменатель — с учетом баротропной части)

Статья баланса	Источник [46]	[377]	[334]	[75]	Пределы оценок
Приходная часть					
Поступление из Северного моря	133	110	*	180 / 540	(110—180) / 540
Бытовые и промышленные стоки	66	129	103	417	330—660
Речной сток	508	200	635		
Атмосфера	88	205	322	710	230—710
Азотфиксация	150**	150	134	250***	150—250
Приход					(820—1800) / (1250—2160)
Расходная часть					
Сток в Северное море	230	250	110*	320 / 640	(230—320) / 640
Рыболовство	27	20	30	—	20—30
Седиментация	—	—	60	110	60—110
Денитрификация	—	—	470	300—360***	300—570
Расход					(610—1030) / (1020—1350)
Баланс					(210—770) / (290—810)

* Авторами приведена только разность между поступлением из Северного моря и стоком в него.
** Косвенная оценка по аналогии с другими водоемами.
*** Результаты моделирования.

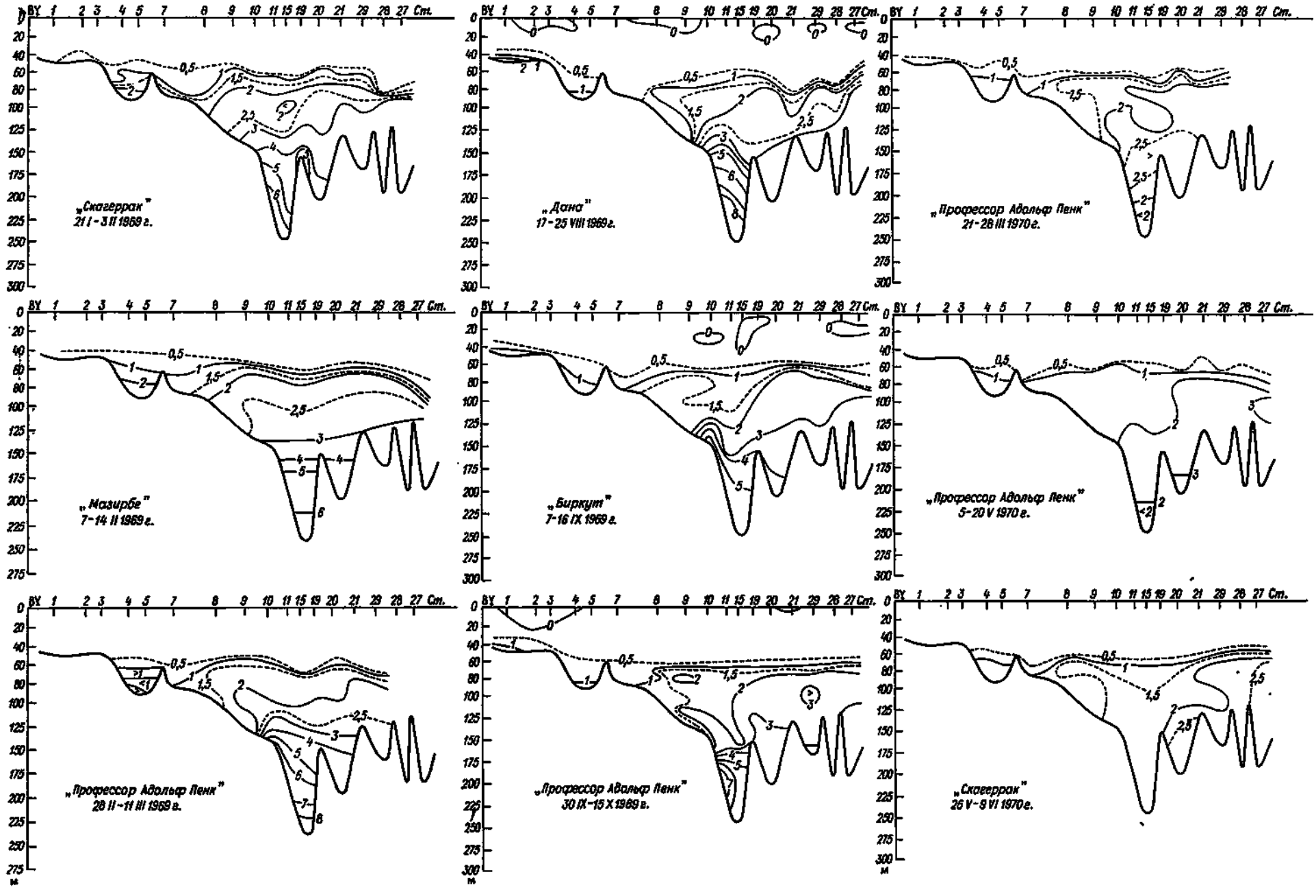
Таблица 15.2

Оценки баланса фосфора (тыс. т/год) в Балтийском море (числитель — оценка на основе водообмена по Брогмусу, знаменатель — с учетом баротропной части)

Статья баланса	Источник [46]	[377]	[334]	[75]	Пределы оценок
Приходная часть					
Поступление из Северного моря	10	10	*	20 / 55,5	(10—20) / 55,5
Бытовые и промышленные стоки	14	33	21	37,1	36—61
Речной сток	45,4	3	50,3		
Атмосфера	0,4	9	5,5	6,8	1,4—18,4
Приход					(47—100) / (93—135)
Расходная часть					
Сток в Северное море	11	10	1,5*	25 / 50	(10—25) / 50
Рыболовство	4,5	4,0	3,0	—	3,0—4,5
Седиментация	—	22	24	35	22—35
Расход					35—64 / (75—90)
Баланс					(12—36) / (18—45)

* Авторами приведена только разность между поступлением из Северного моря и стоком в него.

Разрез I


BY 1 2 3 4 5 7 8 9 10 11 15 19 20 21 28 26 27 Cm.
„Скагеррак"
21 I - 3 II 1969 г.
„Дана"
17 - 25 VIII 1969 г.
„Профессор Адольф Пенк"
21 - 28 III 1970 г.
„Мазирбе"
7 - 14 II 1969 г.
„Биркут"
7 - 16 IX 1969 г.
„Профессор Адольф Пенк"
5 - 20 V 1970 г.
„Профессор Адольф Пенк"
28 II - 11 III 1969 г.
„Профессор Адольф Пенк"
30 IX - 15 X 1969 г.
„Скагеррак"
26 V - 9 VI 1970 г.
м

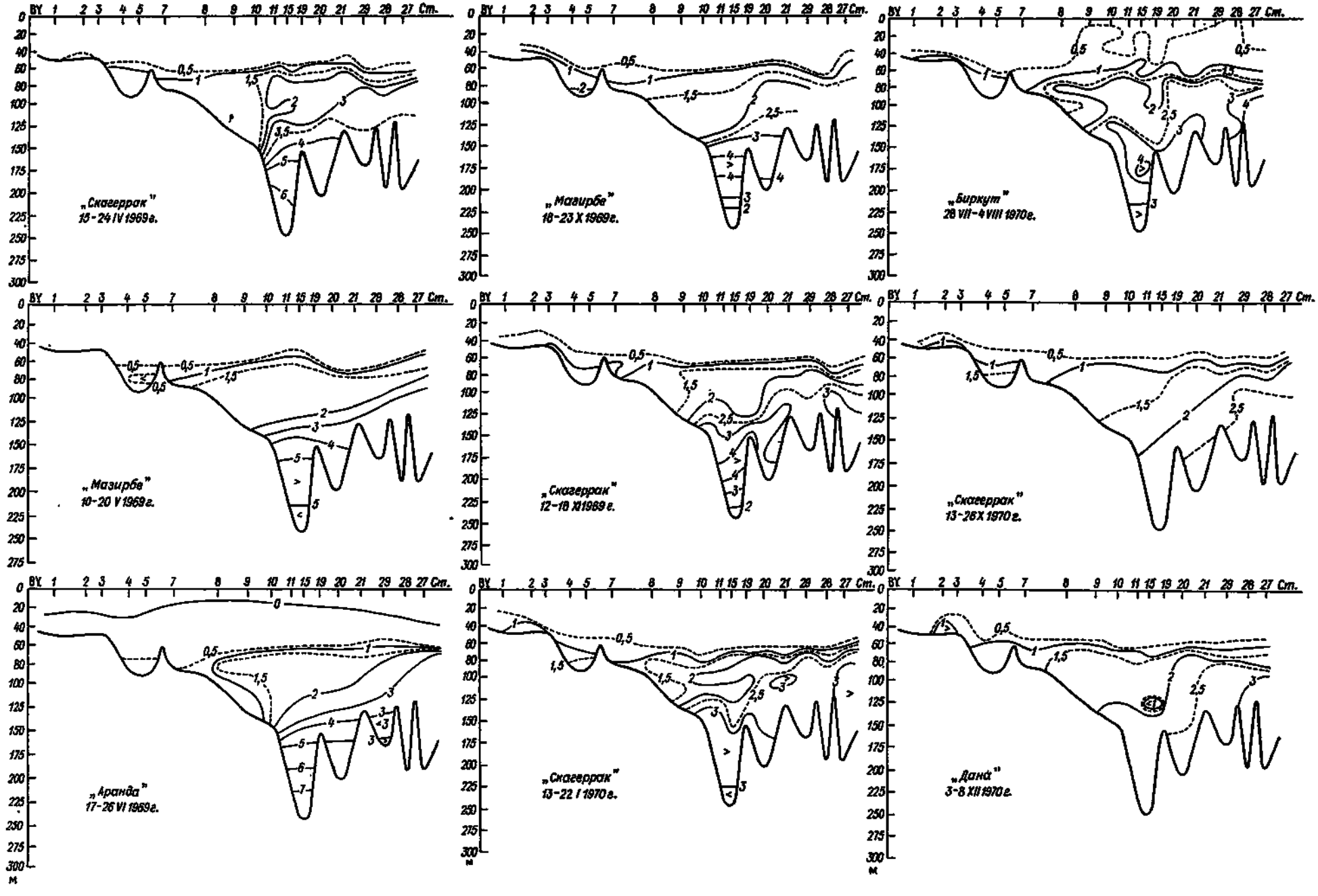


Рис. 14.47. Распределение концентраций фосфатов на восточном (I) и западном (II) продольных разрезах Балтийского моря в 1969—1970 гг.

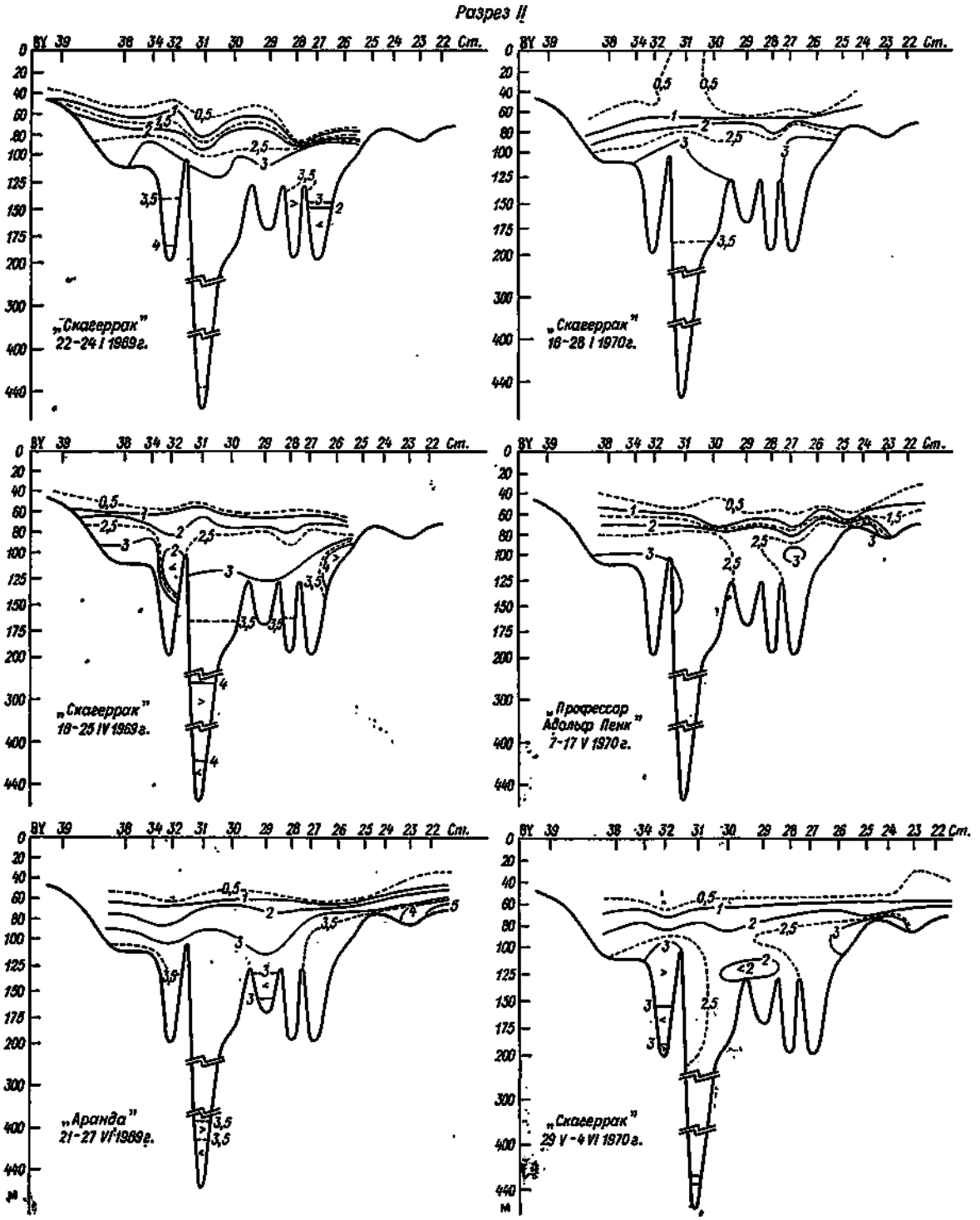

Разрез II
ВУ 39 38 34 32 31 30 29 28 27 26 25 24 23 22 Cm.
„Скагеррак"
22-24 I 1969 г.
„Скагеррак"
16-28 I 1970 г.
„Скагеррак"
18-25 IV 1969 г.
„Профессор
Альфред Пенк"
7-17 V 1970 г.
„Аранда"
21-27 VI 1969 г.
„Скагеррак"
29 V - 4 VI 1970 г.
м

Рис. 14.47.

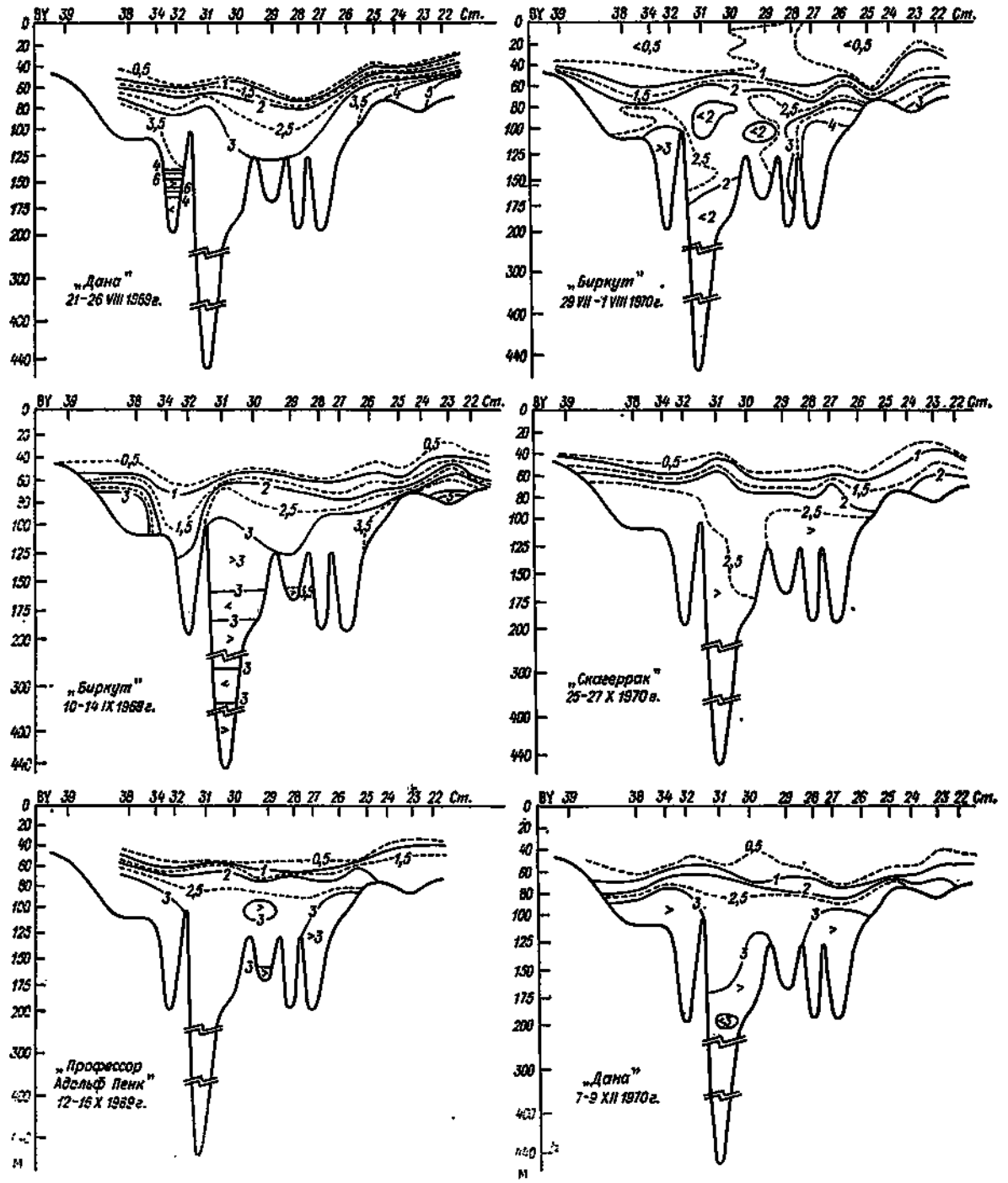

„Дана"
21–26 VIII 1969 г.
„Биркут"
29 VII – 1 VIII 1970 г.
„Биркут"
10–14 IX 1969 г.
„Скагеррак"
25–27 X 1970 г.
„Профессор
Адольф Пенк"
12–16 X 1969 г.
„Дана"
7–9 XII 1970 г.

Рис. 14.47.

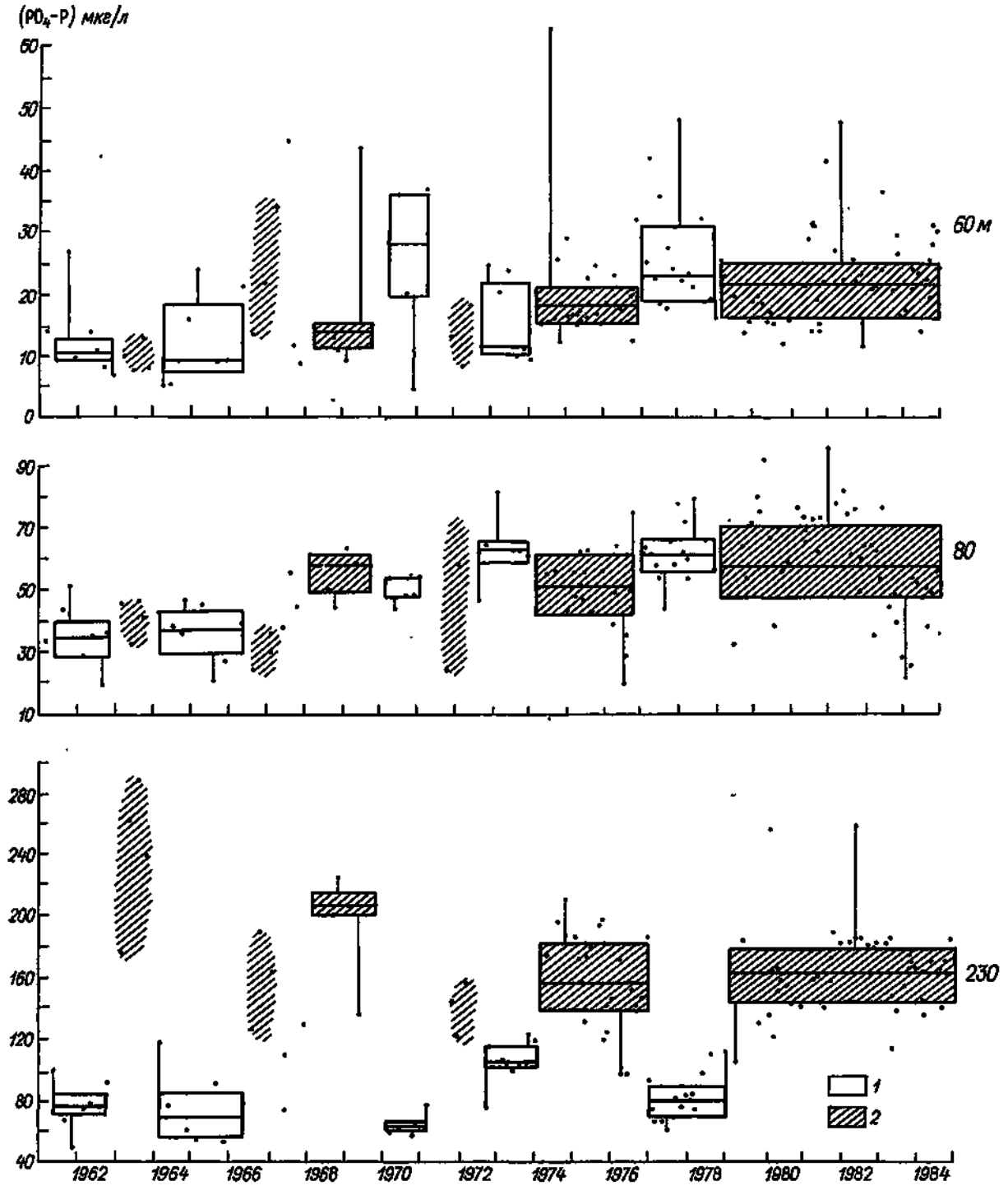


Рис. 14.46. Квартильные оценки концентраций фосфатов в слое 60—80 м Готландской впадины при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна (230 м) по данным наблюдений БалтНИИРХа.

прол. Каттегат, с учетом выноса в Северное море выглядят следующим образом: для азота 1110—980=130, для фосфора 66,5—49,8=16,7, для кремния 899—1182=—283.

15.2. Проявления эвтрофикации в открытых водах

Подобно ситуации, складывающейся в океанических водах, где эвтрофикация обнаруживается лишь в прибрежных районах, эвтрофирование прибрежной зоны Балтики, особенно полузамкнутых заливов, бухт, шхер и архипелагов, началось ранее и выражено гораздо более отчетливо, чем в открытых водах. Для подавляющего большинства районов никогда не ставилась также под сомнение роль человеческой деятельности как ведущей причины этого процесса [119, 177, 312, 366]. Однако в открытых водах Балтийского моря признаки эвтрофикации считаются не столь отчетливо выраженными. Поэтому прежде, чем перейти к обсуждению вопроса о ведущих причинах и схеме эвтрофикации этих вод, представляется целесообразным кратко напомнить основные симптомы этого процесса (рис. 15.1). При этом следует иметь в виду, что в соответствии с определением самого понятия первичный признак эвтрофикации — увеличение содержания биогенов и

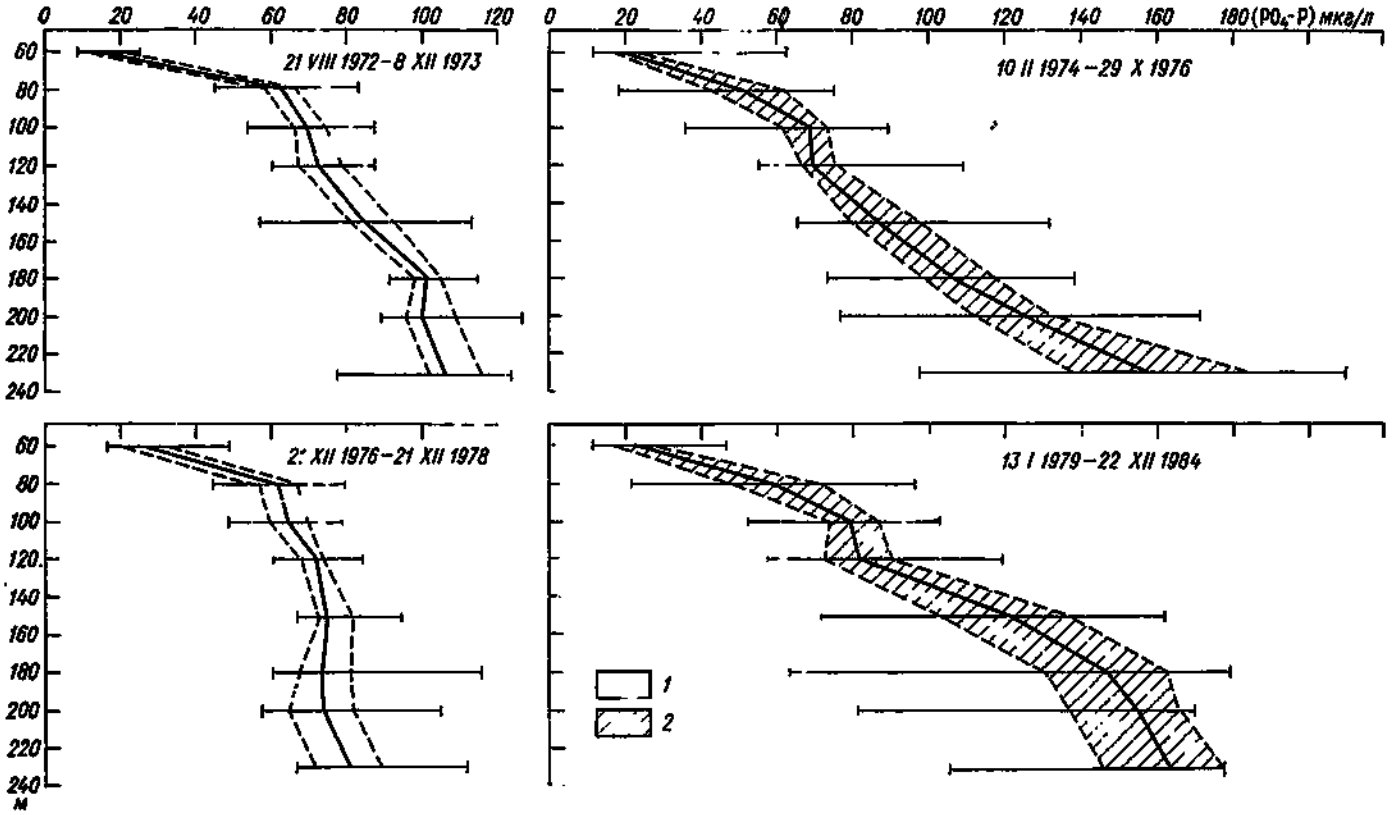


Рис. 14.49. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций фосфатов в глубинном слое Готландской впадины при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

органического вещества, все остальные явления, обозначенные на рис. 15.1, относятся скорее к вторичным признакам или последствиям эвтрофирования.

Биогенные элементы. Достоверное выявление многолетних тенденций увеличения содержания азота и фосфора во всех районах Балтийского моря — один из важнейших результатов осуществления Международной программы мониторинга Балтийского моря [129, 136, 142, 360]. В дополнение к приведенным в гл. 14 иллюстрациям, показывающим возрастание концентраций азота и фосфора в глубинном активном слое (см. рис. 14.19, 14.22—14.24, 14.43—14.46) и на поверхности (рис. 14.15 и 14.38) моря, обратимся к рис. 15.2 и 15.3, заимствованным из [400] и более наглядно демонстрирующим проявление этих тенденций на фоне существенных межгодовых вариаций и пространственных различий.

Как хорошо видно на этих рисунках, в развитии рассматриваемых тенденций, в особенности в изменении зимних концентраций биогенов в поверхностном слое, отчетливо выделяются две стадии: значительное возрастание концентраций на протяжении 70-х годов и незначительные изменения в 80-х годах. В предположении отсутствия существенных изменений в поступлении азота и фосфора из внешних источников причину столь малой изменчивости усматривают в установлении квазистационарного равновесия между процессами биогеохимического круговорота [400].

Органическое вещество. Систематические многолетние измерения содержания органических веществ, подобные таковым для других характеристик гидрохимического режима, в открытых водах Балтийского моря, по-видимому, не проводились. Критический же анализ существующих оценок баланса органического углерода в Балтийском море позволил предположить, что его ежегодное накопление превышает 3 млн т [75].

Кислород. Изменения концентрации кислорода в глубинных водах Балтийского моря определяются балансом скоростей двух разнонаправленных комплексов процессов — скоростью аэрации этих вод, определяемой адвекцией водных масс и вертикальным обменом с верхним слоем, и скоростью биохимического потребления кислорода. Поэтому динамика содержания кислорода в глубинном слое моря может рассматриваться в качестве показателя эвтрофикации только в той степени, в какой она отражает возрастание биохимического потребления кислорода на окисление увеличившегося количества органического вещества. Детальный анализ динамики кислорода в Балтийском море проведен в гл. 12.

Прозрачность воды. В Северной Балтике выявлено возрастание мутности морской воды, которое, по крайней мере отчасти, может быть вызвано увеличением содержания органических взвешенных веществ, включая живые организмы. Анализ большого массива измерений прозрачности морской воды (по диску Секки) позволил Лауниайнену с соавторами (1989 г., цит по [142]) сделать вывод, что в 1969—1986 гг. по сравнению с 1914—1939 гг. прозрачность в среднем была на 2,5—3,0 м меньше, при этом функция ее распределения стала значительно у́же — подавляющее число наблюдений попадает в интервал 3—10 м с максимумом около 6 м, а значения прозрачности свыше 14 м практически не встречаются.

Сходные явления отмечены, например, в прибрежной зоне Швеции, не испытывающей прямого воздействия точечных источников нагрузки, где с 1965 по 1989 г. прозрачность уменьшилась на 4 м

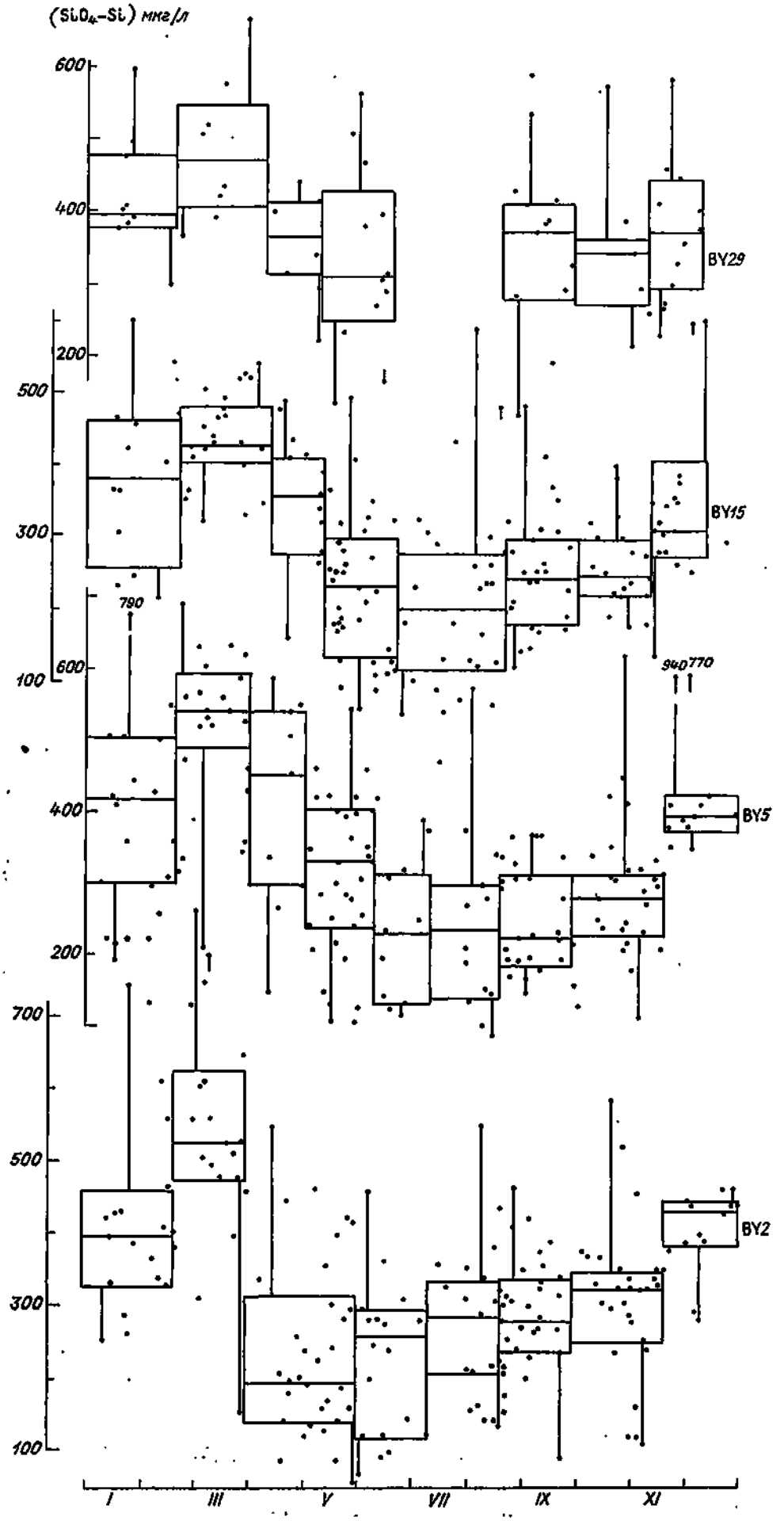


Рис. 14.50. Годовой ход концентраций силикатов на поверхности восточного продольного разреза по данным квартильного анализа для базовых станций.

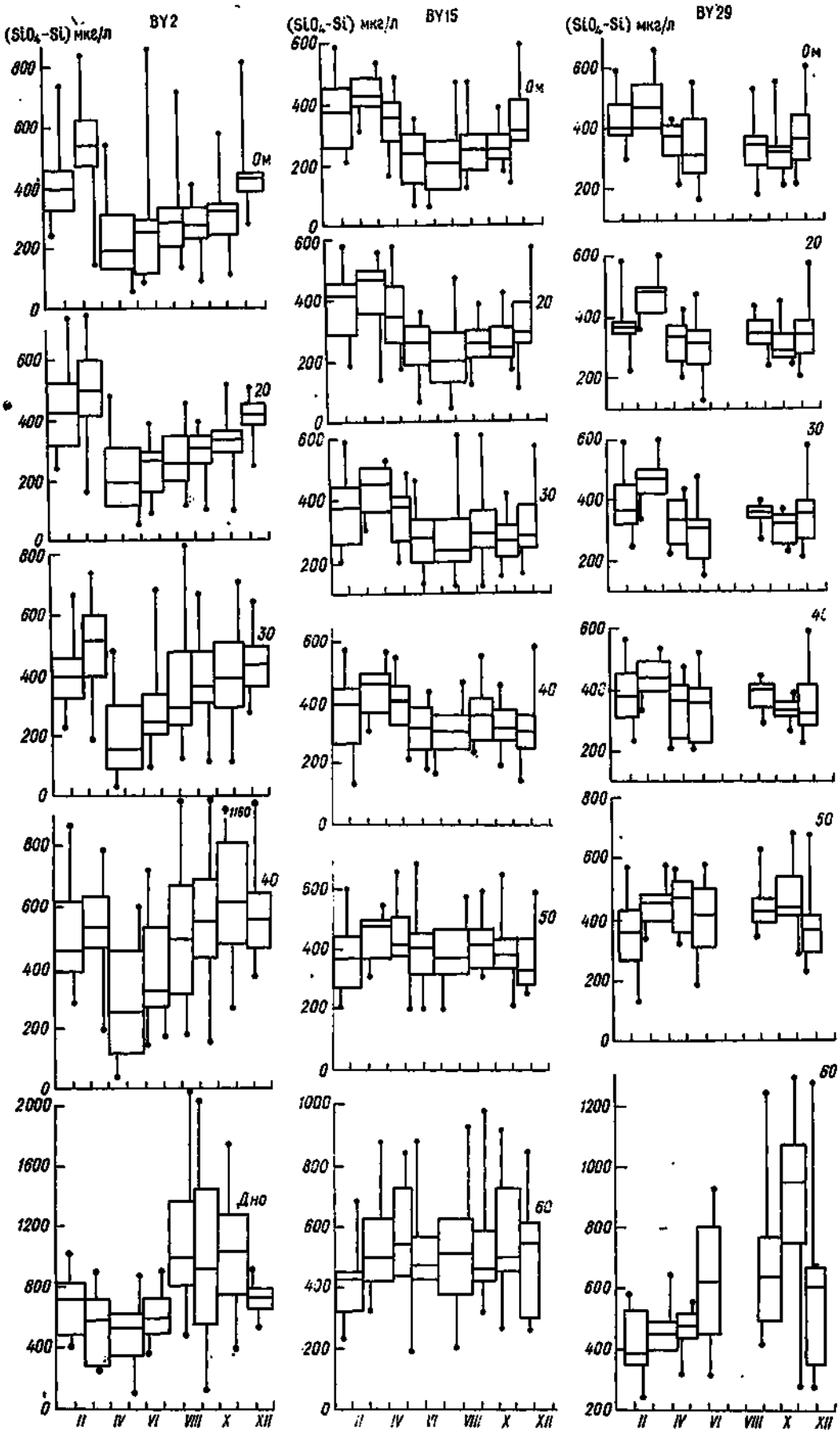


Рис. 14.51. Годовой ход концентраций силикатов в толще вод Арконской впадины (ст. BY 2), в верхнем слое Готландской впадины (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29) по данным квартильного анализа.

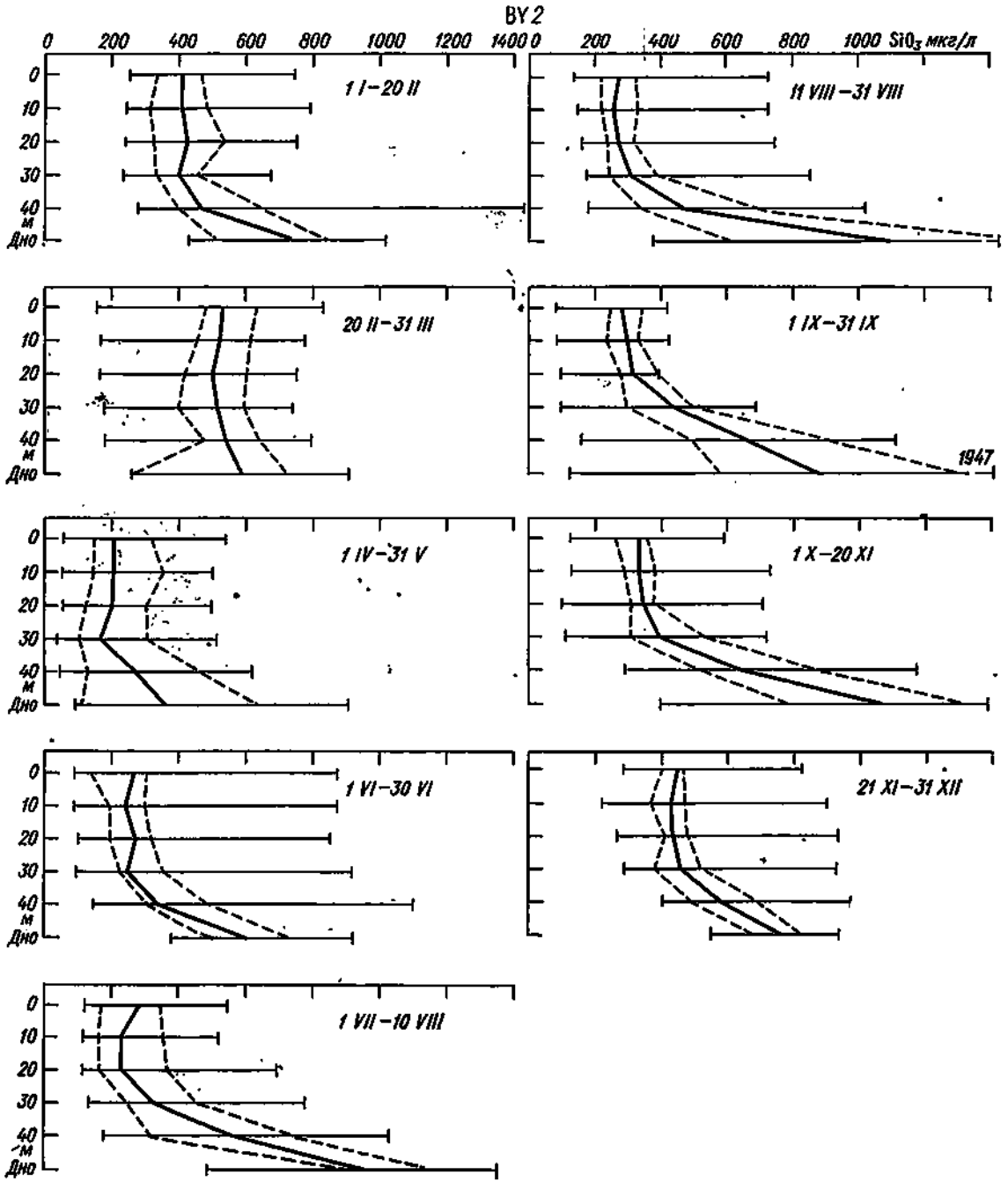


Рис. 14.52. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций силикатов в толще вод Арконской впадины (ст. BY 2), в слое 0—60 м Борнхольмской впадины (ст. BY 5), в слое 0—70 м Готландской впадины (ст. BY 15) и 0—60 м северной части моря (ст. BY 29).

[177], и на эвтрофированных участках побережья Эстонии, где прозрачность воды и мощность эвфотического (трофогенного) слоя уменьшилась до 0,5—2,0 м [119].

Как следует из общей схемы эвтрофикации (см. рис. 15.1), в результате реакции экосистемы на возрастающую продуктивность и трофность водоема должны происходить изменения общего количества и видового состава биотических компонентов. Однако, несмотря на длительную историю гидробиологических исследований на Балтийском море, систематических сопоставимых наблюдений за многолетней динамикой важнейших гидробионтов в открытом море, сравнимых в этом смысле с наблюдениями за изменениями содержания биогенных элементов, и в особенности кислорода, все же не хватает. В достаточной степени изучена многолетняя динамика изменений зоопланктона и зообентоса и значительно хуже — фитопланктона.

Фитопланктон. К числу связанных с фитопланктоном характеристик, которые можно рассматривать как симптомы эвтрофирования, относятся скорость первичного продуцирования органического вещества, концентрация хлорофилла, биомасса и видовой состав планктонного сообщества. Однако накопленная к настоящему времени информация о межгодовых и многолетних изменениях этих показателей все еще недостаточно пригодна для выявления многолетних тенденций. Отсутствуют длительные ряды систематических сравнимых наблюдений. Вследствие несовершенства методов наблюдений даже имеющиеся данные в недостаточной степени

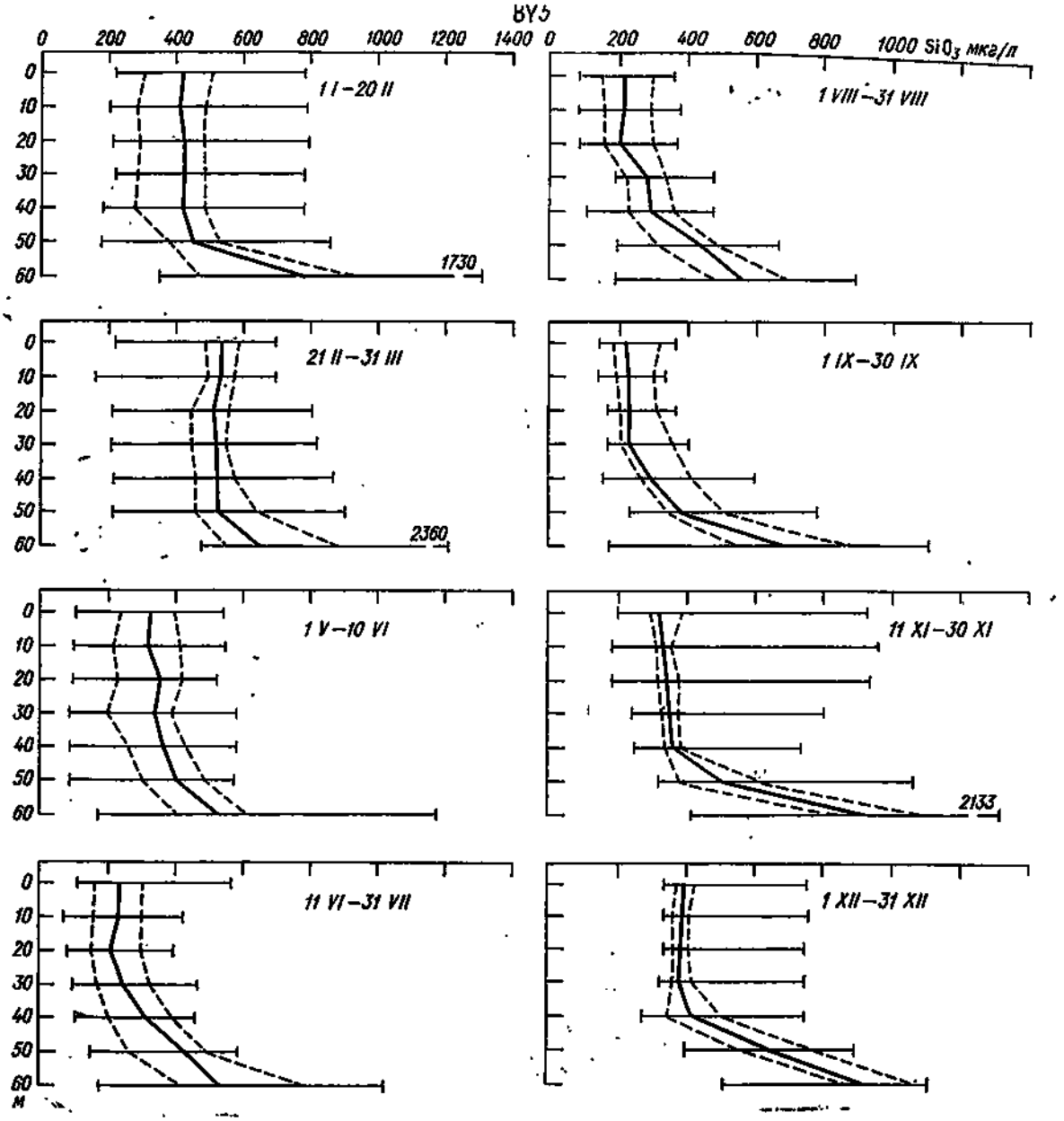


Рис. 14.52.

сравнимы между собой — лишь с недавних пор признаны сопоставимыми результаты определения первичной продукции и содержания хлорофилла «а», тогда как сравнение данных по обилию и видовому составу фитопланктона, полученных в разных странах и лабораториях, все еще остается проблематичным. С другой стороны, обнаружение многолетних тенденций затрудняется традиционным регламентом редких (4—6 раз в год) и растянутых во времени (1—3 недели) экспедиций, направленных на сбор данных о динамике функционирования фитопланктонного сообщества, характеризующейся широким спектром пространственной и временной изменчивости — от межгодовых изменений сроков наступления и продолжительности сезонных фаз развития экосистемы в разных районах моря до короткопериодной изменчивости синоптических масштабов и явлений «пятнистости».

Лишь при подготовке «Второй периодической оценки состояния морской среды Балтийского моря» [142] оказалось возможным использовать базу данных Хельсинкской комиссии, дополненную некоторыми национальными данными, для исследования изменений, имевших место на протяжении 1979—1988 гг., т. е. на интервале времени, характеризующемся хотя и высокими, но до известной степени стабильными концентрациями биогенов зимой. В то же время во второй половине 80-х годов наблюдались значительные межгодовые изменения суровости зим — холодные зимы в 1984—1987 гг. «обрамлены» исключительно теплыми зимами 1983/84 и 1987/88 гг. Это могло оказать значительное влияние на межгодовые изменения сезонной динамики фитопланктона и замаскировать многолетние тренды. Поэтому для уменьшения влияния межгодовой изменчивости эксперты Хельсинкской комиссии сопоставили данные, осредненные для двух периодов: 1979—1983 и 1984—1988 гг. При сравнении данных для летнего «квазиравновесного» сезона, когда функционирование фитопланктонного сообщества поддерживается поступлением биогенов извне и их регенерацией в верхних слоях моря, оказалось (табл. 15.3), что потенциальная первичная продукция повысилась во всех районах открытой

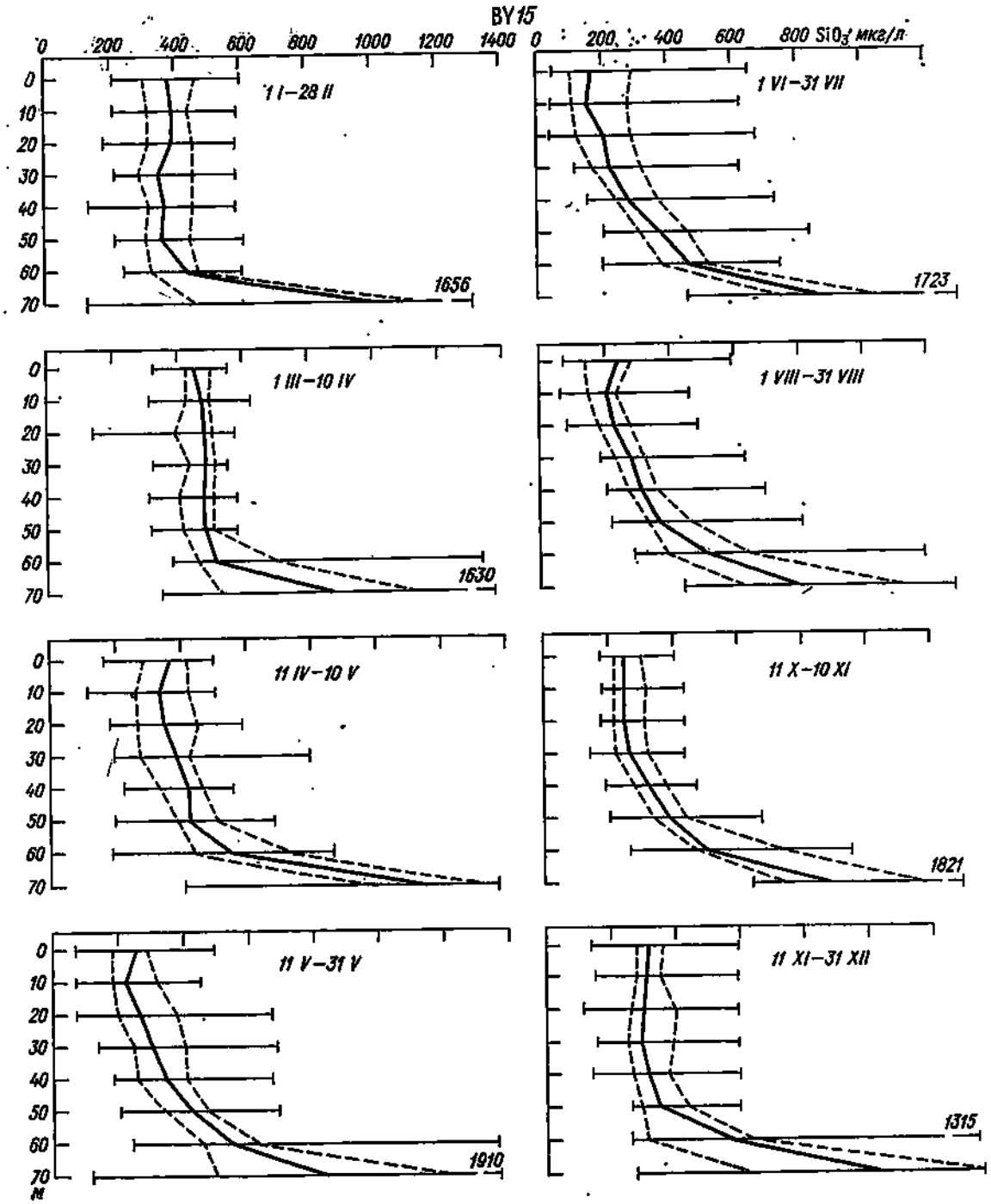


Рис. 14.52.

Балтики за исключением Арконского бассейна с его наивысшими значениями. Концентрация хлорофилла «а» увеличилась везде, кроме Арконского и Борнхольмского бассейнов, и повсеместно возросло ассимиляционное число (АЧ), которое является мерой фотосинтетической активности клеток и в условиях постоянной освещенности, используемой при измерениях потенциальной первичной продукции, указывает на степень их обеспеченности биогенными элементами.

Однако, несмотря на увеличение биомассы фитопланктонного сообщества в открытых районах моря, изменений в его видовом составе выявить не удалось.

Отрицательный баланс кремния (см. п. 15.1), никогда не считавшегося ранее в балтийских условиях лимитирующим биогеном, также можно рассматривать как косвенное указание на увеличение первичной продукции, вызванное возрастанием содержания азота [505, 509]. Уменьшение содержания кремния в воде может происходить в соответствии со следующей схемой. Благодаря увеличению зимнего фонда нитратов происходит усиление весеннего цветения диатомовых водорослей, извлекающих силикаты для построения оболочки своих клеток. Значительная часть клеток, созданных весной, оседает на дно, не будучи использованной в пелагиали. Поэтому возрастание первичной продукции диатомовых водорослей неминуемо ведет к обеднению водной толщи силикатами.

Зоопланктон. Основными факторами, определяющими динамику общей численности и биомассы зоопланктона в открытой Балтике, являются термический режим и обеспеченность пищей (см. гл. 4).

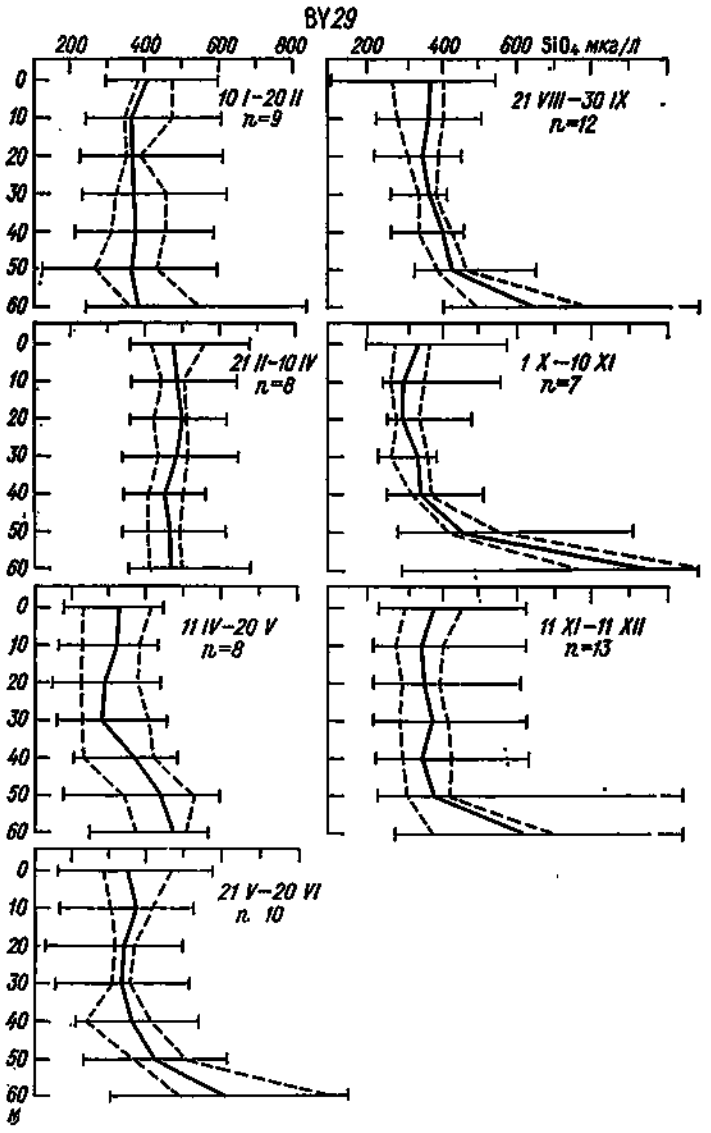


Рис. 14.52.

Поэтому в 80—90-х годах возможная реакция зоопланктонного сообщества на увеличение продукции и биомассы фитопланктона может быть существенно замаскирована отмеченными выше межгодовыми изменениями термического режима.

Тем не менее по данным международного мониторинга установлено, что на фоне существенных межгодовых колебаний численность мезозоопланктона в верхнем 25-метровом слое в летний период (июль—сентябрь) возросла в Арконском бассейне с 15—20 тыс. экз. в 1 м³ в 1979—1980 гг. до 30—40 тыс. экз. в 1 м³ во второй половине 80-х годов, в Борнхольмском бассейне — с 10 до 40 тыс. экз. в 1 м³ и в Восточном Готландском бассейне — с 8—10 до 16—18 тыс. экз. в 1 м³ [142]. В то же время заметных изменений видового состава на этом интервале времени выявить не удалось.

Более показательны результаты анализа долговременных систематических наблюдений, проведенные Е. М. Костричкиной с соавторами (см. «Многолетняя динамика зоопланктона» в [61. Вып. 4]), которые свидетельствуют об увеличении количества зоопланктона в 70-е и начале 80-х годов по сравнению с 50-ми и 60-ми годами во всех районах моря — биомасса рачкового планктона в летний период возросла в 1,5—2,0 раза и достигла уровня 600—800 мг/м. Увеличение биомассы и численности

Таблица 15.3

Средние значения содержания хлорофилла «а» (мг/м³) и потенциальной первичной продукции [мг С/(м³·ч)] в различных районах Балтийского моря в 1979—1983 и 1984—1988 гг.

Район	Хлорофилл «а»		Первичная продукция	
	1979—1983 гг.	1984—1988 гг.	1979—1983 гг.	1984—1988 гг.
Арконская впадина	2,7	2,5	10,9	10,4
Борнхольмская впадина	2,1	2,0	7,8	8,6
Готландская впадина	2,1	2,3	6,2	8,2
Северная Балтика	1,9	2,0	4,4	5,4

зоопланктонного сообщества сопровождалось относительными изменениями его видового состава — все большее значение приобретали псевдокалянус и босмина. Это в свою очередь привело к заметным изменениям трофической структуры — доля фитофагов, т. е. видов, способных извлекать наибольшую выгоду из увеличения биомассы и продукции фитопланктона, возросла с 65 % в 1960—1969 гг. до 80 % в 1980—1982 гг.

Зообентос. Благодаря наличию материалов долговременных наблюдений одним из наилучших биотических показателей как проявлений, так и последствий эвтрофикации Балтийского моря может служить динамика зообентоса, осуществляющего усвоение аллохтонного и автохтонного органического вещества, значительная часть которого поступает на дно, не будучи усвоенной в пелагиали. При этом в специфических условиях Балтийского моря реакция бентических сообществ на эвтрофикацию может оказаться (в зависимости от местоположения и глубины рассматриваемого района) прямо противоположной — от процветания сообществ до их гибели.

Непосредственным показателем улучшения условий питания, вызванного эвтрофикацией, является произошедшее за последние несколько десятков лет многократное возрастание биомассы зообентоса, населяющего обширные площади дна, расположенные выше галоклина (А. А. Ярвекюльг, С. Н. Оленин. «Зообентос» в [61. Вып. 4], а также [136, 142, 177]). Однако анализ обширных материалов видео- и фотосъемок позволил Румору [142] описать не рассматривавшуюся ранее схему процессов, приводящих к ухудшению состояния зообентоса и в относительно мелководных районах: с усилением седиментации органического вещества из водной толщи и увеличением биомассы зообентоса возрастает биохимическое потребление кислорода, расходуемого как на дыхание животных, так и на бактериальную минерализацию детрита; содержание кислорода на поверхности дна понижается до таких значений, при которых наступает гибель животных, что, с одной стороны, еще более увеличивает количество разлагающегося органического вещества, а с другой — ведет к прекращению биотурбации грунта и аэрации его верхних слоев; в отсутствие зообентоса за деструкцию органического вещества принимаются серные бактерии *Beggiatoa*, могущие существовать лишь в тонком пограничном слое между серо-

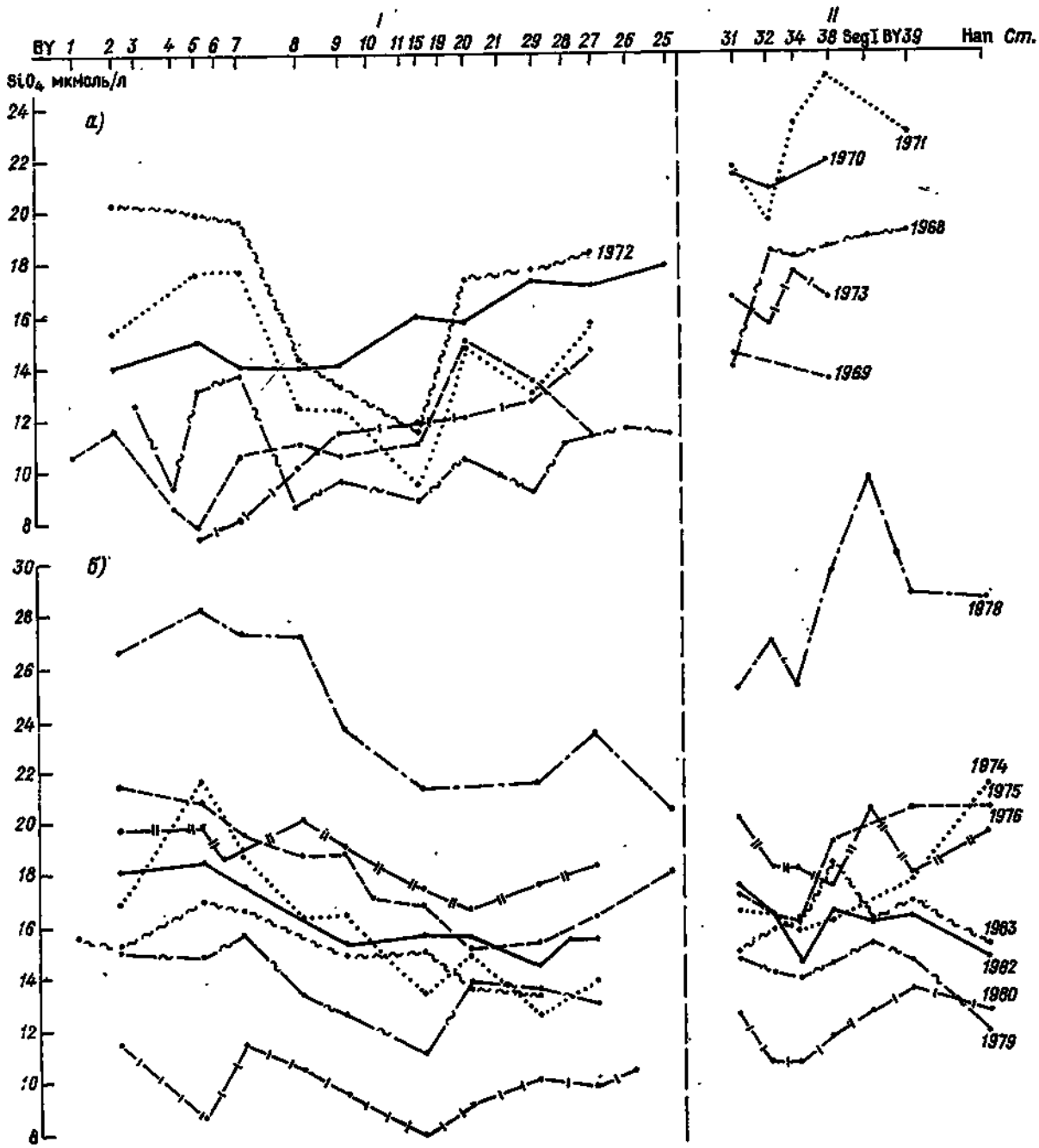


Рис. 14.53. Концентрации силикатов в зимний период на поверхности восточного (I) и западного (II) продольных разрезов Балтийского моря по данным шведских наблюдений, сгруппированным по годам.
Схема расположения станций показана на рис. 12.28 *г*.

водородным илом и придонной водой со следами кислорода; в результате возникает положительная обратная связь, препятствующая реколонизации «мертвого» дна.

На участках дна, расположенных ниже галоклина, т. е. подверженных смене аэробных и анаэробных условий, гибель животных, наступающая при содержании кислорода менее 1—2‰ по объему, приводит к образованию «бентических пустынь», охватывающих десятки тысяч километров дна [123], а при временном улучшении кислородных условий происходит реколонизация тех или иных ареалов (см. рис. 12.29, 12.30). При этом наихудшие условия складываются в центральной части Готландской впадины, как менее доступной адвективной и турбулентной аэрации. Начиная с 30-х годов, когда отсутствие зообентоса было зарегистрировано на глубине 230 м, здесь постоянно существует ареал, в котором донная фауна полностью отсутствует. Размеры этого ареала то увеличивались, то уменьшались в связи с изменением площади анаэробной зоны и в конце 80-х годов нижняя граница распространения макрозообентоса находилась на глубине 110—120 м (А. А. Ярвекюльг, С. Н. Оленин. «Зообентос» в [61. Вып. 4], а также [136, 142]). Однако и в ходе реколонизации, наступающей при временном улучшении кислородных условий в тех или иных районах, прежнее состояние зообентоса обычно не восстанавливается — происходит значительное уменьшение его обилия и смена видового состава, в частности сообщества двустворчатых моллюсков сменяются сообществами полихет [136]. В последние годы реколонизация протекала более успешно в Северной Балтике и в западной части Готландского бассейна,

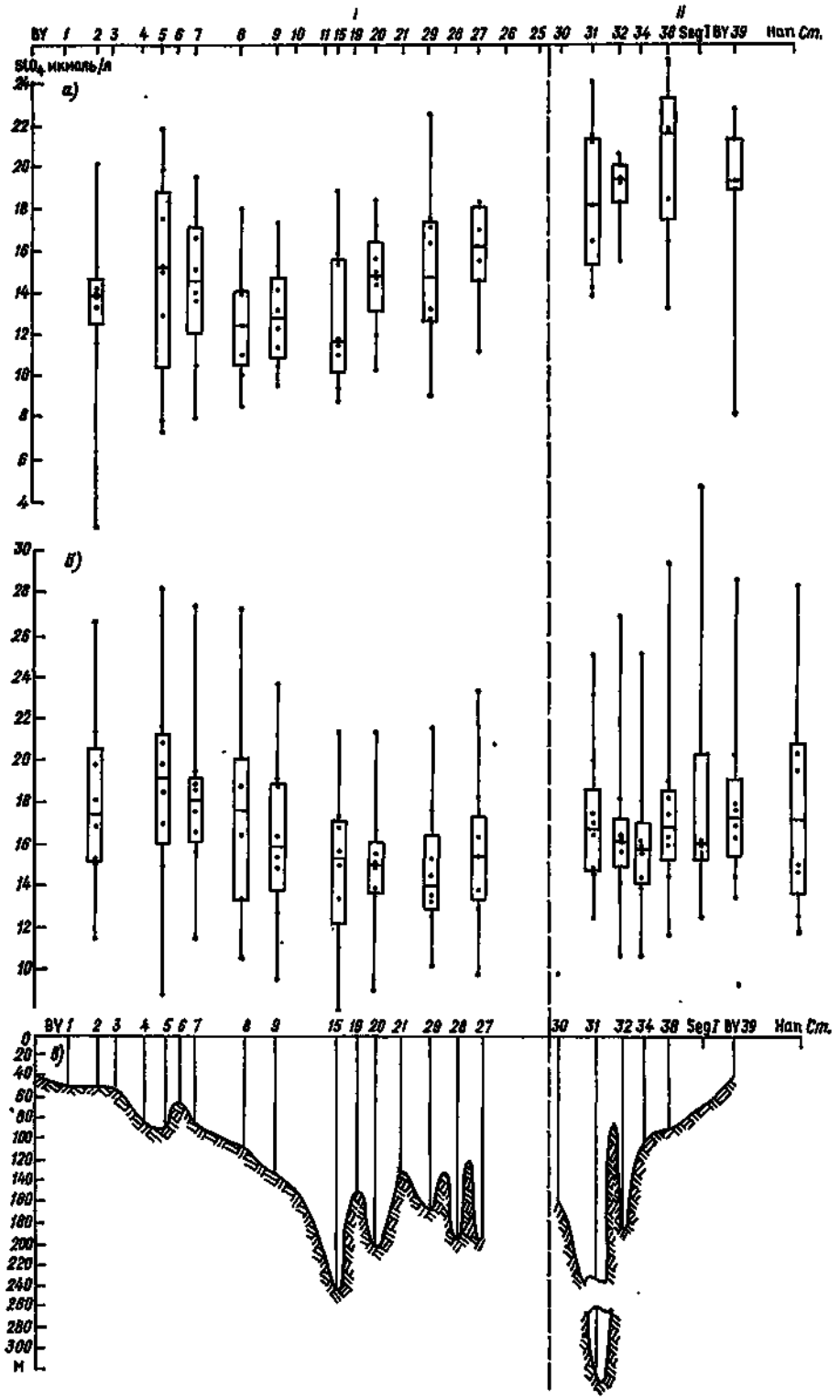


Рис. 14.54. Результаты квартильного анализа данных, представленных на рис. 14.53.

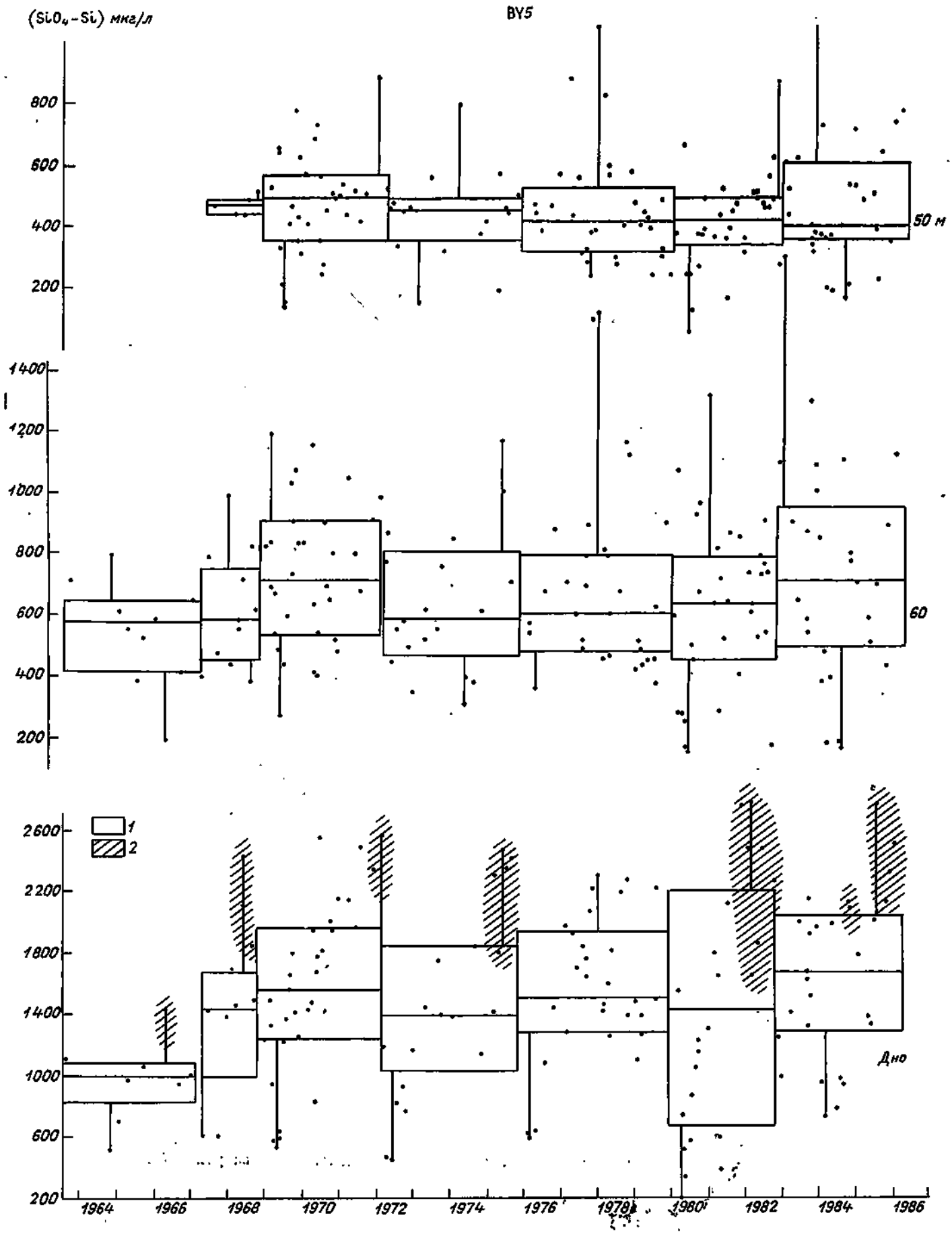


Рис. 14.55. Квартильные оценки концентраций силикатов в глубинном слое Борнхольмской впадины (ст. BY 5), юго-восточной части Готландской котловины (ст. BY 9), Готландской впадины (ст. BY 15) и северной части моря (ст. BY 29).

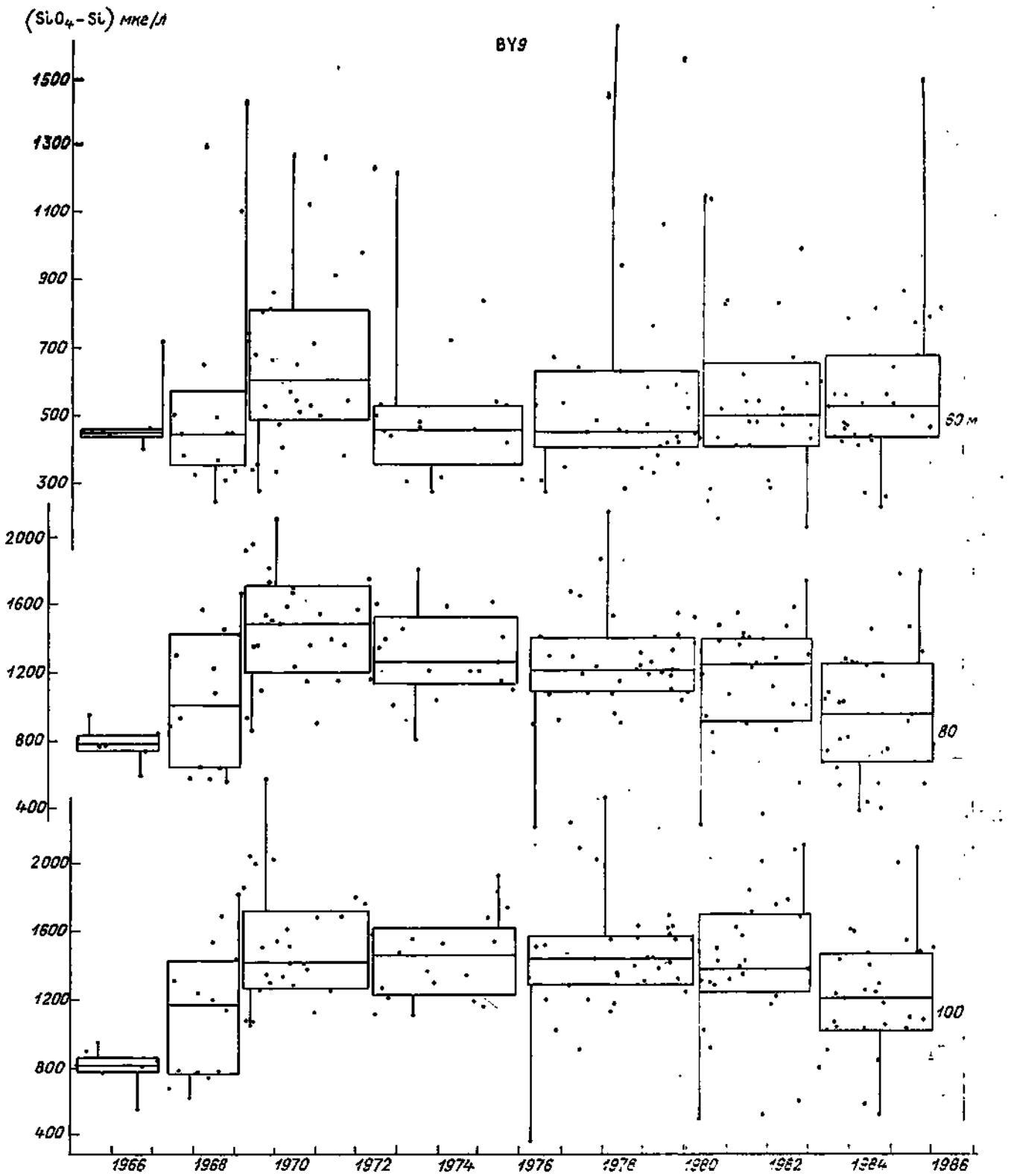

(SiO_4-Si) мкг/л
BY9
1500
1300
1100
900
700
500
300
60 м
2000
1600
1200
800
400
80
2000
1600
1200
800
400
100
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1984
1986

Рис. 14.55.

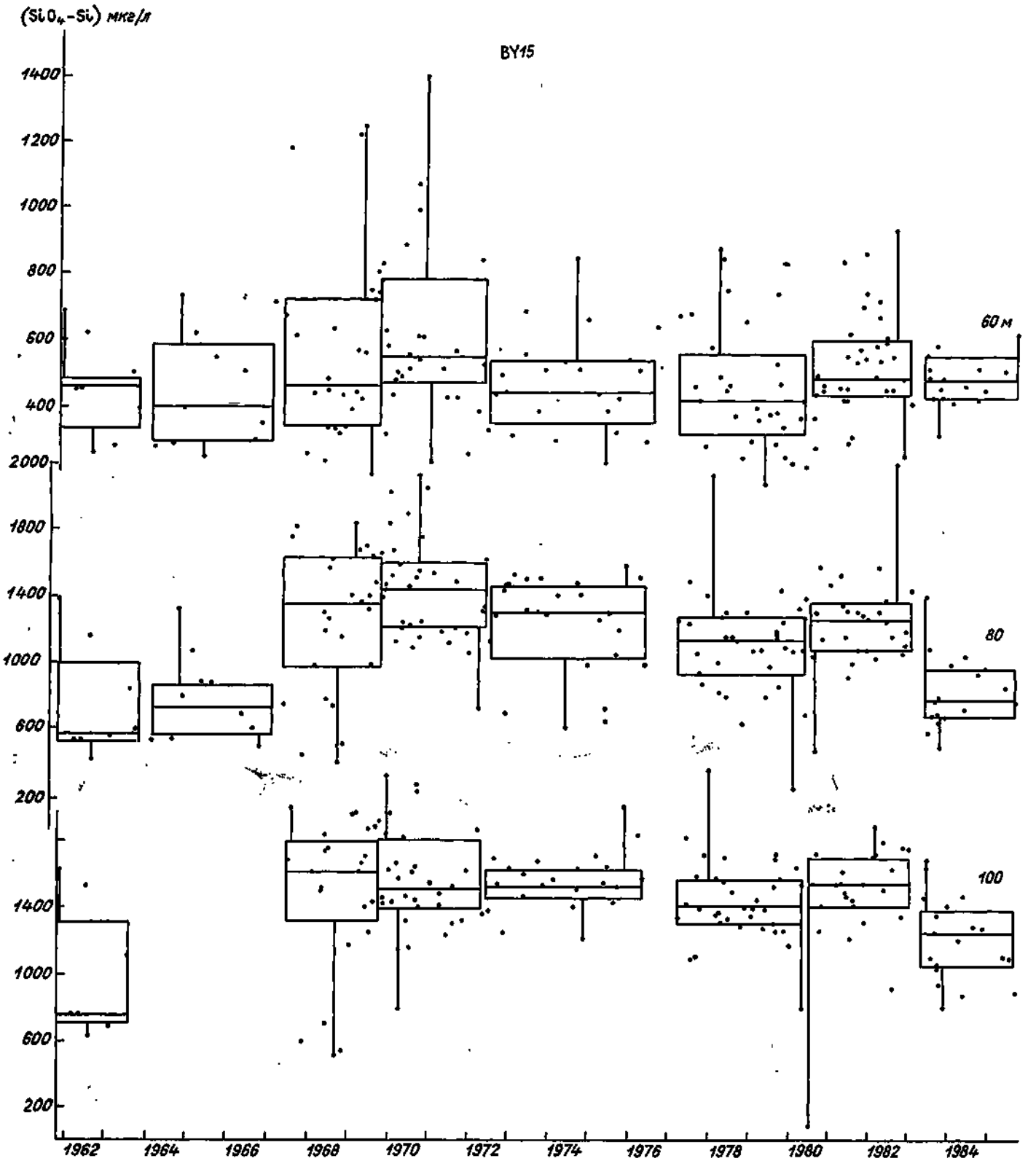

(SiO4-Si) мкг/л
BY15
1400
1200
1000
800
600
400
2000
1800
1400
1000
600
200
1400
1000
600
200
60 м
80
100
1962
1964
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1984

Рис. 14.55.

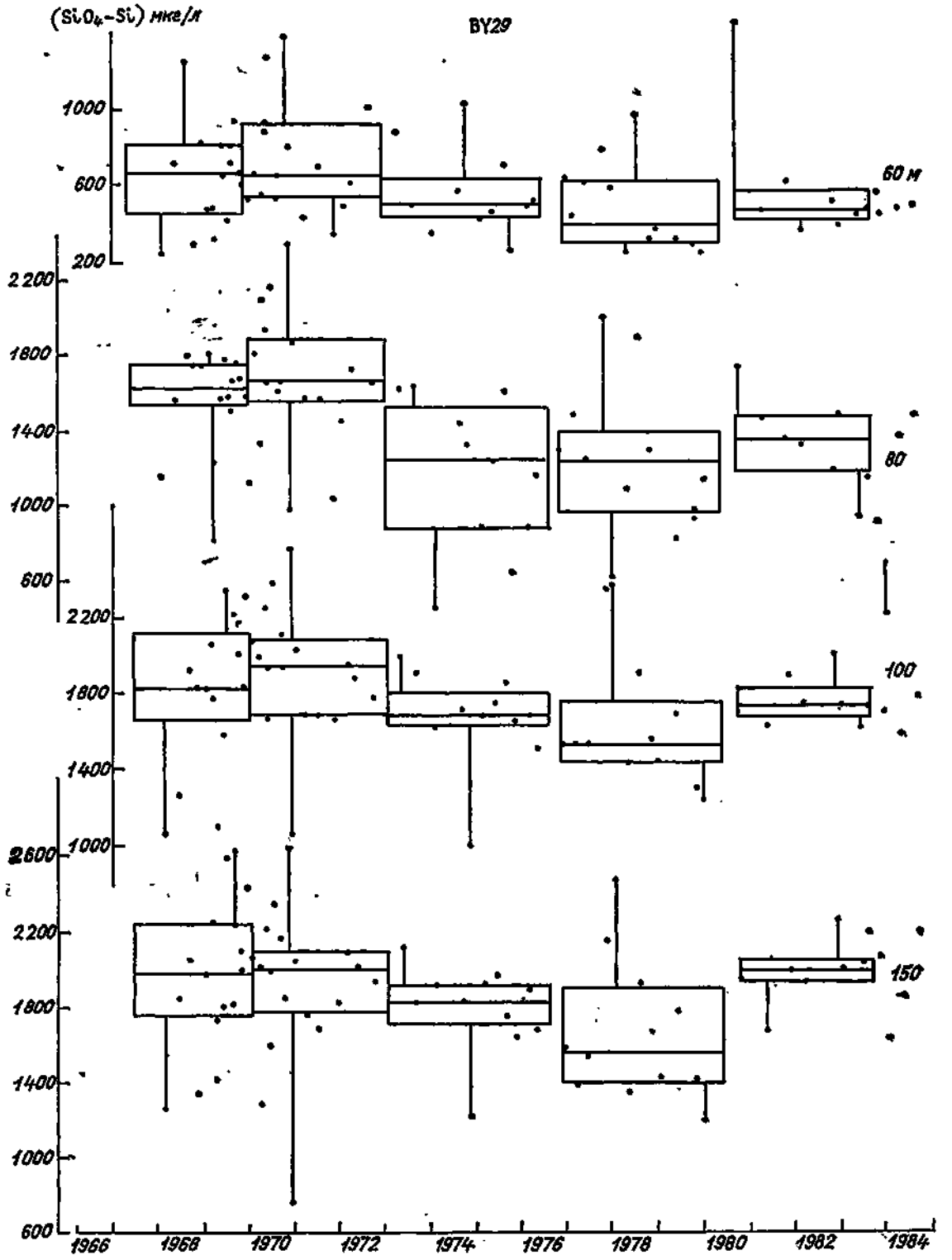

(SiO4-Si) мкг/л
BY29
60 м
80
100
150
1000
600
200
2200
1800
1400
2600
1966
1968
1970
1972
1974
1976
1978
1980
1982
1984

Рис. 14.55.

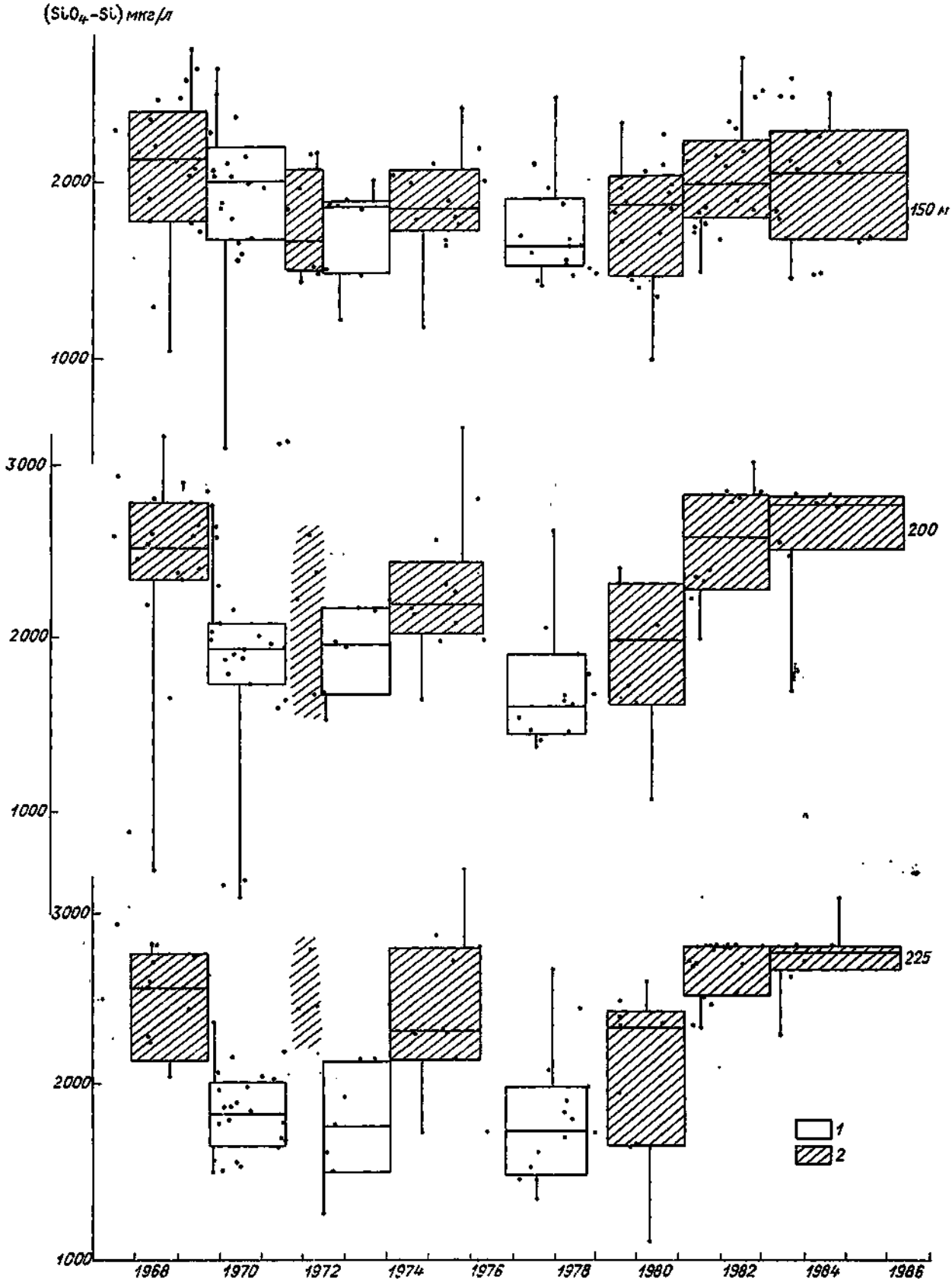


Рис. 14.56. Квартильные оценки концентраций силикатов в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

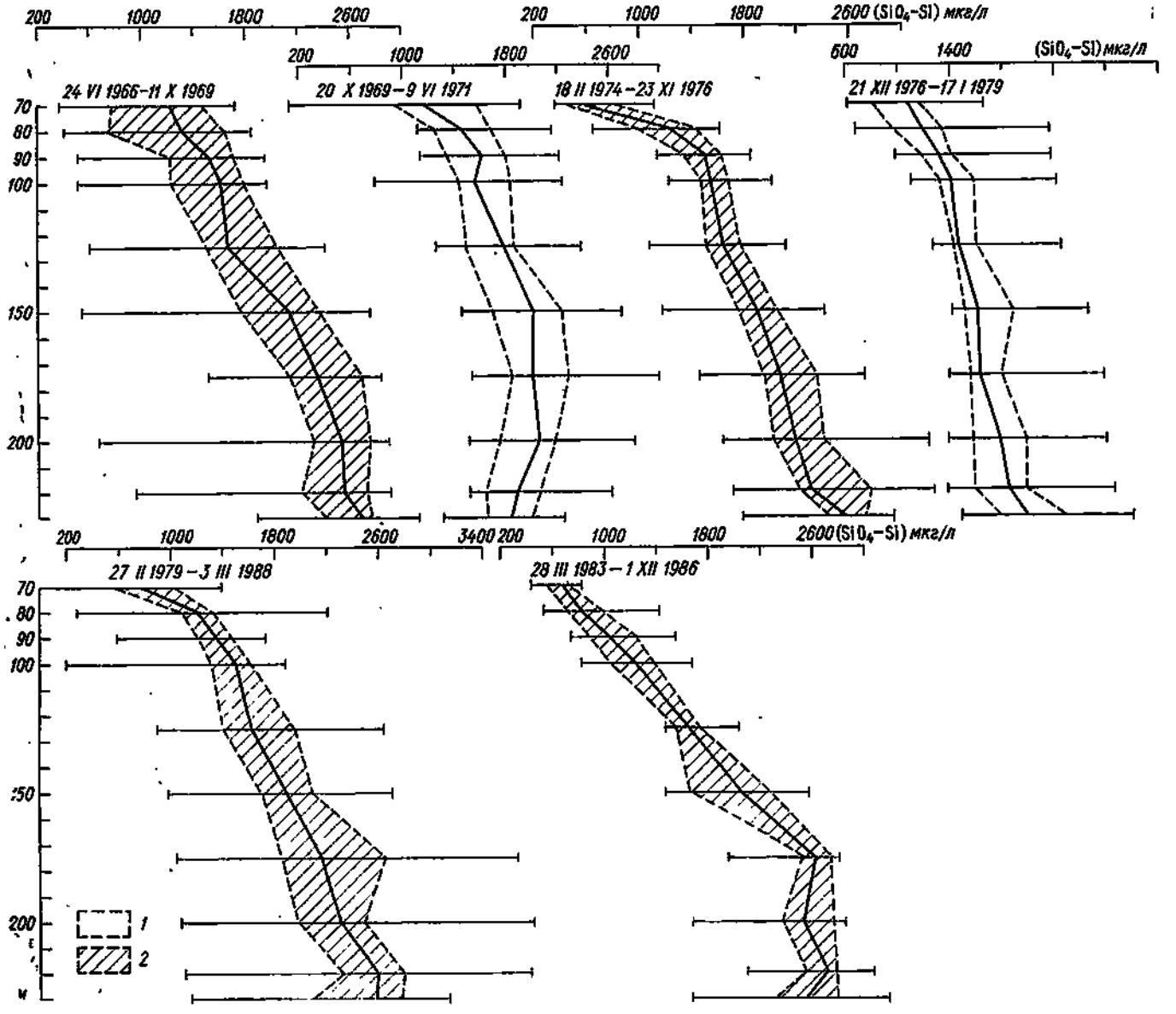


Рис. 14.57. Вертикальное распределение квартильных оценок концентраций силикатов в глубинном слое Готландской впадины (ст. BY 15) при кислородных (*1*) и сероводородных (*2*) условиях у дна.

тогда как в Борнхольмской и Гданьской впадинах периоды восстановления становятся все короче [142].

Рыбы. Последствия эвтрофикации можно также пытаться обнаружить на верхних уровнях трофической сети, представляющих для человека непосредственный практический интерес, — в динамике запасов и уловов рыбы. За последние 25 лет вылов рыбы в Балтийском море увеличился вдвое и достиг почти 1 млн т, 80—90 % которых приходится на долю наиболее важных в коммерческом отношении трески, сельди и шпрота [61, 276, 390].

Однако к интерпретации данных по промысловой статистике и расчетным оценкам запасов рыбы в море как к проявлениям эвтрофикации следует подходить с большой осторожностью: увеличение уловов может быть связано не столько с возрастанием запасов рыбы, сколько с совершенствованием методов разведки и добычи рыбы, а возрастание запасов может быть вызвано не только улучшением пищевых условий, связанным в эвтрофикацией, но и 30-кратным снижением выедания рыбы тюленями.

Наиболее благоприятной эвтрофикация может оказаться для шпрота, имеющего пелагическую икру и питающегося преимущественно зоопланктоном. Поэтому увеличение в последние годы уловов шпрота могло происходить не только вследствие снижения его выедания треской, оказавшейся в неблагоприятных условиях (см. ниже), но и в результате улучшения кормовой базы самого шпрота.

Воздействие эвтрофикации на сельдь, уловы которой в Балтийском море находились в последние годы на довольно стабильном уровне, может быть как положительным — вследствие улучшения кормовых условий, так и отрицательным — в результате ухудшения условий воспроизводства в гипертрофных прибрежных районах.

Наименее благоприятным современное состояние экосистемы Балтийского моря оказывается для трески, воспроизводство и последующее развитие которой определяется не столько кормовой базой, увеличивающейся вследствие эвтрофикации, сколько толщиной нерестового слоя воды и нерестовой площадью, ограниченными сверху изогалинами 10—

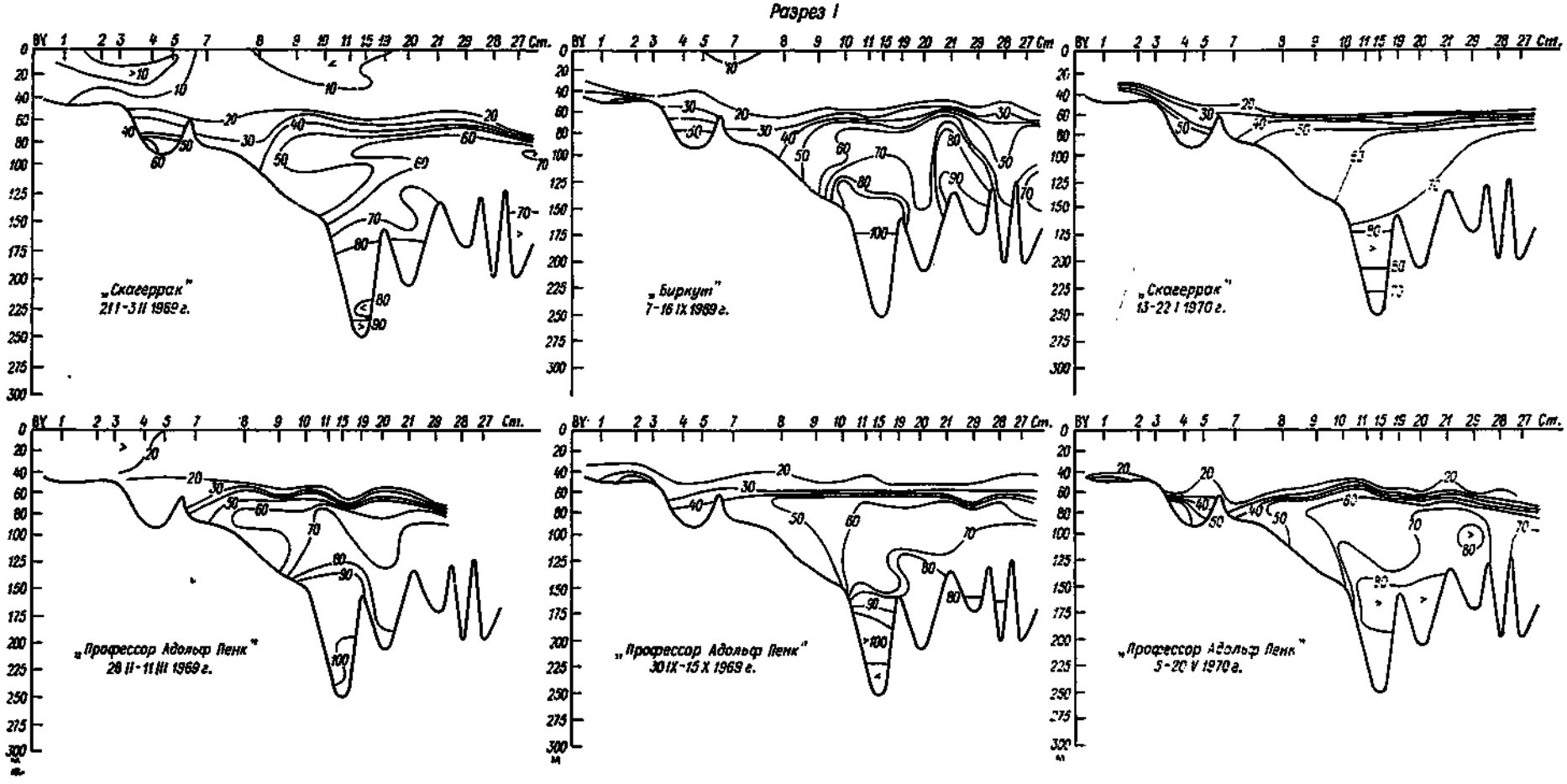


Рис. 14.58. Распределение концентраций силикатов на восточном (I) и западном (II) продольных разрезах Балтийского моря в 1969—1970 гг.

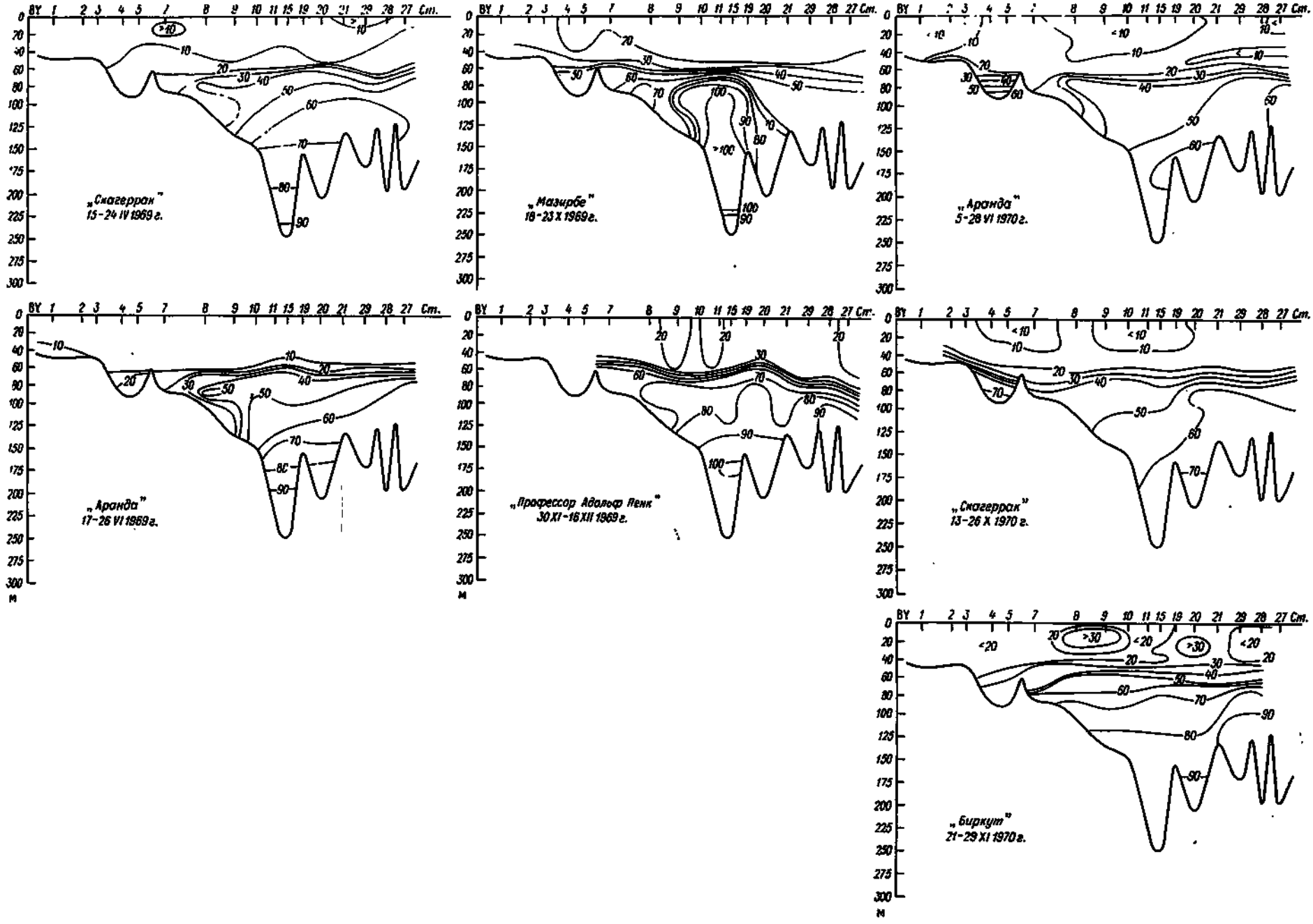

„Скагеррак"
15-24 IV 1969 г.
„Мазирбе"
18-23 X 1969 г.
„Аранда"
5-28 VI 1970 г.
„Аранда"
17-26 VI 1969 г.
„Профессор Адольф Пенк"
30 XI-16 XII 1969 г.
„Скагеррак"
13-26 X 1970 г.
„Биркут"
21-29 XI 1970 г.
BY 1 2 3 4 5 7 8 9 10 11 15 19 20 21 29 28 27 Cm.
м

Рис. 14.58.

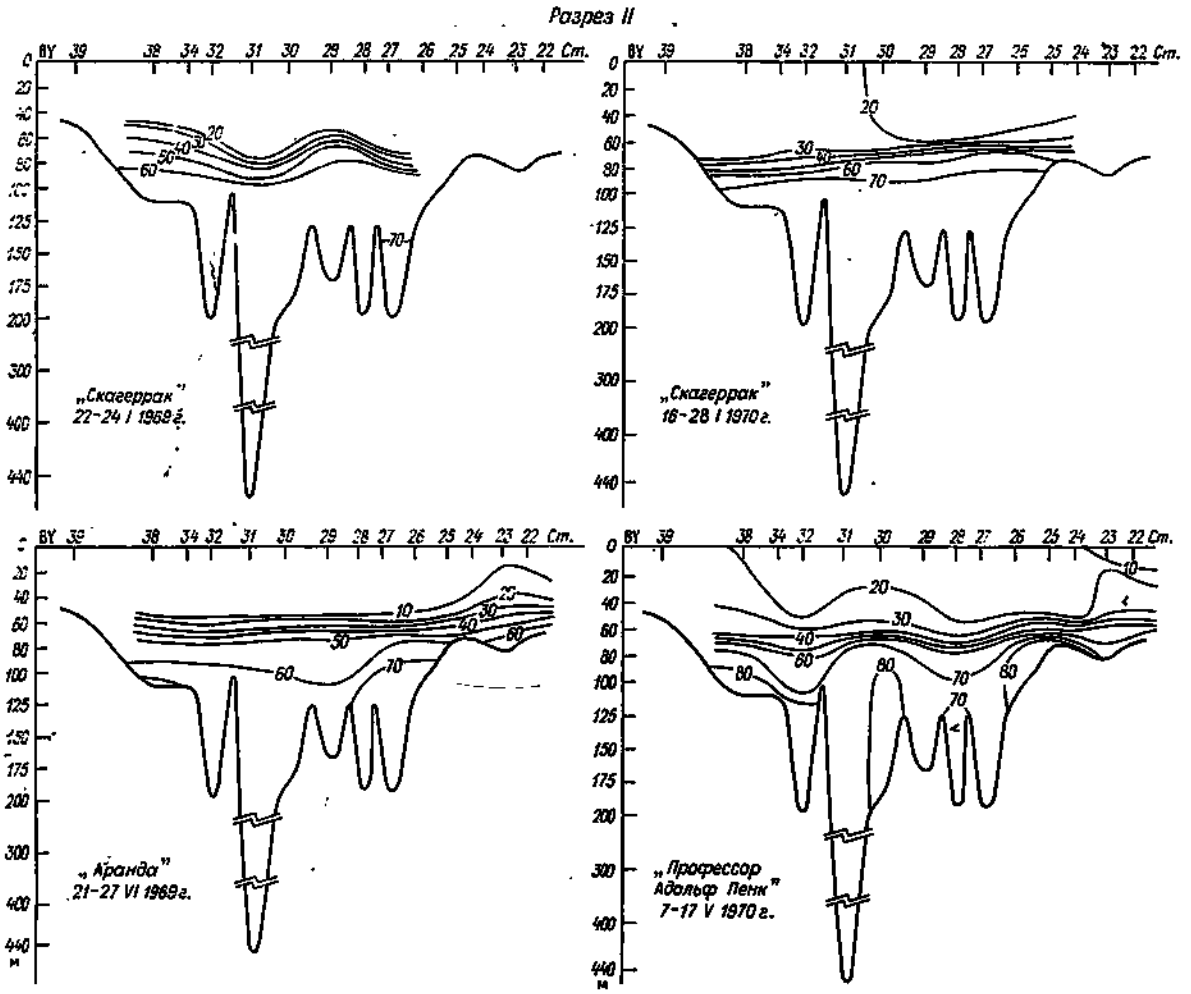


Рис. 14.58.

11 %, а снизу изооксигенами 1—2 ‰ по объему. Совмещение двух эффектов — заглубления изогалин вследствие уменьшения солености, продолжающегося в течение 80-х — 90-х годов, и подъема изооксиген вследствие расширения сероводородной зоны в глубоководных впадинах Балтийского моря — приводит к сокращению нерестового слоя с 30—70 до 5—15 м.

Подводя итог рассмотрению основных проявлений эвтрофикации в открытых районах Балтийского моря, можно констатировать, что взятые в совокупности они, по-видимому, не оставляют сомнений в самом факте повышения суммарного содержания биогенов и органического вещества, а также в увеличении биологической продуктивности моря, т. е. в его эвтрофировании.

15.3. Структурно-функциональная схема и причины эвтрофикации

Наряду с рассмотренными в п. 15.2 проявлениями (последствиями) эвтрофикации, к ее прямым доказательствам относятся высокие и положительные балансы азота и фосфора (см. табл. 15.1 и 15.2), несомненно свидетельствующие об их накоплении в Балтийском море. Ведущая роль в формировании приходной части балансов принадлежит речному стоку с бассейна водосбора с интенсивным сельским и лесным хозяйством, а также коммунальным и промышленным стокам, что вкупе со сравнительно малыми временными масштабами процесса эвтрофирования, казалось бы, прямо указывает на его антропогенный характер. В то же время среди исследователей Балтийского моря все еще продолжается начатая Фонселиусом [225] в 1969 г. дискуссия о роли и соотношении природных и антропогенных факторов эвтрофикации [8, 73, 366, 387, 440]. Существо этой дискуссии можно пояснить, если от схемы, на которой представлены лишь свойственные всем природным водоемам однонаправленные цепочки причинно-следственных отношений, но практически отсутствуют важнейшие обратные связи (см. рис. 15.1), перейти к схеме, показывающей взаимосвязь между специфическими для Балтики изменениями гидрологической структуры моря, обусловленными природными воздействиями, и основными проявлениями эвтрофикации (рис. 15.4).

Как показывает эта схема (см. также описание соответствующих процессов в пп. 10.2, 10.3 и гл. 12 и 14), ряд ключевых симптомов эвтрофикации может проявляться и в отсутствие поступления биогенов и органического вещества извне. Повышение концентраций биогенов в поверхностных слоях моря может произойти и вследствие усиления вертикального обмена, обусловленного как интенсификацией переноса через галоклин при уменьшении градиентов солености, так и увеличением градиентов биогенов в результате возрастания их концентраций в глубинных слоях. Смена окислительно-восстановительных условий, приводящая к радикальным изменениям гидрохимических условий в глубинных слоях, определяется балансом между физико-механической аэрацией и биохимическим потреблением кислорода и может происходить вследствие ослабления

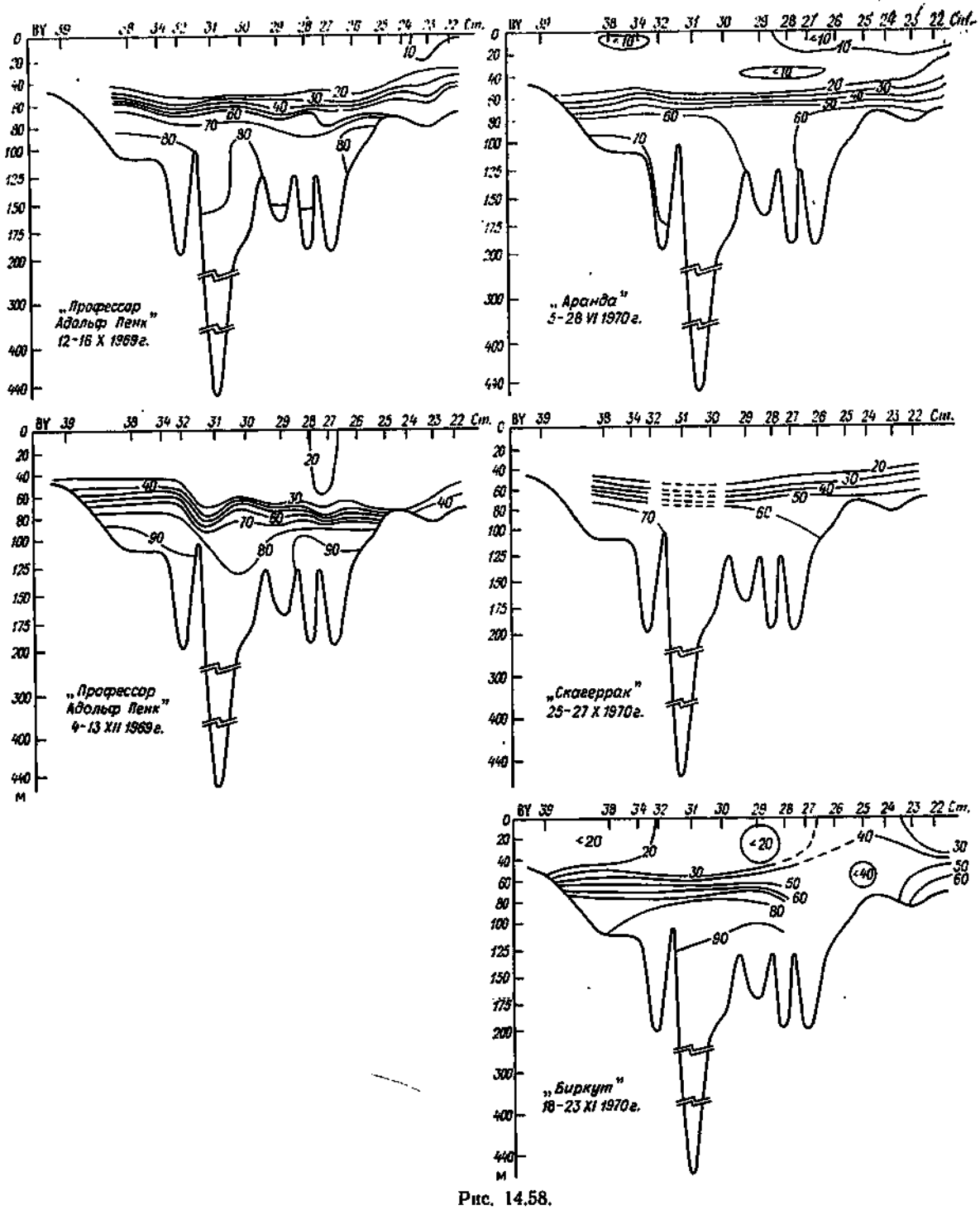


Рис. 14.58.

горизонтального и вертикального транспорта и без усиления минерализации. Поэтому и без увеличения нагрузки возможно возрастание первичной продукции и возникновение анаэробных зон, что приводит к интенсификации кольца положительной обратной связи: увеличение продукции → усиление биохимического потребления кислорода → расширение анаэробных зон → высвобождение фосфатов со дна → перенос в верхние слои → увеличение продукции, включающее интенсификацию цветения азотфиксирующих сине-зеленых водорослей, стимулированную избытком фосфора по сравнению с азотом.

Не повторяя здесь детальный критический разбор подобной аргументации, проделанный в [73] с учетом отрицательных обратных связей, обусловленных непостоянством природных воздействий, конечностью запасов биогенов в донных отложениях, лимитирующей ролью азота и его выводом из системы в результате денитрификации и другими факторами, подчеркнем, что сама постановка вопроса об альтернативном — природном или антропогенном — характере эвтрофикации представляется неправомерной. Как следует даже из упрощенной схемы (см. рис. 15.4), речь должна идти лишь о динамическом соотношении природных и антропогенных факторов эвтрофикации, меняющемся в зависимости от изменений природных и антропогенных воздействий. При исследованиях и тем более в попытках предсказания такого соотношения необходимо перейти от все еще распространенного [8, 239, 387] поиска и объяснения отдельных механизмов или проявлений эвтрофикации, рассматриваемых порознь, к анализу эвтрофикации, понимаемой как изменение, нарушение сбалансированности биогеохи-

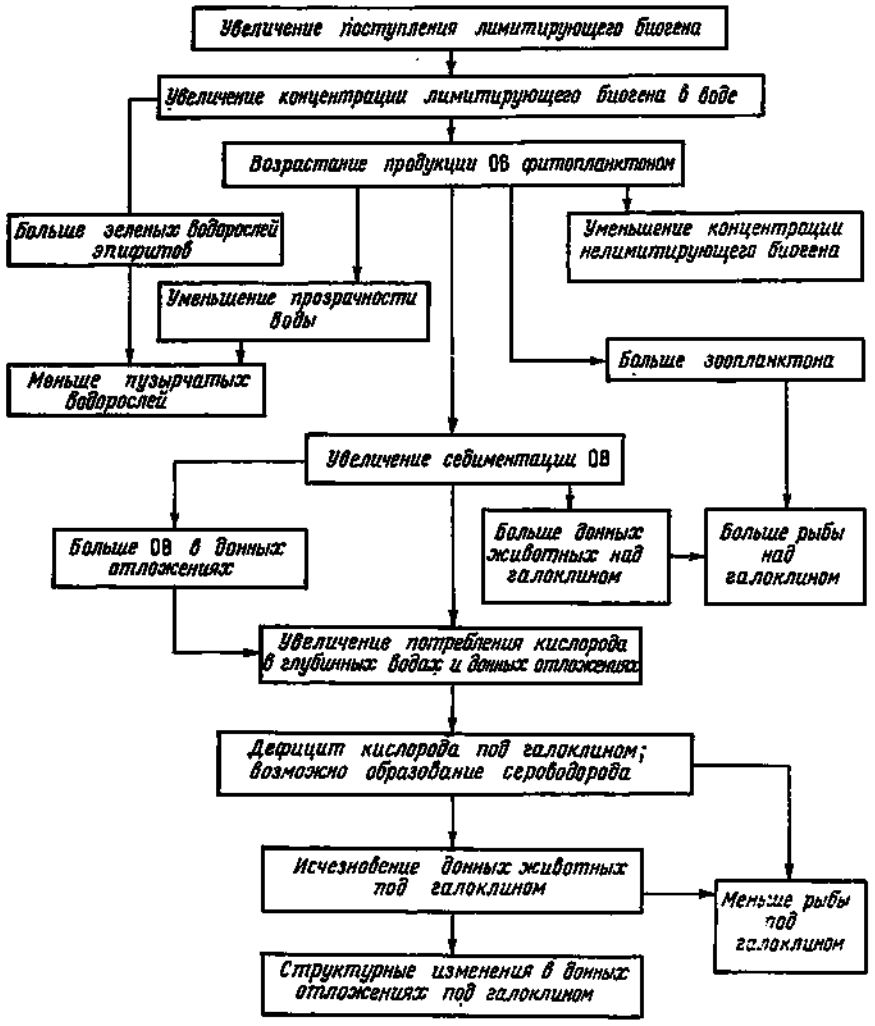


Рис. 15.1. Эвтрофикация Балтийского моря и ее последствия (по [366]).

мического круговорота вещества, осуществляемого процессами транспорта, трансформации и обмена через границы морской системы [73, 78, 443]. Наиболее адекватным методом решения такой сложной, (эко-)системной по своей сути задачи является создание и исследование имитационных моделей, позволяющих на единой основе и в комплексе воспроизводить все основные звенья биогеохимического круговорота вещества, т. е. механизм эвтрофикации.

К таким моделям относится модель многолетней динамики вещества в Балтийском море, разработанная в ЛО ГОИНе в рамках проекта «Балтика» [78, 79, 445]. Эта резервуарная модель описывает круговорот лабильной фракции органического углерода D_i, минеральных форм азота N_i и фосфора P_i в водах над ($i=1$) и под ($i=2$) галоклином, в донных отложениях мелководья ($i=3$) и глубоководных впадин ($i=4$), а также динамику кислорода в водах под галоклином R.

Биогеохимический круговорот в климатических масштабах осуществляется процессами транслокации (продукция и деструкция органического вещества, денитрификация), транспорта (обмен через галоклин, апвеллинг глубинных вод, оседание органического вещества, захоронение в донных отложениях, обмен растворенными соединениями между дном и водой) и обмена с окружающей морскую экосистему средой (атмосферой, сушей, прол. Каттегат и Ботническим заливом). Для воспроизведения межгодовых изменений все внешние воздействия задаются в виде рядов средних годовых или суммарных значений.

Удовлетворительное соответствие между результатами моделирования и данными наблюдений (рис. 15.5), а также между смоделированными и содержащимися в литературе оценками скоростей различных процессов [79, 444] позволяет использовать модель как для исследования соотношения природных и антропогенных факторов эвтрофикации Балтийского моря, так и для попыток предсказания состояния его эвтрофирования в будущем.

На рис. 15.5 представлены результаты двух численных экспериментов с заданием одинаковой динамики всех природных воздействий. В одном из них антропогенные нагрузки заданы линейно возрастающими на всем интервале моделирования, в другом для имитации отсутствия усиления антропогенного воздействия — неизменными на уровне 1951 г. Из сравнения результатов этих экспериментов ясно видно, что различия в динамике компонентов модели, вызванные различиями «антропогенного» воздействия, указывают на более правдоподобное поведение модели при возрастающих нагрузках. В соответствии с существующими представлениями и данными наблюдений содержание органического вещества в море и биогенов над галоклином увеличивается, низко и относительно более изменчиво со-

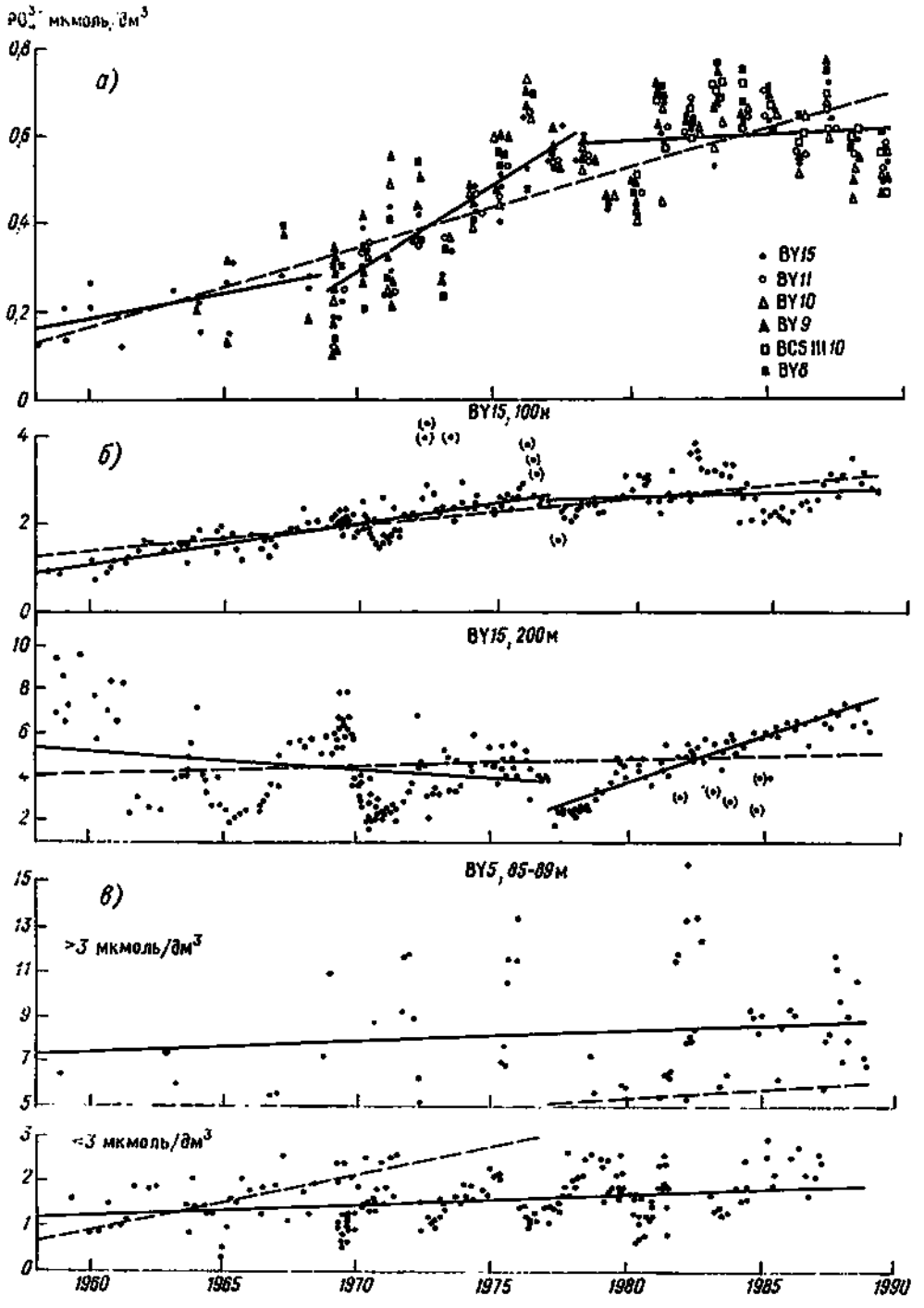


Рис. 15.2. Многолетние изменения содержания фосфатов в январе—апреле на поверхности различных районов моря (*а*), в активном глубинном слое и в придонном слое Готландской впадины (*б*), в придонном слое Борнхольмской впадины (*в*) (по [400]).

держание кислорода в глубинных водах, из-за денитрификации сильно изменяются концентрации минерального азота под галоклином и т. п. В то же время характер межгодовых изменений, обусловленных природными факторами, остается неизменным — моменты наступления экстремумов для большинства переменных совпадают.

Эти результаты можно считать убедительным свидетельством того, что в многолетном масштабе ведущей причиной эвтрофикации Балтийского моря является возрастание антропогенной нагрузки органического вещества и биогенов, тогда как изменениями природных факторов определяются лишь фоновые межгодовые колебания, усиливающие или ослабляющие антропогенное воздействие.

На рис. 15.5 представлены также результаты трех численных экспериментов [77, 444], в которых на прогнозируемом интервале до 2000 г. природные воздействия заданы теми же, что и на протяжении 50-х годов, а внешние нагрузки органическим веществом и биогенами задавались в соответствии со следующими сценариями:

— продолжающееся линейное возрастание нагрузок с теми же коэффициентами, что и для 1951—1987 гг.;

— постоянные нагрузки на уровне 1987 г.;

— снижение нагрузок с суши (в соответствии с обязательствами стран—участниц Хельсинкской

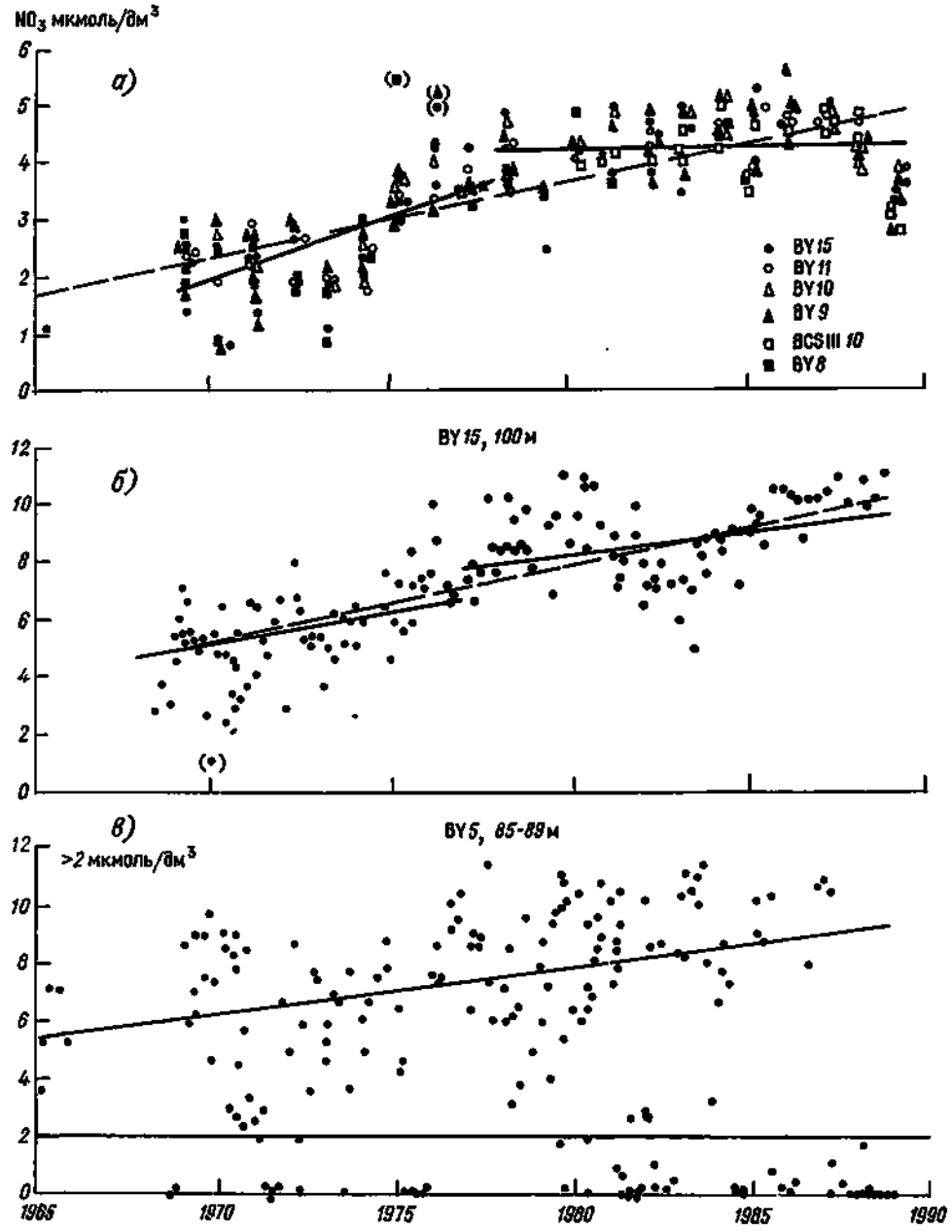


Рис. 15.3. Многолетние изменения содержания нитратов в январе—апреле на поверхности различных районов моря (*а*), в активном глубинном слое Готландской впадины (*б*) и у дна Борнхольмской впадины (*в*) (по [400]).

конвенции) и из атмосферы вдвое за каждые 5 лет начиная с 1990 г.

Анализ этих экспериментов показывает, что интенсивность и общий объем круговорота вещества в экосистеме определяется уже достигнутым высоким уровнем эвтрофирования и одного снижения антропогенных нагрузок может оказаться недостаточно, чтобы быстро улучшить ситуацию и обратить эвтрофикацию вспять. Как показали дополнительные эксперименты [444], даже весьма интенсивный, но единичный заток североморских вод способен привести лишь к кратковременному повышению концентрации кислорода в глубинных водах, но затем, со сдвигом в несколько лет, наступает то же самое быстрое падение содержания кислорода. Это означает, что все основные проявления эвтрофикации в открытых водах Балтийского моря будут сохраняться в течение довольно длительного времени, возможно, десятилетий, несмотря на предпринимаемые в странах Балтийского региона усилия по снижению нагрузок загрязнения.

К сходным заключениям относительно современного уровня эвтрофирования и возможностей его снижения приходят также и шведские исследователи на основе расчетов динамических балансов и времени пребывания биогенов в Балтийском море, а также используя значительно более примитивную эмпирическую балансовую модель [507, 509].

Вышеперечисленные результаты были учтены при оценке возможного изменения состояния вод открытого моря и прибрежной зоны в зависимости

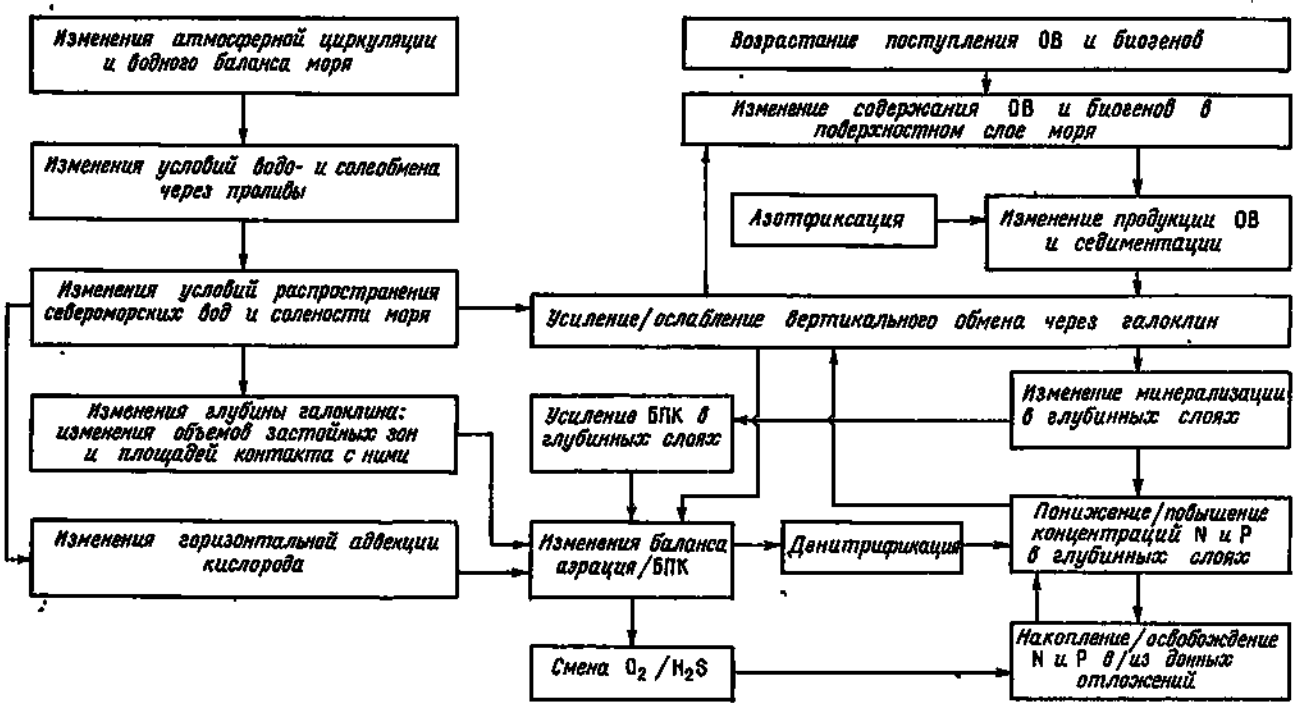


Рис. 15.4. Взаимодействие природных и антропогенных факторов эвтрофикации Балтийского моря.

от природоохранных мероприятий [504]. Было констатировано, что вследствие рассмотренных механизмов эвтрофирования и уже достигнутой высокой степени эвтрофикации Балтийского моря не приходится ожидать быстрого улучшения ситуации ни в открытых водах, ни в районах так называемого открытого побережья даже при значительных вложениях в водоочистные мероприятия. Относительно быстрое локальное улучшение может произойти лишь в полузамкнутых заливах и бухтах до уровня, определяемого условиями, складывающимися на соседних акваториях открытого моря. Для снижения же общего уровня эвтрофирования требуется осуществление обширных долговременных программ структурной перестройки сельского хозяйства и внедрения экосберегающих технологий.

16. ЗАГРЯЗНЕНИЕ

16.1. Проблемы охраны среды

В последние десятилетия отмечается существенное антропогенное воздействие на Мировой океан, ведущее к изменению ряда его характеристик и свойств и приобретающее такие масштабы, что может оказывать неблагоприятное влияние на биологические ресурсы моря и, в конечном счете, стать опасным для самого человека.

Балтийское море считается одним из наиболее чувствительных к загрязнению, так как принимает воды около 250 рек, бытовые и промышленные стоки районов с населением 17 млн человек. Концентрированию в море загрязняющих веществ с высокой химической и биохимической устойчивостью способствуют небольшой объем воды (20 500 км^3) и медленный водообмен через Датские проливы с Северным морем (обновление воды в Балтике происходит за 10—40 лет).

Экосистема Балтийского моря отличается высокой специфичностью. Солоноватые водные массы стратифицированы в течение всего года. Море имеет черты, характерные для эстуариев и арктических морей. Эти свойства в сочетании с некоторыми биологическими особенностями делают его весьма подверженным многим формам антропогенного воздействия.

Начиная с середины 60-х годов проблеме охраны среды Балтийского моря уделяется все большее внимание. На конференции Международной морской консультативной организации в 1973 г. Балтийское море было названо в числе морей, для которых действуют особые, повышенные требования в отношении охраны от загрязнения. В 1974 г. в Хельсинки была подписана Конвенция по защите морской среды района Балтийского моря, в которой участвовали все прибалтийские государства. Благодаря интенсивным экспедиционным исследованиям накоплен большой объем информации о влиянии антропогенного воздействия на экосистему Балтийского моря и сделано несколько попыток обобщений результатов исследований состояния среды Балтийского моря, в которых под эгидой Хельсинкской комиссии приняли участие ведущие специалисты всех прибалтийских стран [135, 136, 141, 142].

Число вредных или потенциально вредных органических веществ, попадающих в среду Балтийского моря, велико, но только три группы загрязняющих веществ — хлорорганические пестициды (ХОП), полихлорбифенилы (ПХБ) и неполярные нефтяные углеводороды (ННУ) — исследованы в такой степени, что можно говорить об оценке состояния загрязнения ими экосистемы Балтийского моря.

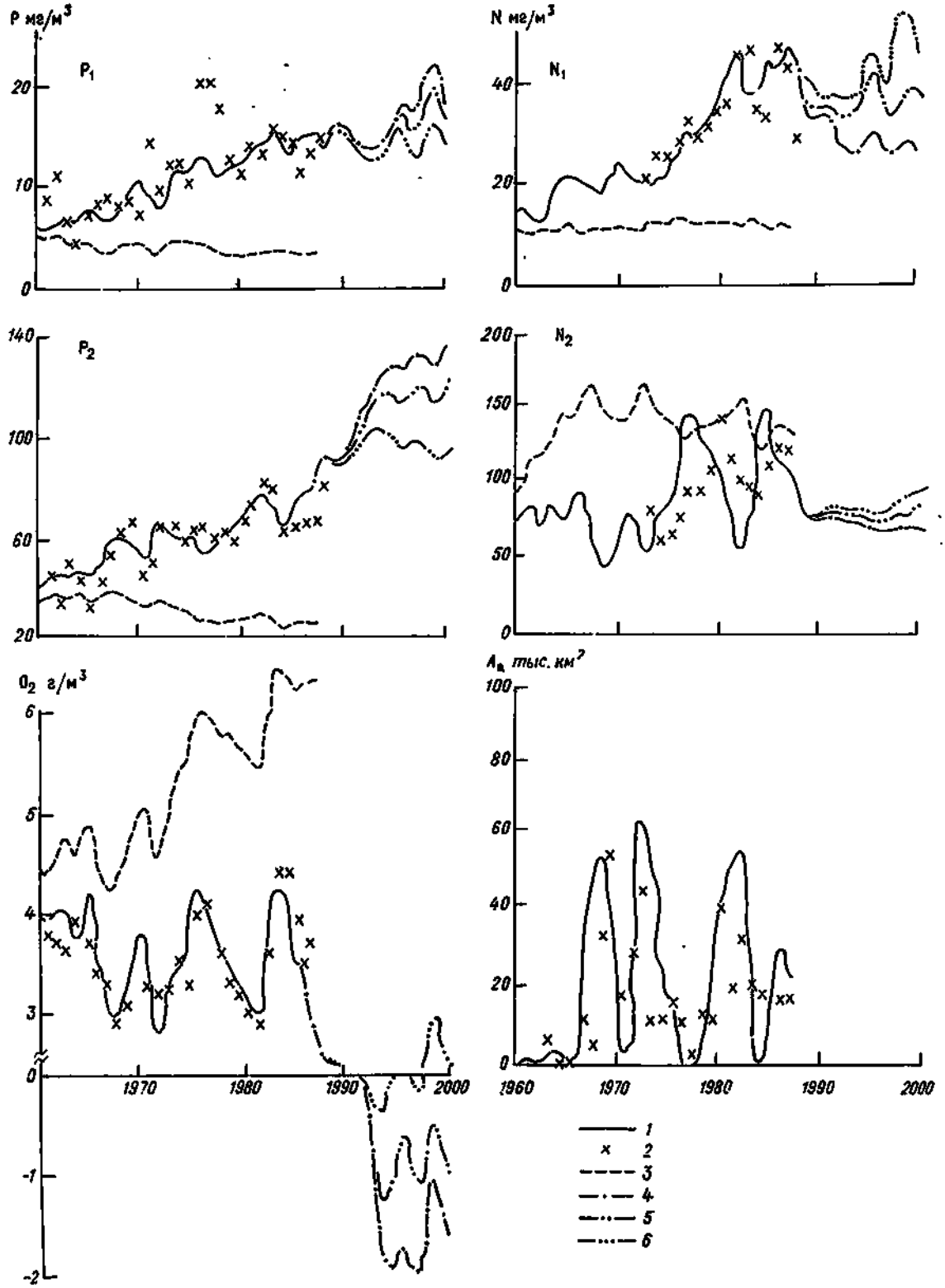


Рис. 15.5. Результаты верификации модели многолетней динамики вещества (азота, фосфора и кислорода) и прогноз концентраций компонентов до 2000 г.

1 — воспроизведение динамики концентраций компонентов (опорный вариант); *2* — данные наблюдений; *3* — эксперимент без учета антропогенного воздействия.

Прогноз: *4* — эксперимент с линейно возрастающими антропогенными нагрузками; *5* — с постоянными антропогенными нагрузками; *6* — со снижающимися антропогенными нагрузками.

Содержание тяжелых металлов в бассейне Балтийского моря более интенсивно стали изучать в 70-х годах. Хотя тяжелые металлы, в отличие от других загрязняющих веществ, являются составной частью морской среды и обитающих в ней организмов, однако антропогенные нарушения, возникающие на естественном фоне, могут оказывать неблагоприятное воздействие на экосистему. До сих пор информация о тяжелых металлах в экосистеме Балтийского моря ограничена и противоречива, что связано как с несовершенством методик сбора и обработки материала, так и со сложностями оценок распределения тяжелых металлов в среде и их миграции по трофическим цепям моря. В зависимости от концентраций влияние тяжелых металлов на экосистемы может иметь и положительные и отрицательные последствия.

В мае 1980 г. вступила в силу Конвенция по защите морской среды района Балтийского моря (1974 г.), которая была одобрена ГДР, Данией, ПНР, ФРГ, СССР, Финляндией и Швецией. Эта Конвенция учитывает все виды загрязнения морской среды, связанные не только с береговыми источниками и судоходством, но и с атмосферным переносом. В связи с этим в Приложении I Конвенции, кроме запрещения захоронений ДДТ и ПХБ в Балтийском море, изложена система запретов и правил в области торговли, применения и хранения этих веществ в странах, подписавших Конвенцию, в целях предотвращения загрязнения Балтийского моря этими веществами путем атмосферного переноса. В Приложении II приведен список веществ, для сбрасывания которых в Балтийское море необходимо специальное разрешение. В этот список вошли ртуть, кадмий и стойкие хлорированные углеводороды. В Приложении IV указано на необходимость обязательной очистки бытовых сточных вод для уменьшения затрат растворенного кислорода на разложение содержащихся в них органических веществ и снижения возможности эвтрофикации. Отдельные ограничения касаются нефти и опасных судовых грузов. Судам, превышающим определенный размер, запрещено сбрасывать за борт неочищенные бытовые стоки в пределах 12 миль от берега. В случае отсутствия на судах малых устройств очистки им предписывается сдавать бытовые стоки на соответствующие очистные сооружения в портах. Кроме того, в Балтийском море запрещено сбрасывать за борт также мусор. Исключение сделано для пищевых отходов, которые положено сбрасывать лишь за пределами 12-мильной полосы от берега. Это правило обязательно и для малых судов [18].

16.2. Проблемы химического анализа и сопоставления данных, характеризующих загрязнение

Хлорорганические соединения. Полихлорбифенилы (ПХБ) относятся к категории синтетических веществ, широко используемых во многих странах мира в различных отраслях промышленности. По структуре и физико-химическим свойствам к ним близки и хлорорганические пестициды (ХОП), в частности ДДТ и его метаболиты. По этой причине, а также с точки зрения аналитического определения эти две группы ароматических хлорсодержащих соединений рассматриваются вместе.

Первые данные, свидетельствующие о наличии в природной среде остаточных количеств хлорорганических соединений были опубликованы в начале 60-х годов. Неизвестные пики, наблюдаемые на газохроматограммах, при аналитическом определении ХОП в 1966 г. с помощью масс-спектрометрии были идентифицированы как ПХБ. Присутствие ПХБ и ХОП установлено в самых отдаленных районах нашей планеты, их распространение имеет глобальный характер. Полихлорбифенилы обнаружены в воздухе, воде, водных организмах, продуктах питания ,а также в тканях человека [163, 206, 284].

Анализ хлорорганических соединений состоит из трех основных этапов: 1) выделение с использованием жидкостной экстракции или адсорбции на адсорбентах разных типов; 2) очистка экстракта или десорбата с применением различных видов хроматографии, обработкой кислотами или щелочами, распределением между растворителями разных полярностей; 3) количественный анализ, который почти всегда проводится методом газовой хроматографии с использованием детектора электронного захвата.

Поскольку анализ ХОП и ПХБ — многоступенчатый процесс, на каждом его этапе могут возникать существенные ошибки. Первым и, по всей вероятности, самым важным этапом всей аналитической процедуры является отбор проб. Достоверность любого аналитического измерения непосредственно связана с надежностью процесса отбора пробы.

При взятии проб из морских организмов и донных отложений необходимо предусмотреть отсутствие контакта пробы с синтетическими полимерными материалами. Из способов консервации предпочтение отдается хранению в замороженном виде при температурах ниже —20 °С. Из биологических проб наиболее сложно получить незагрязненные пробы планктона. Если загрязнение пробы, исходящее от судна, можно избежать, собирая планктон в отдалении от него, загрязнение от соприкосновения с планктонными сетями, а также нефтяными комками, обладающими способностью концентрировать в себе липофильные соединения, предотвратить значительно труднее. Проблему усложняет трудность контроля ошибок, возникающих при отборе пробы. Так как маломасштабные временные и пространственные изменения концентраций загрязняющих веществ могут иметь большую амплитуду, получение идентичных проб затруднено. Вышеизложенное относится и к отбору проб воды, где эти проблемы еще более обострены из-за крайне низких концентраций ХОП и ПХБ.

Проба может быть взята непрерывными порциями или интегрально — с помощью насосных систем или специальными пробоотборниками, наполняющимися с одинаковой скоростью в течение определенного промежутка времени. Выбор правильного метода отбора пробы требует не только хорошего знания основ химии воды (морская вода содержит в большом количестве организмы, мертвые клетки, коллоиды и т. д.), но и зависит от поставленной задачи [306].

Из множества методов, используемых при количественном определении хлорорганических соединений, самое широкое распространение нашла газо-

вая хроматография с детектором электронного захвата, при применении которого минимально определяемые количества большинства хлорорганических соединений составляют доли пикограмма. Для подтверждения структуры газохроматографически разделенных компонентов используется масс-спектрометрия [195, 413]. Особенно высокую чувствительность имеет метод масс-спектрометрии с химической ионизацией отрицательно заряженными ионами [199], успешно использовавшейся для определения ряда ХОП.

Количественное определение ПХБ обычно проводится путем сравнения подходящих пиков пробы с соответствующими пиками самого подходящего для стандарта торгового ПХБ, причем измеряется высота или площадь пиков. Применяется также перхлорирование; завышенные результаты этого метода обусловлены перхлорированием соединений, не принадлежащих к классу ПХБ.

Тонкослойная хроматография, используемая как для разделения, так и для количественного определения отдельных хлорорганических соединений, бывает одно- и двухмерной с однократным или многократным элюированием. Используются различные проявители и адсорбенты — силикагель, окись алюминия, флорисил [273, 313, 472]. Намного реже применяется бумажная хроматография.

Несмотря на то что методы анализа хлорограничесих соединений развиваются в сторону более точных и чувствительных методов газовой хроматографии и масс-спектрометрии, анализ ХОП и ПХБ, выделенных из природных объектов, все же составляет проблему, так как газохроматограммы экстрактов природных проб не совпадают с газохроматограммами стандартных растворов арохлоров и хлофенов. Кроме того, до сих пор нет примера полного анализа стандартных торговых ПХБ. Поэтому получаемые результаты содержания ПХБ в природных объектах следует рассматривать как приближенные параметры группового характера [358].

Нефтяные углеводороды (НУ). Эпизодические определения нефтепродуктов в Балтийском море начались уже в начале 60-х годов, а систематические — с 1966 г. Результаты наблюдений публиковались ГОИНом совместно с прибалтийскими управлениями Госкомгидромета в ежеквартальных бюллетенях и ежегодных обзорах по Балтике. Однако при попытках использования этой гидрохимической информации для оценки загрязнения нефтепродуктами и расчета баланса выяснилось, что общие количества содержания их в Балтийском море неоправданно завышены. Поэтому было обращено внимание на особенности методик определения нефтепродуктов и проведены интеркалибрации.

Одним из первоначально применявшихся в СССР методов был так называемый весовой метод. Однако, как показала практика, этот метод обладает очень низкой чувствительностью по отношению к нефтяным углеводородам, растворенным в морской воде, и большой чувствительностью по отношению к посторонним веществам. Дальнейшие исследования показали, что максимальные концентрации НУ в растворенном состоянии в морской воде значительно меньше, чем обнаруженные данным методом (предел обнаружения нефтепродуктов этим методом составляет 0,3 мг/л, в то время как ПДК составляет 0,05 мг/л).[1]

В 70-х годах шведскими исследователями был разработан один из вариантов метода инфракрасной спектрофотометрии (ИКС), более чувствительный, чем весовой метод, но не обладающий достаточной избирательностью по отношению к нефтяным углеводородам (метод ИКС не способен отличать неполярные углеводороды биогенного происхождения от НУ).

В настоящее время существует острая потребность в достоверных методах количественного определения нефтяного загрязнения. При этом возникают различные трудности, обусловленные как весьма гетерогенным составом нефтепродуктов, так и низким содержанием НУ, растворенных в морской воде. Единой стандартной методики анализа содержания НУ в морской воде нет. Основными методами, применяемыми для количественного определения НУ, являются ИКС, газовая хроматография, высокоэффективная жидкостная хроматография, ультрафиолетовая и флюоресцентная спектрофотометрия и комбинация газовой хроматографии и масс-спектрометрии. В прибалтийских странах наиболее часто использовались методы ИКС и спектрофлюориметрический. Метод УФ-флюоресценции был рекомендован в качестве метода мониторинга на первом и втором этапах Программы международного мониторинга Балтийского моря. Высокая чувствительность флюоресцентного метода особенно важна при анализе проб, взятых в открытом море, где уровни загрязнения низки. Флюоресцентный метод позволяет лучше оценить нефтяное загрязнение. При использовании этого метода измеряется эмиссия ароматических соединений, которые содержатся во всех видах нефти. Предполагается, что в морской среде синтезируется очень мало ароматических углеводородов, если это происходит вообще [511]. Однако и флюоресцентный метод не позволяет определять индивидуальные соединения и поэтому полученные оценки рекомендуется использовать с осторожностью из-за существенных качественных различий НУ различного происхождения («истинно» нефтяное, продукты сгорания органического топлива, результаты природного биосинтеза), а сам метод использовать в качестве сканирующего только для экспресс-анализа большого числа проб [141, 142, 361].

Таким образом, поскольку исследования загрязнения Балтийского моря НУ велись различными методами с разной чувствительностью и избирательной способностью, в настоящее время существуют определенные трудности при анализе и сопоставлении данных [84].

Тяжелые металлы. При изучении загрязнения морской среды тяжелыми металлами исследователи сталкиваются с целым рядом аналитических проблем, связанных с очень низкими концентрациями (часть на миллион или миллиард частей воды или ткани), а также наличием природного фона их содержания, представление о котором менялось в соответствии с изменением правил отбора

[1] Работы, проведенные ЛО ГОИНом на Каспийском море за последние годы, показали эффективность весового метода при отборе пленочных нефтепродуктов с поверхности воды, особенно при аварийных разливах и в других случаях максимальных концентраций.

и хранения проб и усовершенствованием методик анализа.

Анализ содержания тяжелых металлов в последнее время проводится методом атомной абсорбции. При сопоставлении информации за последние 10—15 лет точность этого метода позволила установить, что данные, полученные ранее, преимущественно завышены.

Необходимо отметить, что влияние тяжелых металлов на биоту и их поведение в экосистеме характеризуется не столько общим содержанием, сколько химическими и физико-химическими формами существования [24, 249]. Но определение этих форм является чрезвычайно трудной, не решенной до сих пор аналитической проблемой. В настоящее время существует несколько методов разделения растворенной и взвешенной фаз тяжелых металлов, содержащихся в морской воде.

Важной проблемой является исключение загрязнения при концентрировании пробы и инструментальном анализе. Обработку рекомендуется проводить в специальных ультрачистых помещениях с очищенным от пыли воздухом или в так называемых ламинарных шкафах. Необходимо уделять внимание также используемым в лаборатории материалам, покрытию стен, мебели, одежде персонала. Особенно жесткие требования должны предъявляться к чистоте используемых реактивов и посуды.

Все эти сложности приводят к появлению случайных и систематических погрешностей, из-за которых весьма затруднен анализ и сопоставление различных данных. Несколько интеркалибраций по определению тяжелых металлов также показали плохую сопоставимость результатов отдельных исследователей [63, 185].

16.3. Хлорорганические соединения

В течение последних 15—20 лет появилось множество публикаций, посвященных исследованию содержания ПХБ и ДДТ в тканях организмов всех трофических уровней. Анализ данных, характеризующих содержание этих веществ в природных водах, показал, что они различаются на несколько порядков. Большой разброс данных, очевидно, обусловлен загрязнением проб во время отбора или последующей подготовки к анализам. Это подтверждается, например, тем обстоятельством, что в случае анализа больших объемов воды обычно получаются гораздо меньшие значения, чем при анализе небольших объемов. Улучшение техники анализа и постепенное устранение источников загрязнения, по-видимому, являются главными причинами того, что по мере опубликования данных прослеживается тенденция уменьшения значений [193]. Результаты интеркалибрации содержания ПХБ и ХОП в морской воде, проведенные в 1977 г. прибалтийскими странами в Киле [133], показали, что даже в случае отсутствия ошибок при взятии пробы, результаты анализа ДДТ различались примерно в 100 раз, а ПХБ — почти в 40 раз. Из этого сделан вывод, что методы анализа содержания хлорорганических соединений в природных водах по сравнению, например, с анализом содержания органических компонентов в воде находятся лишь в начальной стадии развития, а результаты анализа содержания этих соединений, количество которых измеряется нанограммами, зависят непосредственно от знаний и опыта химика-аналитика. Об этом необходимо помнить при сопоставлении данных различных исследователей.

Несмотря на трудности анализа и реально существующие низкие абсолютные значения концентраций, постоянный контроль за уровнем содержания этих соединений в морской воде все же необходим, поскольку хотя во многих странах применение ДДТ в качестве пестицида запрещено, равномерное его распределение в морях свидетельствует об атмосферном переносе.

Вода. Первые работы, в которых исследовалось содержание хлорорганических соединений в водах Балтийского моря, были опубликованы вскоре после обнаружения ПХБ Йенсеном в 1966 г. [301]. Однако из-за аналитических трудностей начало исследований загрязнения водной среды этими соединениями было отодвинуто еще на несколько лет [476]. К настоящему времени опубликовано немало данных о содержании хлорорганических веществ в водах Балтийского моря (табл. 16.1).

В 1981—1985 гг. на НИС «Аю-Даг» и «Арнольд Веймер» было исследовано содержание хлорорганических соединений в воде, донных отложениях и биоте Балтийского моря [87, 281]. Для отбора проб использовались батометры «Интер-Оушен» (США) с объемом проб 20 л. Количественный анализ проводился на газохроматографе фирмы «Перкин—Эльмер». Пробы морской воды были взяты в Финском заливе, в Центральной и Южной Балтике. Распределение частот концентрации характеризуют гистограммы, полученные в результате анализа более 150 проб. В 29,6 % проб концентрации ПХБ ниже 3 нг/л, в 58,5 % — ниже 6 нг/л, а 81,1 % — ниже 9 нг/л. Для ДДТ в 45,9 % проб концентрации ниже 0,1 нг/л, а примерно в 50 % концентрации ниже 0,15 нг/л. Гистограммы показывают правостороннюю асимметрию. Согласно полученным данным, средняя концентрация ПХБ в водах Балтийского моря за исследованный период составила 6,4 нг/л, ДДТ — 0,15 нг/л, ДД — 0,02 нг/л. Отношение ПХБ : ДДТ составило 43 : 1, причем ДДТ явно преобладает над своим метаболитом ДДД. Если сравнить полученные данные с данными других авторов (см. табл. 16.1), то окажется, что концентрации ПХБ больше, а ДДТ немного меньше.

Как показывают приведенные в табл. 16.2 средние концентрации хлорорганических соединений, в конце 70-х—начале 80-х годов происходило понижение концентрации ДДТ в водах Балтики. Это снижение, связанное с запретами на использование ДДТ в странах Балтийского региона, привело к тому, что современные концентрации порядка 0,05 нг/л оказались на уровне порога чувствительности метода их определения [141, 142, 361]. Поэтому отсутствие прогресса в повышении чувствительности и унификации методов определения содержания хлорорганических соединений (ХОС) в воде затрудняют выявление современных пространственных различий и временных изменений (отмеченное в [250] повышение концентраций в воде западной части открытой Балтики до 0,10—0,12 нг/л, имевшее место в 1983 г., связывают с обширным применением пестицидов в лесном хозяйстве одной из балтийских стран).

Таблица 16.1

Содержание ХОС (нг/л) в водах Балтийского моря

Годы	Район	Место отбора проб	ДДЕ	ДДД	ДДТ	ΣДДТ	ПХБ	Источник
1974, 1975	Западная Балтика	Поверхность	—	—	0,01—0,3	—	1,1—5,9	[476, 477]
1974, 1975	Немецкая бухта	Поверхность	—	—	0,1—0,7	—	2,0—4,7	[476, 477]
1975	зал. Хано	0,5—20 м	0,5—5,2	—	0,1—0,21	—	0,3—3,0	[407]
1976	Центральная и Западная Балтика	0—0,3 м	—	—	—	0,2—2,3	0,3—138,8	[161]
1977	Южная Балтика, район BOSEX-77	0, 5, 70 м, дно	—	—	—	1,4—4,7	1,5—28,2	[124]
1977	То же	10 м	—	—	—	—	5,8—11,8	[191]
1977	Гданьский бассейн		0,03—3,00	0,02—1,10	0,03—4,22	0,08—6,85	0,1—10,2	[180]
1980, 1981	Открытая часть Балтийского моря	Поверхность	—	—	0,03—0,56 (0,17)	—	0,38—27,0 (6,5)	[293]
		Пелагиаль	—	—	0,03—0,76 (0,18)	—	0,64—2,1 (4,3)	[293]
		Придонный слой	—	—	0,04—1,20 (0,15)	—	0,72—41,0 (6,2)	[293]

Примечание. В скобках приведены средние значения.

Сезонные различия средних концентраций см. табл. 16.2) слишком велики для того, чтобы их можно было отнести за счет погрешностей анализа. Предполагается, что колебания концентраций ПХБ связаны с изменениями содержания взвешенного вещества в морской воде.

Характер сезонных изменений вызывается неравномерным поступлением в море осадочного материала, зависящим от различных геологических, гидрологических, биологических, гидродинамических и других факторов среды. В качестве средней концентрации взвешенных веществ предлагается 1—3 мг/л [31], пределы колебаний составляют 0,2—12,4 мг/л. Для расчетов баланса все же рекомендуется использовать значение, превышающее 1 мг/л, применяемое чаще всего [153].

Концентрации хлорорганических соединений во взвешенном веществе высоки и положительно коррелируют с содержанием в нем органического вещества [126]. При расчете баланса хлорорганических соединений в Балтийском море за среднюю концентрацию ПХБ во взвешенном веществе принято значение 1500 нг на 1 г сухого вещества [125]. Таким образом, изменение концентрации взвешенного вещества в пределах 2—4 мг/л изменяет концентрацию ПХБ в воде в среднем на 3—6 нг/л. В пользу реальности этого предположения говорит и то, что в штормовую погоду, когда концентрации взвешенного вещества наивысшие, анализы воды на хлорорганические соединения дают завышенные результаты. Отметим также высокие содержания хлорорганических соединений, установленные разными авторами [124, 191] во время международного эксперимента BOSEX-77 на Балтийском море. Для окончательных выводов необходимо было бы в пробах одновременно определять содержание и хлорорганических соединений и взвешенного вещества.

Таблица 16.2

Содержание ХОС в поверхностном слое открытой Балтики (по [281])

Время исследований	ПХБ			ДДТ		
	диапазон изменений	$\bar{x}$	v	диапазон изменений	$\bar{x}$	v
	нг/л		%	нг/л		%
1977	4,8—9,9	6,5	—	0,9—4,2	2,1	—
1978	3,5—36,0	6,9	—	0—2,9	0,5	—
1979	3,2—19,7	6,8	—	0—0,05	0,01	—
1980	0,4—34,0	10,3	—	0—0,5	0,2	—
XI—XII 1981	—	2,2	122	—	0,15	87
IV—V 1982	—	10,7	54	—	0,25	52
IX—X 1983	—	7,9	108	—	0,04	225
VI—VI 1984	—	6,0	63	—	0,14	57
X—XI 1984	—	4,8	88	—	0,18	89
X 1984	—	7,0	20	—	Ниже чувствительности метода	—

Примечание. v — коэффициент вариации.

Достоверной корреляции между содержанием ПХБ и ДДТ, а также между ПХБ и неполярными углеводородами установить не удалось.

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать выводы, что для содержания хлорорганических соединений в воде Балтийского моря характерно:

— постепенное снижение концентрации ДДТ, но отсутствие тенденции к уменьшению содержания ПХБ;

— колебание средних значений концентраций ПХБ в зависимости от времени сбора проб и метеорологических условий, которое, возможно, связано с изменениями содержания взвешенного вещества в пробах;

— близость средних по значению концентраций в разных частях моря, вероятно из-за длительного времени пребывания ПХБ и ДДТ в море, способствующего их однородному распределению, а также из-за атмосферного переноса, который считается столь же важным путем попадания хлорорганических соединений в морскую среду, как и сток с материка.

Донные отложения. Распределение хлорорганических углеводородов в донных отложениях Балтийского моря еще мало изучено. Первые анализы

донных отложений на содержание ПХБ, проведенные в 1968 г., показали, что оно было ниже предела обнаружения, а значения концентраций суммарного ДДТ колебались в пределах 1—10 нг на 1 г сухого вещества [145].

В 1968 г. соотношение ДДТ и его метаболитов ДДЕ и ДДД в Центральной Балтике составляло 10 : 1 : 1. В пробах же донных отложений, отобранных в Центральной Балтике в 1972 г., ДДД уже доминировал над ДДТ и ДДЕ (по некоторым данным, в анаэробных условиях происходит разложение ДДТ с образованием ДДД). Концентрация суммарного ДДТ возросла по сравнению с 1968 г. с 3 до 45 нг на 1 г сухого вещества [145].

Особенно быстро в донных отложениях возрастали концентрации ПХБ. Если в 1968 г. бифенилы не были обнаружены в пробах, то в 1973 г. их содержание на 1 г сухого вещества в донных отложениях в Центральной Балтике достигало 330—1350 нг, в районе Ботнического залива — 22—31 нг, в Ботническом море — 6—16 нг. Самые высокие концентрации обнаружены в пробах, взятых вблизи портов. Например, в порту Гетеборг (в Датских проливах) содержание ПХБ на 1 г сухого вещества достигало 3850 нг, а содержание ДДТ — 600 нг [145]. По данным Одена и Экстеда [402], концентрация ПХБ в пробах, взятых в Готландской впадине, была в 4—5 раз выше, чем в пробах из прилегающих к ней районов (950 и 175 нг на 1 г сухого вещества соответственно).

Концентрации ПХБ в донных отложениях Финского залива определялись для архипелага г. Турку [336], распределение хлорорганических углеводородов изучалось в зависимости от расстояния до берега. В отличие от предыдущих исследователей, содержание бифенилов определялось в расчете на сырую массу донных отложений. Пробы были собраны в западной части Финского залива на протяжении 12 морских миль вдоль фарватера порта г. Турку в одной миле от берега. Разброс концентрацией ПХБ был минимальным (0,01—0,02 мкг на 1 г сырой массы). При сравнении полученных результатов с данными о содержании ПХБ в планктоне тех же районов выяснилось, что содержание бифенилов в планктоне в 5—75 раз выше [336].

Распределение содержания ПХБ в зависимости от глубин взятия пробы изучалось Оденом и Бергреном [145, 402], Ниемисто и Терво [396] (по мнению первых, Готландская впадина служит накопителем хлорорганических углеводородов). Концентрации ПХБ в пробах различных слоев донных отложений Центральной Балтики отличались в 5—10 раз, достигая в районах восточнее Готландской впадины 3—26 мкг на 1 г сырой массы [145]. Наибольшие концентрации хлорорганических веществ обнаружены в слоях 0—2,4—5 и 9 см. Содержание хлорорганических соединений в поверхностном слое донных отложений исследовалось в 1978 г. С. М. Черняком [99]. Содержание ПХБ, полученное методом экстракции с помощью ультразвука, колеблется от следовых концентраций до 17 нг на 1 г сухого вещества, а ДДТ — от 1,2 до 36,4 нг на 1 г сухого вещества.

Исследования содержания ПХБ и ХОП в донных отложениях Центральной Балтики (около Готландской впадины) в рамках международной программы BOSEX-77 проводились Ниемисто и Терво [396]. Были выявлены большие различия в содер-

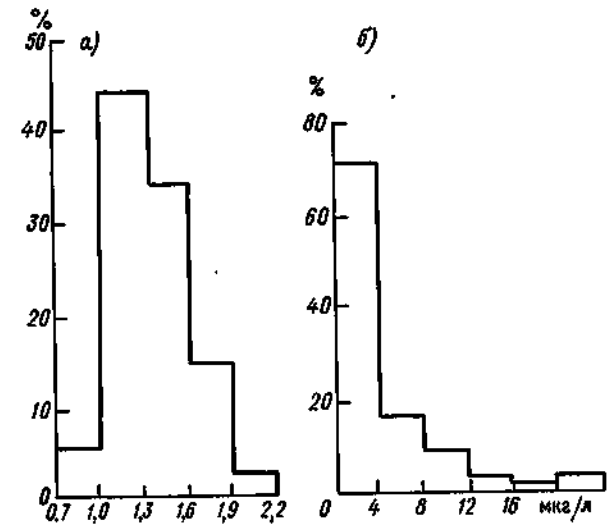


Рис. 16.1. Гистограммы, характеризующие частотное распределение неполярных углеводородов в Балтийском море по данным флюоресцентной спектрометрии (*а*) и ИКС-метода (*б*).

жании ПХБ в донных отложениях в зависимости от глубины взятия пробы (табл. 16.3). Таким образом, донные отложения в какой-то мере отражают историю применения хлорорганических соединений в прибалтийских странах.

Из анализа литературных данных следует, что концентрации хлорорганических углеводородов в донных отложениях Балтийского моря колеблются в очень широких пределах, а наиболее загрязненными являются центральные и южные части Балтики, окрестности Готландской впадины и район Датских проливов — прибрежные зоны больших портов.

Биота. Трансформация хлорорганических соединений (ХОС) в морской биоте начинается с их аккумуляции планктоном, в частности фитопланктоном. Влияние ХОС на фито- и зоопланктонные со-

Таблица 16.3

Содержание ХОП и ПХБ (нг на 1 г сухого вещества) в донных отложениях Балтийского моря

Район	Глубина взятия пробы, см	ПХБ	ДДЕ	ДДД	ДДТ	Источник
Около района BOSEX-77	Дно	175	—	—	—	[402]
Готландская впадина	Дно	950	—	—	8—50	[402]
Готландская впадина	Дно	31	—	—	22	
Центральная Балтика (район BOSEX-77)	1	106	6	23	—	[396]
	2	42	2	10	—	[396]
	3	18	1	4	—	[396]
	4	15	1	1	—	[396]
	5	12	1	1	—	[396]
	6	8	2	1	—	[396]
	7	5	2	1	—	[396]
	8	7	1	1	—	[396]
Польский сектор Балтийского моря	Дно	43*	—	—	7	[126]
		204**	—	—	18	[126]

* Содержание в песках.
** Содержание в илах.

Таблица 16.4

Среднее содержание ХОС в планктоне открытой Балтики в 1979—1984 гг.

Год	ПХБ	ΣДДТ	ПХБ	ΣДДТ
	мг на 1 кг сырой массы		мг на 1 кг липидов	
1979	32,8	4,77	5,69	0,72
1980	32,6	3,75	3,64	0,48
1982	26,3	4,51	5,68	0,53
1983	29,4	4,06	3,63	0,48
1984	35,6	2,06	3,12	0,18
Среднее	31,4	4,05	4,44	0,53

общества изучалось многими авторами. В то же время данных по содержанию ХОС в природных сообществах морского планктона сравнительно мало. Вероятно, это связано с трудностями отбора проб планктона: сложности в определении качественного и количественного состава проб [293] и возможное загрязнение проб с исследовательского судна, в частности, при изучении содержания ПХБ [211, 303].

В литературе довольно часто подчеркивается возможность зависимости содержания ХОС в планктоне от состава планктонных сообществ. Для выяснения этого влияния предпочтительны наблюдения на суточных станциях или сопоставление результатов исследования содержания ХОС в разных размерных фракциях планктона на отдельных станциях (т. е. параллельный лов разноячейными сетками). Анализируя данные, можно сделать вывод, что по мере увеличения размеров тела особей зоопланктона интенсивность накопления и содержание в них ПХБ и ДДТ снижаются.

Некоторыми авторами [211, 336] был сделан вывод о том, что в течение 70-х годов содержание ПХБ в биоте Балтийского моря почти не изменялось, а содержание ДДТ уменьшалось. Однако данные о содержании ХОС в планктоне Балтийского моря за 1979—1984 гг. (табл. 16.4) этот вывод не подтверждают. Так, в планктоне в открытой части Балтийского моря содержание ДДТ мало варьирует от года к году и тенденция уменьшения его концентрации в планктоне не наблюдается.

Общее представление о содержании ХОС в планктоне Балтийского моря на основании данных различных авторов дают табл. 16.5 и 16.6. Пространственному распределению содержания ХОС в планктоне прибрежных районов посвящены работы [336, 491], а в планктоне открытого моря — работы [66, 132, 439]. Из них следует, что содержание ПХБ и ДДТ в планктоне обычно уменьшается от прибрежных районов к открытому морю и от южной части Балтийского моря к северной. Следует отметить, что сравнение данных весьма затруднено из-за различий районов и периодов сбора материала, методик сбора и обработки проб и, наконец, значительной изменчивости результатов.

Поскольку в Программу международного мониторинга Балтийского моря изучение донных макрофитов не включено, о содержании в них ХОС имеются лишь единичные публикации [404]. Тем не менее при биоиндикации состояния морской среды они имеют определенные преимущества по сравнению с другими гидробионтами. Преимущества эти в основном обусловлены образом жизни данных видов: прикрепленные к грунту и сравнительно долгоживущие организмы, донные макрофиты позволяют получить информацию о локальных источниках загрязнения, «накапливая» ее в течение длительного периода времени.

Метод биоиндикации предполагает, что изменения концентраций исследуемых веществ в среде сопровождаются изменениями содержания этих веществ в организмах-индикаторах. Имеются сведения [183], что содержание в донных макрофитах ПХБ и ДДТ в загрязненных районах моря выше, чем в условно чистых районах. Но данный вопрос требует дополнительных исследований как по соотношению ХОС в среде и водорослях, так и по видовой и размерно-возрастной специфике накопления ХОС донными макрофитами.

В 1983—1984 гг. сотрудниками Института термо- и электрофизики Эстонии (ИТЭФ) были приведены работы по определению содержания ХОС в различных видах донных макрофитов Балтийского

Таблица 16.5

Содержание ПХБ (мг на 1 кг) в планктоне Балтийского моря

Годы	Содержание ПХБ из расчета на			Источник
	сырую массу	сухую массу	липиды	
		Северная Балтика		
1971—1972	—	—	18,0 (0,3—35,0)	[303]
1972—1973	0,19 (0,04—0,75)	—	25,0 (4,0—77,0)	[336]
1972	0,001—0,065	0,013—0,585	0,130—2,50	[363]
1975—1976	0,37 (0,03—3,3)	—	28,0 (4,0—66,0)	[417]
1976	—	0,23 (0—0,83)	—	[491]
1978	0,032—0,137	—	—	[66, 439]
		Открытая Балтика		
1969	—	0,380	7,1—28,0	[404]
1978	0,016—0,270	—	—	[66, 439]
		Южная Балтика		
1976	—	0,21—4,75	—	[161]
1978	0,033—0,131	—	—	[66, 439]
1979	—	0,303—0,495	—	[125]
1983	0,046—0,460	—	1,6—15,0	

Таблица 16.6

Содержание ДДТ (мг на 1 кг) в планктоне Балтийского моря

Год	Содержание ДДТ на расчета на			Источник
	сырую массу	сухую массу	липиды	
		Северная Балтика		
1972	0,002—0,015	0,003—0,139	0,03—0,85	[363]
1976	—	0,03(0—0,14)	—	[491]
1978	0,015—0,044	—	—	[66, 439]
		Открытая Балтика		
1978	0,009—0,180	—	—	[66, 439]
		Южная Балтика		
1976	—	0,097—0,810	—	[161]
1978	0,013—0,083	—	—	[66, 417]
1979	—	0,156—0,235	—	[125]
1980	0,047(0,001—0,090)			[71]

моря, в первую очередь в самых распространенных видах, таких, как *Cladophora glomerata*, *Enteromorpha intestinalis* и *Fucus vesiculosus*. Проанализировано 69 проб, включая два вида зеленых, четыре вида бурых и пять видов красных водорослей, а также два вида высших растений. Средние содержания ПХБ и ДДТ приведены в табл. 16.7. Наиболее низкие концентрации ПХБ наблюдаются в бурых и красных водорослях, но и наиболее высокие определены также в некоторых видах красных водорослей. Значительная видовая специфика в накоплении ХОС выявлена у высших водных растений [100], а в накоплении тяжелых металлов — также у донных макроводорослей [16, 83]. Однако на основе данных, приведенных в табл. 16.7, нельзя сделать окончательный вывод о видовой специфике накопления ХОС донными макрофитами, для этого данные пока еще слишком малочисленны, и, возможно, свое влияние оказывают локальные различия в концентрации ХОС в придонных слоях воды.

Для мониторинга среды Балтийского моря из донных животных были выбраны моллюски *Mytilus edulis* и *Macoma baltica*, а также декапода — *Crangon crangon*. Было установлено, что в южной части Балтики более высокие концентрации ПХБ в *Mytilus edulis* относятся к районам портов [365] и других наиболее загрязненных акваторий [202]. На основе данных по содержанию ХОС в *Macoma baltica* и *Mesidolea entomon* был сделан вывод о том, что содержание ПХБ в гидробионтах Балтийского моря в последнее время имеет тенденцию к возрастанию [186], а содержание ПХБ и ДДТ в гидробионтах Балтийского моря выше, чем в образцах из Северного моря. В целом имеется сравнительно мало данных о содержании ХОС в донных животных Балтийского моря.

Общее представление о содержании ПХБ и ДДТ в различных видах зообентоса дает табл. 16.8. Полученные данные свидетельствуют о том, что видовая специфика накопления ХОС донными животными в известной мере является функцией содержания липидов в тканях животных. Размерной специфики в накоплении ХОС моллюсками Балтийского моря не выявлено. В литературе иногда указывается на некоторое уменьшение содержания ХОС по мере роста особей донных животных [427, 429]. Однако в большинстве этих исследований связь между содержанием ХОС и размерами организмов обнаруживается у одних и отсутствует у других видов зообентоса. Возможно, что размерно-возрастные различия связаны с разным содержанием липидов, как это показано в случае *Macoma*

Таблица 16.7

Среднее содержание ХОС (мкг на 1 кг сухой массы) в разных видах донных макрофитов Балтийского моря

Вид	ПХБ	ДДТ
Зеленые водоросли		
Enteromorpha intestinalis	339,3	9,8
Cladophora glomerata	315,4	9,6
Бурые водоросли		
Pilayella littoralis	197,3	44,3
Ectocarpus confervoides	36,8	22,4
Dictyosiphon foeniculaceus (+Ceramium tennicorne)	104,8	12,6
Fucus vesiculosus	141,6	3,8
Красные водоросли		
Furcellaria fastigiata	588,3	7,8
Ceramium rubrum	944,8	5,4
Ceramium tennicorne	1230,3	11,5
Rhodomela confervoides	61,4	1,0
Phyllophora truncata	98,4	2,3
Высшие растения		
Potamogeton perfoliatus	1778,8	3,5
Zostera marina	125,0	8,2
Zostera marina (+Fucus vesiculosus)	310,5	11,8

Таблица 16.8

Содержание ХОС в различных видах зообентоса Балтийского моря

Вид	% липидов	ПХБ (мкг на 1 кг сырой массы)	Σ ДДТ (мкг на 1 кг сырой массы)	ПХБ (мкг на 1 кг липидов)	Σ ДДТ (мкг на 1 кг липидов)
Halicryptus spinulosus	2,5	184,8	11,0	7,3	0,4
Harmothoe sarsi	0,8	36,2	2,6	4,3	0,3
Idotea baltica	0,4	25,0	2,0	7,0	0,8
Mesidotea entomon	2,4	109,9	37,6	5,8	2,2
Pontoporeia affinis	3,8	201,5	28,6	5,0	1,0
Gammarus sp.	1,0	70,8	7,5	6,0	0,7
Diastylis rathkei	0,2	32,6	1,0	10,2	0,6
Mysis sp.	1,4	32,2	8,4	1,9	0,5
Crangon crangon	0,6	50,8	5,1	13,8	1,6
Mytilus edulis	1,8	22,6	2,9	1,6	0,3
Macoma baltica	2,5	87,4	7,1	2,9	0,3

baltica. Можно утверждать, что размер или масса тела гидробионтов являются только одним фактором из многих (содержание липидов, концентрации ХОС в среде, трофическое положение организмов и другие), влияющих на концентрацию ХОС в организмах зообентоса.

В 60-х годах началось интенсивное исследование загрязненности ХОС Балтийского моря и его заливов. Сообщалось об их наличии в организмах различных видов рыб (балтийская сельдь, треска, камбала, лосось) и морских млекопитающих, обитающих в прибрежных водах Швеции, а также в рыбоядных птицах. Шведскими исследователями [194] продолжались более обширные исследования балтийской сельди в Датских проливах, в Южной и Центральной Балтике, в Ботническом заливе и водах архипелага г. Стокгольма. Было установлено, что наибольшие концентрации ДДТ обнаруживаются у рыб южной части Балтийского моря, в то время как относительно низкий уровень установлен у рыб северной части (Ботнический залив). В то же время содержание ПХБ в обоих районах примерно одинаково.

Из сопоставления материалов, собранных в Датских проливах и в Балтийском море [194, 202], видно, что средние концентрации суммарного ДДТ и ПХБ в балтийской сельди в Балтийском море в 2—10 раз выше, чем в проливах. В целом содержание ХОС в рыбах Балтийского моря, Ботнического залива и архипелага г. Стокгольма в 10 раз выше, чем в тех же видах рыб Северного моря и Атлантического океана [194].

Таблица 16.9

Содержание ДДТ и ПХБ (мг на 1 кг сырой массы) в рыбах Балтийского моря [136]

Год	ΣПХБ			ΣДДТ		
	n	$\bar{x}$	диапазон изменений	*n*	$\bar{x}$	диапазон изменений
Сельдь						
1974	4	0,64	0,45—1,00	7	0,74	0,32—1,32
1975	7	0,56	0,32—1,21	12	0,47	0,23—1,29
1976	6	0,45	0,24—0,69	9	0,40	0,18—0,74
1977	6	0,29	0,23—0,32	9	0,19	0,09—0,42
1978	5	0,45	0,27—0,69	5	0,25	0,14—0,50
1979	9	0,54	0,05—1,12	9	0,23	0,02—0,46
1980	3	0,61	0,43—0,97	6	0,18	0,08—0,25
1981	14	0,47	0,01—0,96	13	0,15	0,01—0,36
1982	3	0,36	0,11—0,66	3	0,13	0,06—0,19
Шпрот						
				4	0,92	0,88—0,94
1974	3	0,56	0,53—0,58	7	0,47	0,33—0,69
1975	3	0,64	0,56—0,67	5	0,33	0,17—0,45
1976	2	0,46	0,30—0,62	5	0,28	0,15—0,36
1977	4	0,39	0,26—0,40	3	0,19	0,15—0,26
1978	4	0,35	0,20—0,50	4	0,21	0,11—0,29
1979	3	0,52	0,40—0,70	3	0,18	0,15—0,23
1980	8	0,67	0,02—1,40	8	0,09	0,06—0,13
1981	2	0,30	0,21—0,38	2	0,19	0,15—0,23
Треска (печень)						
1974	—	—	—	4	8,67	6,0—16,4
1975	3	5,74	5,0—7,2	5	5,83	2,4—14,3
1976	6	7,47	4,0—15,4	6	3,57	1,2—7,9
1977	3	6,32	3,1—11,4	4	3,60	1,2—6,5
1978	5	6,38	3,5—11,0	5	2,98	1,2—6,1
1979	11	5,85	1,7—14,6	10	2,99	0,8—5,9
1980	3	7,30	4,5—9,6	4	1,37	0,9—2,4
1981	6	7,53	3,1—9,9	7	3,13	0,6—6,6
1982	4	6,58	2,9—10,2	3	1,97	0,5—3,7

Таблица 16.10

Среднее содержание ХОС (мг на 1 кг сырой массы) в балтийских сельдях по отдельным популяциям и возрастным группам (по [65])

Место обитания популяции	Хлорорганическое соединение	Возраст, лет					
		1	2	3	4	5	6
Западная часть Финского залива	ПХБ	—	0,44	0,23	0,75	0,25	0,31
	ΣДДТ	—	0,28	0,16	0,33	0,17	0,19
	ДДТ	—	0,105	0,031	0,10	0,03	0,033
	ДДЕ	—	0,076	0,057	0,085	0,074	0,111
	ДДД	—	0,088	0,047	0,120	0,043	0,042
Открытая часть Балтийского моря (западное побережье о. Сааремаа)	ПХБ	0,37	0,31	0,39	0,30	0,37	0,41
	ΣДДТ	0,19	0,14	0,23	0,25	0,26	0,57
	ДДТ	0,061	0,03	0,05	0,06	0,06	0,18
	ДДЕ	0,056	0,046	0,063	0,098	0,110	0,267
	ДДД	0,061	0,047	0,053	0,072	0,073	0,155

Сравнение аккумуляции ДДТ и его метаболитов в тканях и органах рыб в естественных условиях позволило обнаружить влияние видовых различий в их накоплении. В большинстве случаев высокие значения аккумуляции отмечены у хищных рыб. В то же время в Балтийском море, например, в треске, аккумуляция ДДТ и ПХБ происходит в значительно меньших количествах, чем в балтийской сельди, хотя она является одним из основных объектов питания трески [194, 202]. Таким образом, существенные различия в интенсивности аккумуляции хлорорганических соединений между отдельными видами рыб не всегда объяснимы пищевыми связями между членами трофической цепи.

Что касается ПХБ, то приведенными в литературе данными доказано их широкое распространение в рыбах Балтики [194, 202, 302, 403]. Благодаря большой устойчивости в водной среде и сравнительно хорошей растворимости в липидах ПХБ могут накапливаться во всех морских организмах. Некоторыми авторами сделан вывод о том, что накопление ПХБ не связано с передачей по пищевой цепи, а является результатом прямого перераспределения между морской водой и организмами [466].

Одним из важных вопросов в исследовании переноса веществ от одного трофического уровня к другим является выявление интенсивности накопления веществ на каждом из них. Самыми подходящими объектами для таких исследований являются организмы с длинными жизненными циклами. Считается, что самыми надежными видами, характеризующими распространенность и аккумуляцию ХОС в пелагиали Балтики, являются пелагические рыбы — балтийская сельдь и шпроты, так как они являются первичными консументами морского зоопланктона и нектобентосных организмов (табл. 16.9).

Роотс и Пейкре [65] исследовали весенне-нерестующую сельдь четырех различных популяций — из восточной и западной частей Финского залива, открытой части Балтийского моря и Рижского залива. Для выяснения зависимости уровня содержания ХОС в организмах рыб от длительности периода их накопления исследование проведено по возрастным группам (в возрасте от 1 года до 6 лет) (табл. 16.10). Учитывая экологические особенности сельди (распределение скоплений по отдельным возрастным группам, суточные и вертикальные

сезонные миграции, различие нагульных и нерестилищных районов и другие), можно при наличии накапливающихся в организме рыб веществ относительно точно установить степень загрязнения отдельных районов моря.

В итоге было установлено, что среднее содержание ДДТ, ДДД и ДДЕ в сельди из различных популяций исследованных районов является примерно одинаковым. В то же время среднее содержание ПХБ значительно различается по отдельным районам местообитания популяции. Наибольшие концентрации ПХБ обнаружены у балтийской сельди центральной части Балтики и западной части Финского залива — 0,35 и 0,45 млн$^{-1}$ соответственно. При этом в большинстве случаев среднее содержание ПХБ в 1,2—2,0 раза выше содержания суммарного ДДТ. Ввиду своих кумулятивных свойств ХОС аккумулируются в тканях рыб в значительных количествах. Было установлено, что уровень аккумуляции ДДТ, ДДЕ и ДДД в мышцах балтийской сельди прямо пропорционален возрасту рыб. Возрастные различия указывают, что содержание этих соединений должно быть различным и по кормовым объектам сельди (соответственно по слоям воды).

Результаты анализа более обширных (и по пространству, и по времени) материалов, выполненного группой экспертов Хельсинкской комиссии, сводятся к следующим выводам [141, 142, 361].

Региональные различия содержания ДДТ в сельди, несмотря на его общее снижение с начала 70-х до начала 80-х годов и последующую стабилизацию, сохраняются и в настоящее время: средние уровни в Центральной Балтике (1—2 млн$^{-1}$) выше, чем в Ботническом заливе (0,5—1,0 млн$^{-1}$) и прол. Каттегат (0,3—0,5 млн$^{-1}$). Незначительное временное увеличение содержания ДДТ в сельди западной части Балтики и в проливах Малый и Большой Бельт в 1983—1985 гг. связывают с уже упомянутым использованием пестицидов в лесном хозяйстве. Современное содержание ПХБ в осенних популяциях сельди в южной части Ботнического залива и Северной Балтике (2,5—3,0 мг на 1 кг липидов) выше, чем в северной части Ботнического залива, в Южной Балтике (2 мг на 1 кг липидов) и в прол. Каттегат (1 мг на 1 кг липидов).

Запреты на использование технического гексахлорциклогексана привели к значительному снижению концентраций основного компонента — альфа-ГХЦГ — в течение 70-х годов и современные его значения составляют 4—5 нг/л.

Полихлорированные камфены (ПХК), используемые в странах, расположенных на юге Балтийского региона, в качестве пестицидов под коммерческими названиями «Токсафен», «Стробан», «Мелипакс» или «Фенацид», представляют собой сложную смесь, включающую до 8 500 индивидуальных соединений. Это препятствует осуществлению мониторинга и изучению их пространственно-временной динамики. Согласно некоторым оценкам, содержание ПХК в рыбах Балтики превышает содержание ДДТ, тогда как для тюленей и чаек соотношение обратное. Однако региональные различия выражены слабее, так как относительно равномерно распределенное поступление через атмосферу сравнимо или даже превышает поступление с неравномерно распределенным речным стоком.

Данные о других загрязняющих веществах получены неунифицированными методами, они немногочислены и разрознены. Это не позволяет охарактеризовать ни их пространственное распределение, ни тенденции изменений во времени. Однако в списке этих веществ выделяется постоянно расширяющаяся группа соединений, которые потенциально могут угрожать окружающей среде благодаря своей аналогии с более хорошо изученными токсикантами. К таким соединениям относятся, например, бромированные бифенилы, бромированные дифенилэфиры, хлорированные тиофены, диоксины.

16.4. Неполярные углеводороды

Наиболее распространенным компонентом загрязнения морской среды, как известно, являются нефть и нефтепродукты. Специфика гидрометеорологического режима Балтийского моря — относительно низкие средние годовые температуры, задерживающие процессы деструкции нефтепродуктов в морской среде, и ярко выраженное стоковое течение — влияет на динамику этих соединений.

Несмотря на довольно большое число публикаций по исследованию токсического действия неполярных углеводородов на морские экосистемы, многие аспекты этой проблемы еще не выяснены. Токсичность неполярных углеводородов, присутствующих в значительных количествах, все же не вызывает сомнений, так как характерными особенностями нефтяного загрязнения являются длительность существования в море, перенос на большие расстояния, последовательная многократная миграция из морской воды в донные отложения и обратно. Это приводит к токсическому воздействию на все группы морских организмов, обитающих в поверхностной пленке, в толще воды и на дне. Особенно чувствительны к нефтяному загрязнению птицы.

Обзор данных, полученных по загрязнению Балтийского моря неполярными углеводородами в 1970—1977 гг., содержится в работе [101]. В 1971 г. А. И. Симоновым и А. А. Ющаком [470] были проведены исследования содержания неполярных углеводородов в Балтийском море. По их данным, найденные с помощью весового метода концентрации нефтепродуктов на поверхности колебались в пределах 0,3—1,0 мг/л, что превышает значения, установленные шведскими исследователями Карлбергом и Скарстедтом с применением метода ИКС, в 10 раз.

Данные, полученные шведскими учеными в 1970—1975 гг., свидетельствуют о концентрациях неполярных углеводородов ниже 0,05 мг/л в 83 % из 132 проанализированных проб. Наиболее высокая концентрация (0,10 мг/л) была установлена только в одном случае (пробы отбирались на международных станциях Балтийского моря, Финского и Ботнического заливов). В целях сравнения были взяты пробы в прол. Каттегат. Из 40 проб в 78 % случаев концентрации были ниже 0,05 мг/л, а наибольшая достигала 0,23 мг/л. При этом концентрации, превышающие 0,05 мг/л, казались более типичными для поверхностных, чем для глубинных вод. На основе сходства хроматограмм экстрактов проб воды, взятых на разных станциях на разных глубинах в течение нескольких дней, сделан вывод

о том, что обнаруженные углеводороды имели преимущественно природное происхождение, так как авторам казалось невозможным такое совпадение хроматограмм антропогенных углеводородов нефтяного происхождения [175].

Исследования содержания неполярных углеводородов в финских прибрежных водах в 1971—1972 гг. [213] показали результаты, близкие к шведским данным. Был применен метод Карлберга и Скарстедта. Примерно в 80 % исследованных проб содержание неполярных углеводородов было ниже 0,05 мг/л.

Исследования Роде [435] с использованием метода ИКС с экстракцией неполярных углеводородов из 6 л воды показали также в 57 % проб наличие концентраций ниже 0,05 мг/л (их общий диапазон — 0,02—0,23 мг/л). Опыт исследования загрязнения Балтийского моря неполярных углеводородов в ЛО ГОИН (1979—1984 гг.) с применением метода ИКС и техники, повышающей его чувствительность, подтвердил мнение о том, что уровень концентраций растворенных неполярных углеводородов не превышает в подавляющем большинстве наблюдений 0,05 мг/л.

Однако низкая чувствительность метода ИКС не позволяет уточнить содержание неполярных углеводородов в морской воде, исследовать их распределение и динамику, а также установить природу обнаруженных неполярных углеводородов, которые могут быть естественного происхождения. Поэтому еще в 70-х годах были начаты исследования нефтяного загрязнения Балтийского моря с использованием более высокочувствительных и селективных методов [101].

Сопоставление ИК-спектрофотометрического и УФ-флюоресцентного методов показало слабую корреляцию результатов [337]. Сделан вывод о том, что по меньшей мере половина всей массы углеводородов имеет биогенное происхождение. Более чем в 70 % результатов, полученных методом ИКС, значения концентраций ниже 4 мкг/л. По данным, полученным с использованием УФ-флюоресцентной спектрофотометрии, около 60 % значений находится в пределах 1,0—1,6 мкг/л. Было указано также на то, что в открытой части моря и в Финском заливе средние значения концентраций весьма близки (рис. 16.1).

Полученное в последние годы УФ-флюоресцентным методом большое число данных о неполярных углеводородах показывает, что их пространственное распределение в открытых районах Балтийского моря достаточно однородно, а концентрации в среднем изменяются в пределах 0,2—0,5 мкг/л. Сходство концентраций, обнаруженных как в районах интенсивного судоходства в западной части Балтики, так и в относительно незагрязненных открытых водах Ботнического залива, указывает на значительное поступление неполярных углеводородов через атмосферу.

Анализы содержания индивидуальных соединений, проведенные комбинированным методом газовой хроматографии — масс-спектрометрии (ГХ/МС), в целом подтвердили однородность распределения большинства таких соединений с концентрациями, не превышающими в открытых водах нескольких нг/л. Загрязнение насыщенными и ароматическими неполярными углеводородами выше в прибрежных районах и в особенности вблизи крупных урбанизированных зон с резким уменьшением в сторону открытого моря. Остается, однако, неясным — можно ли выявить какие-либо временные тенденции на основе существующих данных, сопоставимых только начиная с 1982 г.

Благодаря гидрофобности и относительно низкой растворимости большинство неполярных углеводородов, попадающих в море, легко адсорбируется на взвешенных веществах и оседает на дно. Закономерности распределения неполярных углеводородов в донных отложениях Балтийского моря подобны таковым для воды — резкое снижение концентраций от побережья в сторону открытого моря от тысяч и сотен до единиц и десятых долей миллиграмма на 1 кг сухого вещества [141, 142, 361].

Аналогичное снижение концентраций обнаружено в двустворчатых моллюсках, обитающих в архипелаге г. Стокгольма — содержание неполярных углеводородов в мидиях изменяется для насыщенной фракции от 87 мкг на 1 кг сырой массы во внутренних урбанизированных районах до 5,6 мкг на 1 г сырой массы в открытом море и от 28,2 до 2,9 мкг на 1 г сырой массы соответственно для ароматической фракции [155].

Полный анализ углеводородов донных отложений до сих пор невозможен из-за многих обстоятельств, включающих сложность состава нефти, а также биосинтезированных углеводородов. Кроме того, мало известно об относительной роли весьма разнообразных и многочисленных источников поступления в морскую воду углеводородов в результате человеческой деятельности, состав которых весьма изменчив. Известно, что уровень загрязнения существенно зависит от вида пород, которые слагают верхний слой донных отложений. Уровни содержания сильно изменяются от 0,15 мг н-алканов на 1 кг сухого вещества или 0,4 мг — 1 г нефти на 1 кг сухого вещества в прибрежных сильно загрязненных водах [268]. Концентрации алифатических и ароматических углеводородов, найденные Лоу и Андрулевичем [335] в донных отложениях на восьми станциях Южной Балтики, различались в 50—100 раз. Согласно данным, полученным Рудлингом, в более загрязненных береговых районах суммарное содержание углеводородов колеблется в пределах 40—400 мкг на 1 г сухого вещества, а в водах, омывающих острова восточного побережья Швеции, — от 2 до 20 мкг на 1 г сухого вещества [441].

По данным Лаанеметс, Талвари и Янковского [41, 87], загрязнение донных отложений Балтийского моря характеризуется следующим.

Содержание неполярных углеводородов в поверхностных слоях донных отложений в большинстве случаев, как правило, ниже 100—150 мкг на 1 г сухого вещества; наблюдаются отдельные случаи повышения концентраций, свидетельствующие о локальном загрязнении грунтов. С увеличением глубины залегания концентрация неполярных углеводородов уменьшается, причем самое резкое снижение наблюдается в верхнем слое (0—5 см).

В групповом составе углеводородов в донных отложениях значительную роль играют ароматические соединения, около половины которых составляют полициклические, что свидетельствует о загрязнении поверхностного слоя донных отложений Балтийского моря продуктами термической переработки горючих ископаемых (табл. 16.11). Преоб-

Таблица 16.11

Групповой состав НУ (в числителе мкг на 1 г сухого вещества, в знаменателе %) поверхностного слоя донных отложений Балтийского моря (35-й рейс НИС «Аю-Даг», октябрь—ноябрь 1983 г., по [87])

Характеристика	Экстрагируемая органика, на 1 г сухого вещества	Алифатические углеводороды	Ароматические углеводороды	Гетеросоединения
Среднее значение	1,25	328,2 / 24,3	398,7 / 32,0	527,1 / 43,7
Стандартное отклонение	1,05	453,1 / 10,4	333,2 / 14,1	449,6 / 9,9
Коэффициент вариации, %	84,0	138,1 / 42,8	83,6 / 44,1	85,3 / 226

ладание н-алканов с числом углеродных атомов C_{21}—C_{27} свидетельствует о возможном происхождении их из высших растений терригенного происхождения.

В итоге можно констатировать относительно низкий фоновый уровень загрязнения Балтийского моря НУ. Необходимо также подчеркнуть, что ряд исследователей предполагает биогенное происхождение преобладающей части НУ. Разумеется, это не снижает опасности крупных загрязнений в результате аварийных разливов нефтепродуктов.

16.5. Тяжелые металлы в среде Балтийского моря

Начало систематических исследований содержания ТМ в экосистеме Балтийского моря относится к 70-м годам, когда резко возрос интерес общественности к состоянию загрязнения. Обобщая литературные данные, можно отметить общую тенденцию уменьшения концентраций по мере усовершенствования методов анализа (табл. 16.12).

При анализе информации, характеризующей загрязнение ТМ, следует учитывать тот факт, что первые исследования ограничивались сравнительно небольшим количеством проб, отбиравшихся довольно примитивным способом без особых мер по предупреждению их загрязнения [59, 88]. Эти данные указывали лишь на широкие пределы колебания содержания ТМ в воде Балтики.

Исследования Кремлинга [328] по вертикальному распределению концентраций меди и кадмия в Борнхольмской впадине, в районе BOSEX-77 и в Ландсортской впадине не дали однозначного результата: на одной станции концентрация металлов с глубиной увеличивалась, на другой — уменьшалась. В ряде работ [52, 158, 297] высказывается мнение о наличии мелкомасштабной изменчивости полей концентрации ТМ в морской воде и об отсутствии значительной изменчивости по глубинам за исключением придонного слоя. Н. П. Морозов и С. А. Петухов [52] указывали на существование заметной сезонной изменчивости, что, однако, не подтверждается исследованиями Янковского и сотрудников [118]. Исследования Густавсона [271], проведенные летом и осенью, также свидетельствуют об отсутствии заметной сезонной динамики содержания свинца и кадмия в слое 0—50 м в водах собственно Балтики. Однако уровень содержания меди в июле (0,4—1,2 мкг/л) оказался выше, чем в ноябре (0,1—0,7 мкг/л). Отмечалось также резкое уменьшение концентрации этих металлов в придонных слоях, лишенных кислорода, что соответствует и данным Кремлинга [328].

Таблица 16.12

Содержание ТМ (мкг/л) в воде открытой Балтики (цит. по [118])

Cu	Pb	Cd	Hg	Источник
0—240	0—5,9	—	—	[461]
0,9—5,3	0,5—8,6	0,5	—	[59]
—	0,3—10,0	0,05—5,0	0,2—5,0	[88]
—	0,2—4,6	0,02—0,43	0,007—0,217	[156, 157]
0,9—1,2	0,05—1,0	0,04—0,15	—	[192]
0,6—1,0	0,05	0,030—0,050	—	[339]
2,8(0,5)*	1,7(0,2)*	0,26(0,007)*	0,14	[52]
0,5—5,4	0,4—4,0	0,03—0,31	0,01—0,04	[297]
0,04—2,8	0,005—0,33	0,002—0,7	0,9—1,1,0**	[158]
—	—	—	0,042	[503]
0,8	0,1—0,2	0,03—0,05	—	[271]
0,89	0,040	0,059	3,3**	[160]
0,7	—	0,027	—	[330]
0,7—0,8	0,025—0,083	0,017—0,067	1—10**	[136]

* Вклад взвешенного вещества.
** Содержание в нг/л.

Среди исследований горизонтального распределения содержания ТМ в воде Балтики наиболее значительной является работа Кремлинга и Петерсена [330], свидетельствующая об уменьшении концентраций меди и кадмия в поверхностном слое моря от Ботнического залива (0,79 и 0,033 мкг/л соответственно) к прол. Каттегат (0,5 и 0,02 мкг/л соответственно).

Исследования Янковского и сотрудников [118] показали, что, несмотря на мелкомасштабные флюктуации, средние концентрации ТМ по акватории собственно Балтики и Финского залива (исключая прибрежную зону) близки по значению. Не наблюдалось также различий средних концентраций ТМ в слоях выше и ниже галоклина. Полученные данные указывают на повышенное содержание ТМ в поверхностном слое моря по сравнению с более глубокими слоями и на отсутствие корреляции между концентрациями металлов и биогенных веществ.

Приведенные данные по распределению ТМ в пелагиали Балтийского моря получены с учетом усовершенствования техники анализа и переоценки результатов. Рассмотрим современную точку зрения на эти проблемы, основываясь на вышеизложенном, а также на заключениях экспертов Хельсинкской комиссии [136, 142].

Вода. В последнее время значения оценки уровней содержания ТМ в воде Балтики постепенно уменьшались. Данные, приведенные в последней строке табл. 16.12, признаны обоснованными группой экспертов Хельсинкской комиссии. Наряду с уменьшением абсолютных значений уменьшались и пределы изменчивости концентраций. Сейчас со всей очевидностью можно сказать, что хотя мелкомасштабные флюктуации концентраций ТМ в морской воде действительно существуют, их амплитуда

Таблица 16.13

Концентрации взвешенной $x_в$ и растворенной $x_р$ форм ТМ в Балтийском море и их отношение (по [159])

	Al	Fe	Mn	Cr	Zn	Cu	Pb	Ni	Cd	Co
$x_в$ % . . .	—	1,5*	0,17*	—	270	73	140	27	2,9	7,9
$x_р$, нг/л . .	14**	8,3**	2,9**	130	100	79	63	16	5,1	3,7
$x_в/x_р$ . . .	—	4,1	—	—	0,08	0,2	2,5	0,03	0,1	0,3

* Содержание в %.
** Содержание в мкг/л.

гораздо меньше, чем предполагалось несколько лет назад.

Из накопленного к настоящему времени материала вполне однозначно следует, что вертикальное распределение ТМ в воде Балтики не соответствует распределению биогенных веществ. Так, Кремлинг [329] пришел к выводу, что содержание меди и кадмия в воде Балтики с глубиной не изменяется (за исключением поверхностной пленки и бескислородного придонного слоя), а концентрация свинца и ртути несколько уменьшается. Вертикальное распределение свинца и ртути в морской воде осложняется взаимодействием различных факторов — биотических, физико-химических и, возможно, антропогенных [446]. В результате этого не представляется возможным достоверно установить теоретические предпосылки, определяющие изменения их концентраций с глубиной. Детальный обзор этих вопросов приведен в монографиях [51, 182].

Различия в вертикальном распределении содержания меди, кадмия и биогенных веществ в пелагиали океанов и Балтики объясняется, по-видимому, относительно высоким уровнем содержания ТМ в водах последней. Вследствие этого протекающие в Балтике биологические процессы не в состоянии вызвать заметных вертикальных градиентов концентрации ТМ [136].

Тесная корреляция между соленостью воды и содержанием в ней меди и кадмия была установлена Кремлингом и Петерсеном [330], кроме того, они сделали вывод о том, что поведение данных элементов в поверхностном слое Балтики консервативно. Этот вывод не согласуется с существующим представлением, что в зонах смешения пресных и морских вод в подавляющем большинстве случаев создаются условия для осаждения ТМ (так называемые геохимические барьеры) [22, 200]. Именно такую переходную зону с соленостью 2—3 ‰ в северной части Ботнического и восточной части Финского заливов и 35 ‰ в прол. Каттегат представляет собой Балтийское море.

В свою очередь существующие в настоящее время данные по вертикальному распределению концентраций ТМ не дают оснований говорить о тесной корреляции с соленостью, что также позволяет усомниться в выводах о консервативном поведении меди и кадмия в водах Балтийского моря.

Данные по сезонной динамике концентраций ТМ в воде Балтики весьма малочислены и противоречивы. Косвенным подтверждением заключения об отсутствии сезонной динамики концентрации ТМ является то обстоятельство, что факторы, вызывающие сезонные изменения, одновременно должны приводить к росту градиентов в их вертикальном распределении. Однако, как было показано выше, нельзя говорить о существенном повышении содержания ТМ с увеличением глубины.

Вышесказанное, конечно, не исключает возможности проявления сезонной динамики содержания ТМ в водах прибрежных районов, подверженных, вероятно, большому влиянию сезонных колебаний материкового стока, хотя количественно оценить это явление в прибрежных районах Балтики из-за отсутствия достоверных данных пока невозможно.

При изучении вопроса многолетней динамики уровней содержания ТМ в пелагиали Балтийского моря возникают трудности при сопоставлении данных различных исследователей. Существующая система мониторинга не учитывает кратковременные флюктуации концентраций ТМ в пелагиали Балтийского моря.

Взвешенные вещества. Представление о соотношении растворенных и взвешенных форм ТМ в воде Балтийского моря дает табл. 16.13. Взвешенная форма может оказаться превалирующей для свинца, а в специфических условиях — и для других металлов. Так, согласно исследованиям Брюгманна в Готландской впадине (ст. BY 15) в 1983 г., концентрация свинца во взвешенном веществе (3,4—67 нг/л) превышала половину его общего содержания (взвешенная+растворенная формы) во всех пробах. В бескислородных слоях концентрации взвешенного цинка (10—40 нг/л) и кадмия (0,7—22 нг/л) также составляли значительную долю их общего содержания. В 1984 г. взвешенные вещества на глубине 200 м были обогащены этими металлами в исключительной степени — 6,4 мг цинка и 51 мкг кадмия на 1 г взвешенного вещества, ближе ко дну (235 м) их содержание все еще оставалось весьма высоким — 2,8 мг и 13 мкг соответственно. Здесь же было обнаружено и максимальное обогащение взвешенного вещества медью (1,5 мг на 1 г), концентрация взвешенной фракции которой, постепенно возраставшая с глубиной (10—170 нг/л), достигала половины общего содержания.

В целом же приходится признать, что в связи со значительной разномасштабной изменчивостью экосистемы Балтики имеющийся набор данных по концентрациям взвешенных форм металлов в различных водных массах и в различные сезоны года, а также по зависимостям их значений от природы и происхождения взвешенных веществ далеко не достаточен для общей характеристики режима этих загрязнений.

Донные отложения. Формирование химического состава донных отложений Балтийского моря происходит на фоне преобладания терригенных процессов. Осадочный материал на водосборе и в береговой зоне моря является смешанным продуктом разрушения четвертичных отложений (морен), химический состав которых — нечто среднее между составом кристаллических пород в областях питания ледника и осадочных пород на пути его движения. В море этот материал претерпевает дальнейшие изменения.

В ряде случаев огромную роль в качестве поставщиков ТМ в море играют реки. Распределение ТМ в отложениях мелководных заливов более всего зависит от выноса и аккумуляции осадочного материала реками, от массового развития фитопланктона, сорбирующего микроэлементы из воды, и от осаждения органического детрита на дно после отмирания живых особей. Кроме того, немаловажную роль играет дисперсность отложений. Из табл. 16.14

Таблица 16.14

Среднее содержание ТМ в поверхностном слое донных отложений Балтийского моря

Тип отложений	Fe	Mn	Zn	Cu	Ni	Mo	Cr	Sn	Co
	%		10^{-4} %						
Современные:	—	—	109	33	31	10	78	5,6	—
Песок	1,21	0,04	34	17	20	5	22	8,0	—
Алеврит крупный	1,99	0,06	58	19	18	5	45	5,7	6—12
Ил:									
мелкоалевритовый	3,06	0,07	69	22	34	10	74	5,7	20
алеврито-пелитовый	4,14	0,06	155	46	35	15	95	5,8	8—20
пелитовый	5,07	0,20	153	47	42	12	106	5,1	10—12
Древние:	—	—	83	33	31	9	78	5,6	—
Ил раннеголоценовый и глины позднеледниковые	5,08	0,06	108	48	40	15	133	5,3	—
Песок реликтовый	—	—	41	18	22	5	39	5,9	—
Балтийское море в целом [128]	3,8	—	260	45	37	—	—	—	17

Примечание. В целом в Балтийском море содержится свинца 77, кадмия 1,4, ртути 0,18 мг на 1 кг сухой массы.

видно, что по мере уменьшения размеров частиц, т. е. при увеличении дисперсности отложений, практически во всех случаях отмечается увеличение содержания ТМ; при переходе от песков к пелитовым илам оно увеличивается в 2—7 раз. Минимальное содержание исследуемых металлов отмечается на мелководных участках, где распространены грубозернистые реликтовые отложения. Невелико оно и в зоне замедленной седиментации, где образуются железомарганцевые конкреции.

Увеличение содержания ТМ в пелитовых илах объясняется их тесной связью с глинистыми минералами и силикатами. Содержание никеля, меди, цинка и свинца коррелирует с органическим веществом. Они сорбируются гидроокисями железа и марганца, гидратными формами алюминия и кремнезема. Кобальт, как правило, сорбируется биогенными взвешенными веществами и осаждается на дно в составе металлоорганических соединений, а также сорбируется и гидроокислами. Аналогичные связи обнаруживаются и для молибдена — особенно в илах стагнированной зоны, где он осаждается с сульфидами железа. Распределение олова иное — четкой приуроченности к материалу с какими-либо определенными размерами частиц не наблюдается. Поэтому наиболее высокие концентрации олова характерны для тонких илов глубоководной зоны седиментации и прибрежной зоны реликтовых песков, где нередки россыпные тела этого элемента.

Следует отметить, что содержание практически всех исследуемых элементов в глубоководных впадинах более высокое, чем среднее для всего моря. Многие из анализируемых металлов распределены по правилу пелитовой фракции, т. е. их содержание увеличивается по мере увеличения количества фракции размером менее 0,01 мм, поэтому максимумы в их распределении во впадинах по сравнению с мелководьем естественны.

Наблюдаемое высокое содержание железа, марганца, никеля, молибдена, кобальта в голоценовых глинах связано с микрослоистостью илов. В прослоях накопление различных микроэлементов идет неравномерно. Седиментогенез во впадинах Балтийского моря характеризуется рядом специфических признаков: высоким содержанием органического углерода в виде аллохтонного органического вещества, накоплением в придонных водах большого количества растворенных и взвешенных форм металлов, обогащением этими металлами (и микроэлементами) донных отложений, накоплением в них аутигенных сульфидов железа, марганца и других минералов.

Возрастающая антропогенная нагрузка вносит определенные изменения и в ход формирования естественного геохимического фона в различных звеньях экосистемы Балтийского моря. Процессы техногенного воздействия на дно в целом невелики. Этому способствует жизнедеятельность организмов, вовлекающая ряд элементов-поллютантов в жизненный цикл и круговорот осадочного вещества в экосистеме моря.

Биота. На основе осредненных данных убывание концентраций исследуемых металлов в планктоне открытой Балтики выражается рядом цинк, медь, свинец, кадмий[1] и характеризуется следующими статистическими оценками [118]: концентрация цинка (321±107), меди (21,3±6,1), свинца (18,0±20,5), кадмия (1,43±1,28) мг на 1 кг сухого вещества. Наиболее изменчивым во всех районах исследования является содержание в планктоне свинца, наименее изменчивым — содержание цинка. В то же время, согласно литературным данным, накопление ТМ в фитопланктоне и сестоне, по-видимому, несколько выше, чем в зоопланктоне (табл. 16.15).

Содержание ТМ в донных макрофитах заметно колеблется от вида к виду и по районам моря [118], хотя в целом уменьшение содержания металлов в изученных водорослях можно выразить рядом медь, свинец, кадмий. Так, например, в *Fucus vesiculosus* открытой Балтики содержалось меди 5,1—5,8, свинца 0,3—1,3, кадмия 1,0—2,6 мг на 1 кг сухого вещества.

В биоаккумуляции ТМ донными организмами наблюдаются значительные видовые различия. Наиболее высокие концентрации меди наблюдаются в

[1] Установлено, что при использовании сеток с размерами ячей примерно 0,1 мм результаты отражают содержание ТМ главным образом в зоопланктоне.

Таблица 16.15

Среднее содержание ТМ (мг на 1 кг сухой массы) в планктоне Балтийского моря

Район	Cu	Pb	Cd	Zn	Источник
			Зоопланктон		
Открытая Балтика	19,7	31,9	5,75	407	[52]
	17,0	11,0	2,1	58	[160]
Южная Балтика	12—53	11—160	2,1—1,1	170—3900	[216]
	153	49	0,40	221	[165—488]
	27	47	2,4	280	[216]
			Фитопланктон и сестон		
Открытая Балтика	54,0	18,3	33,56	471	[52]
	157,0	309,0	5,40	1065	[89]
	251,0	22,0	—	561	[156]
	61	123	5,8	733	[500]
Южная Балтика	509	194	1,54	355	[165, 488]

Pontoporeia affinis и *Gammarus sp.*, свинца — в *Pygospio elegans* и *Harinothoe sarsi* и кадмия — в *Harmothoe sarsi* (табл. 16.16). Несомненно, эти различия связаны не только с видовой принадлежностью организмов, их образом жизни и типом питания, но также и с концентрацией ТМ в среде — в грунте и придонной воде. При мониторинге состояния морской среды в некоторых случаях лучше использовать данные по содержанию ТМ не в мягких тканях, а в створках раковин моллюсков (табл. 16.17).

На основе базовых исследований загрязнителей в рыбе и моллюсках, проведенных в 1985 г. МСИМ [430], охвативших Северную Атлантику, Северное и Балтийское моря, Хармс в [142] привел данные по всему Балтийскому морю и охарактеризовал некоторые географические различия содержания ТМ в сельди *(Clupea harengus)*, треске *(Gadus morhua)* и мидиях *(Mytilus edulis)*.

На рис. 16.2 приведены результаты квантильного анализа полного набора данных, включающего измерения в Ботническом, Финском, Рижском и Гданьском заливах, в открытой Балтике, в проливах Большой и Малый Бельт и Каттегат. Руководствуясь критериями, основанными на превышении значений, обнаруженных в конкретном районе, над значениях верхних квартилей $x_{0,75}$, рассчитанных по всему набору данных, оказалось возможным выделить районы Датских проливов, Арконского и северной части Борнхольмского бассейнов, а также Гданьского залива и прилегающих к нему открытых вод как более загрязненных по сравнению с другими. Как подчеркивает Хармс, эти выводы основаны на ограниченном числе географически неоднородно распределенных наблюдений, выполненных в разных странах. Поэтому, учитывая существующие сложности химических определений содержания ТМ, все-таки остается не вполне ясным, в какой степени эти результаты отражают истинные географические различия загрязнения, а в какой — «географическое» распределение различий аналитических способностей участвовавших лабораторий.

Содержание ТМ в рыбах характеризуется значительными видовыми, индивидуальными, а в некоторых случаях также возрастными и сезонными различиями (табл. 16.18). Согласно статистическим оценкам [118], концентрации меди, свинца, кадмия и ртути в салаке открытой Балтики с вероятностью 95 % не превышают соответственно 1,1, 0,18, 0,055 и 0,065 мг на 1 кг сырой массы. Увеличение длины тела (возраста) рыб сопровождается повышением концентрации ртути в мышечной ткани, а содержание свинца и кадмия, по-видимому, не связано с размерами рыб. Сезонные различия накопления ТМ (медь и кадмий) установлены для судака (бухта Пярну) [62, 118].

Таблица 16.16

Среднее содержание (мг на 1 кг сырой массы) ТМ в донных организмах Балтийского моря

Вид	Cu	Pb	Cd
Черви:			
Harmothoe sarsi	2,91	1,43	0,33
Scoloplos armiger	2,44	0,30	0,07
Pygospio elegans	2,95	2,36	0,03
Ракообразные:			
Idotea baltica	7,81	0,66	0,06
Mesidotea entomon	9,60	0,74	0,10
Pontoporeia affinis	34,58	0,46	0,11
Gammarus sp.	15,31	0,58	0,15
Neomysis integer	1,98	0,74	0,01
Crangon crangon	8,81	0,30	0,04

Таблица 16.17

Среднее содержание ТМ (мг на 1 кг сырой массы) в моллюсках Южной Балтики (1 — целые организмы, 2 — мягкие ткани тела, 3 — створки раковины)

Вид	Cu	Pb	Cd
Mytilus edulis			
1	1,59	0,40	0,25
2	0,75	0,31	0,33
3	2,20	0,55	0,07
Macoma baltica			
1	7,43	0,48	0,06
2	16,02	0,63	0,10
3	10,76	0,35	0,03
Astarte borealis			
1	10,34	3,25	0,04

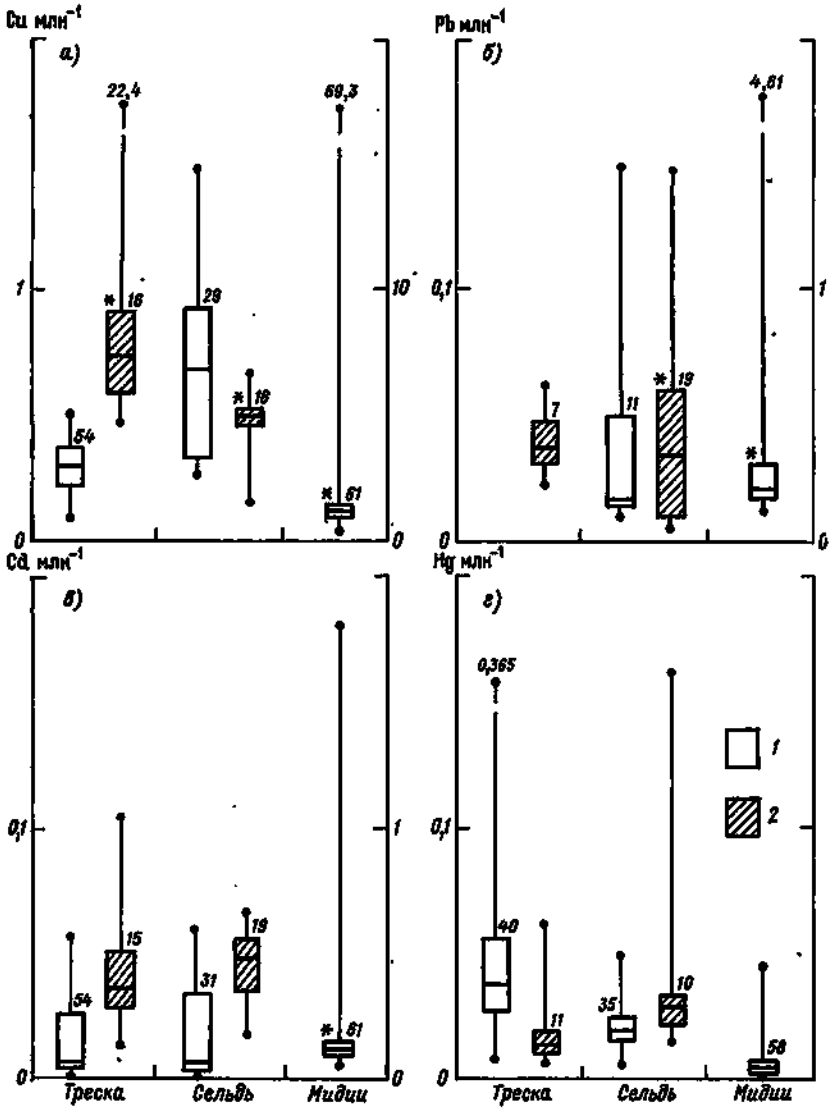


Рис. 16.2. Квантильные характеристики содержания тяжелых металлов (мг/кг сырой массы) в мидиях и рыбах (*1* — мышцы, *2* — печень) Балтийского моря. Цифры у «ящиков с усами» — число измерений, включенных в анализ; звездочки указывают на использование правой шкалы отсчета.

На основе многолетних (8—12 лет) материалов шведских и датских исследователей оказалось также возможным впервые оценить долговременные тенденции изменения содержания ТМ в рыбе различных районов Балтийского моря [141, 142, 361].

Обнаруженную в проливах Каттегат и Большой и Малый Бельт тенденцию к снижению содержания в рыбах и моллюсках свинца связывают с сокращением в Западной Европе использования бензина, содержащего свинец.

Содержание ртути в мышцах рыб в большинстве районов Балтики менялось незначительно, и его современный уровень — 0,05—0,15 мг на 1 кг сырой массы — мало отличается от соответствующих значений для Северного моря и Северо-Восточной Атлантики. Устойчиво повышенные концентрации (среднее значение за 1983—1987 гг. 0,22 мг на 1 кг сырой массы) выявлены в камбале в прол. Зунд, а в прол. Каттегат незначительные положительные тенденции обнаружены в сельди и лиманде и не обнаружены в треске и мидиях.

Аналогичные заключения сделаны в отношении меди и цинка: их содержание в мышцах балтийских рыб в общем не превышает 1 и 10 мг на 1 кг сырой массы соответственно и не слишком отличается от такового в рыбах Северного моря. Незначительное линейное возрастание содержания этих металлов с начала 80-х годов обнаружено в сельди северной части Ботнического залива.

Более ярко такая тенденция в этом районе выражена для кадмия — с 1981 по 1986 г. его содержание в печени сельди выросло более чем вдвое и превысило 2 мг на 1 кг сухой массы. Для Балтийского моря в целом удалось выявить закономерное уменьшение содержания кадмия в рыбах и мидиях с севера на юг, обратное изменениям солености воды. Это объясняется не только большей долей речного стока — основного агента импорта кадмия в море — в северных районах, но и влиянием солености на химические свойства растворенного кадмия и его биодоступность.

Ни один из изученных металлов не накапливается в биологических объектах в таких количествах, чтобы нарушалось исходное относительное содержание металлов в воде. Косвенно это доказывает, что накопление данных элементов гидробионтами происходит непосредственно из воды на основе сорбционных процессов. Это подтверждают и данные о том,

Таблица 16.18

Содержание ТМ (мг на 1 кг сырой массы) в мышцах некоторых рыб Балтийского моря

Район	Годы	n	Hg	Cd	Cu	Pb	Zn	Источник
				Сельдь				
Северная Балтика	1980	20	0,016	(3,6)	(18,6)	(0,79)	(92)	[219]
	1981	20	0,022	(1,5)	(6,7)	(0,25)	(70)	
	1982	20	0,059	(1,7)	(13,9)	(0,26)	(96)	
	1983	20	0,039	(1,5)	(11,2)	(0,33)	(82)	
Центральная Балтика		—	0,008—0,079	0,01—0,08	0,33—1,39	0,01—0,21	—	Данные ИТЭФ
			—	0,3—0,4	1,6—2,8	0,7—1,0	—	[59]
		—	0,05	0,09	0,8	0,5	—	[52]
		—	0,004—0,09	0,002—0,072	0,3—1,9	0,01—1,4	—	[289]
		—	0,009—0,232	—	—	—	—	[251]
Арконское море	1977—1980	—	—	0,16	0,94	1,90	7,7	[425]
Борнхольмское море		—	—	0,064	0,70	0,27	6,7	
Южная Балтика		—	—	0,064—0,164	0,70—0,97	0,27—1,86	—	[425]
		—	—	0,010—0,042	0,29—1,0	0,08—0,40	—	[251]
		—	0,020	0,47	1,3	0,05	—	[488]
	1979	—	0,020	0,047	1,3	0,05	4,7	[488]
	1981	—	—	0,010—0,042	0,29—1,00	0,08—0,40	7,8—27,0	[217]
	1980	20	0,013	(1,4)	(10,0)	(0,42)	(99)	[219]
	1981	20	0,009	(0,7)	(18,5)	(0,27)	(79)	
	1982	19	0,013	(1,1)	(9,3)	(0,20)	(87)	
	1983	20	0,017	(1,5)	(9,3)	(0,28)	(87)	
				Треска				
Арконское море	1977—1980	—	—	0,14	0,29	1,70	4,9	[425]
Борнхольмское море		—	—	0,057	0,25	0,39	4,0	
Южная Балтика	1979	—	0,004—0,013	0,008—0,124	0,6—2,3	0,041—0,097	3,0—21,3	[488]
		—	—	0,057—0,140	0,24—0,29	0,39—1,65	—	[425]
		—	0,038—0,093	—	—	—	—	[251]
Центральная Балтика		—	—	0,2	0,7	1,2	—	[59]
		—	0,022—0,037	—	—	—	—	[251]
		—	0,03—0,21	0,002—0,009	0,14—0,67	0,03—0,09	—	Данные ИТЭФ
	1980	20	0,024	(1,06)	(18,8)	(0,18)	(63)	[219]
	1981	20	0,030	(0,60)	(26,8)	(0,10)	(76)	
	1982	20	0,022	(0,37)	(19,0)	(0,10)	(59)	
	1983	20	0,037	(0,10)	(14,3)	(0,19)	(35)	
Балтийское море	1981	—	0,004—0,013	0,008—0,124	0,6—2,3	0,041—0,097	3,0—21,3	[217]
				Камбала				
Арконское море	1977	—	—	0,16	0,35	2,80	5,3	[425]
Борнхольмское море	1980	—	—	0,037	0,30	0,32	4,0	
Южная Балтика	1979	—	0,004	0,14	0,90	0,06	1,6	[488]
		—	—	0,037—0,157	0,30—0,41	0,32—2,66	—	[425]
		—	0,043—0,285	—	—	—	—	[251]
Открытая Балтика		—	0,04—1,50	0,002—0,021	0,10—0,89	0,03—0,09	—	Данные ИТЭФ

Примечание. В скобках указано содержание ТМ (мг на 1 кг сухого вещества) в печени рыб.

что уменьшение удельной поверхности тела организмов в ряду фитопланктон—зоопланктон—пелагические рыбы сопровождается уменьшением концентрации ТМ.

Из коэффициентов накопления ТМ следует, что в водорослях и беспозвоночных происходит наиболее интенсивное накопление цинка и свинца, а в рыбах — цинка и ртути. Выяснено, что как в пелагических, так и в донных пищевых цепях содержание и коэффициенты накопления меди, цинка, свинца и кадмия закономерно уменьшаются, а ртути, наоборот, увеличиваются при повышении трофического уровня гидробионтов [118].

Исходя из действовавших в СССР ПДК, можно заключить, что рыбы Балтийского моря не загрязнены ТМ. В настоящее время нет достоверных сведений об изменении структуры экосистемы Балтийского моря из-за влияния ТМ, хотя возможно, что их приток за счет антропогенных источников в течение последних десятилетий заметно увеличился. Однако необходимо иметь в виду, что обнаружение такого явления при точности существующих данных было бы возможно только в случае его проявления в очень резкой форме — в виде быстрой деградации экосистемы.

Возрастает обеспокоенность присутствием в морской среде органических соединений, содержащих олово, и в частности трибутилолова, добавляемого в краски в качестве агента против подводного обрастания. У мидий с побережий Швеции и Англии, в мягких тканях которых обнаружено трибутилолово, выявлены сходные деформации раковин [142, 361].

Элементы баланса тяжелых металлов. Исходя из имеющихся данных, за год в Балтику может поступать предположительно до 5000 т меди, 3500 т свинца, 380 т кадмия и 34 т ртути. Для меди доминирует поступление с речным стоком, для свинца

и ртути — приток из атмосферы, для кадмия важны оба источника. Источником поступления в Балтику ртути могут служить и сточные воды [62].

В настоящее время элементы баланса ТМ для пелагиали Балтийского моря можно оценить с относительно небольшой точностью, и поэтому на их основе нельзя сделать категорических выводов о дальнейшей динамике фонового содержания ТМ в воде Балтийского моря. Существующие данные о балансе меди, свинца, кадмия и ртути для Балтики можно интерпретировать следующим образом: для меди и кадмия они допускают равновесие между приходом и расходом и, вероятно, оно действительно существует. Однако нельзя исключить возможность некоторого увеличения содержания этих элементов в воде Балтики. В случае свинца и ртути эти данные свидетельствуют о тенденции дальнейшего повышения их содержания в воде Балтики, однако строгих доказательств пока не существует [118].

Новую попытку рассчитать поступление ТМ в Балтийское море предприняли шведские исследователи [214]. Согласно их оценкам, суммарные нагрузки, складывающиеся из природного (фонового) поступления с речным стоком и антропогенного поступления через атмосферу и со сточными водами, составляют: цинк — 11 000, медь — 2840, свинец — 1330, кадмий — 95, ртуть 14 т в год. Для кадмия и ртути эти значения существенно ниже, а для меди и свинца — практически совпадают с нижними пределами оценок, которые можно рассчитать по работе [118], суммируя такие приходные статьи балансов, как поступление с речным стоком, со сточными водами и через атмосферу: медь 2500—5370, свинец 1640—3830, кадмий 19—450, ртуть 40—65 т в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алекин О. А., Ляхин Ю. И. Химия океана. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 343 с.
2. Альтшулер В. М. Водообмен через Датские проливы и проблема анализа и расчета водного баланса Балтийского моря//Труды ГОИН. — 1980. — Вып. 152. — С. 62—77.
3. Антонов А. Е. Закономерности изменчивости гидрологических и гидрохимических условий в бассейне Балтийского моря//Докл. на V конф. балтийских океанографов. — Л., 1966.
4. Антонов А. Е. Краткая характеристика изменений гидрологических и гидрохимических условий Балтийского моря за последнее двадцатилетие//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1967. — Вып. 2. — С. 3—15.
5. Антонов А. Е. Некоторые закономерности гидрохимического режима глубоководных районов Балтийского моря//Химические ресурсы морей и океанов. — М., 1970.— С. 79—84.
6. Антонов А. Е. Прогностические связи между гидрометеорологическими явлениями в прибрежной зоне и открытых районах Балтийского моря//Труды ГОИН. — 1972. — Вып. 115. — С. 41—48.
7. Антонов А. Е. Современные тенденции изменений гидрологических и гидрохимических условий Балтийского моря//Труды ГОИН. — 1978. — Вып. 147. — С. 117—129.
8. Антонов А. Е. Крупномасштабная изменчивость гидрометеорологического режима Балтийского моря и ее влияние на промысел. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 248 с.
9. Антонов А. Е., Руднева О. С. Особенности гидрологических и гидрохимических условий в Южной Балтике в период МГГ//Океанологические исследования. — 1964.— № 13. — С. 90—95.
10. Антонов А. Е., Руднева О. С. Некоторые черты гидрохимического режима южной части Балтийского моря//Химические процессы в морях и океанах. — М., 1966. — С. 83—89.
11. Ауниньш Э. А. Сезонные изменения гидрохимических условий в Рижском заливе (по материалам 1959 г.)// Труды ГОИН. — 1961. — Вып. 59.
12. Афанасьева Н. А. Баланс и прогноз загрязнений Северной Атлантики, Балтийского и Каспийского морей нефтяными углеводородами. — Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — М.: ГОИН. 1981. — 20 с.
13. Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Сер. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. III. — Л.: Гидрометеоиздат, 1992. — 450 с.
14. Буйневич А. Г. Щелочность и кальций//Гидрохимический режим Балтийского моря. — Л., 1965. — С. 30—45.
15. Бурдин К. С., Полякова Е. Е. Распределение тяжелых металлов по частям таллота дальневосточных зеленых водорослей//Вестн. МГУ. Биол. — 1984. — № 4. — С. 34—39.
16. Бычков А. С., Павлов Г. Ю., Кропотов В. А. Карбонатная система//Химия морской воды и аутигенное минералообразование. — М., 1989. — С. 49—111.
17. Войпио А. Современные тенденции изменения химических и биологических характеристик Балтийского моря// Труды XII конф. балтийских океанографов (Ленинград, 14—17 апр. 1980 г.) и VII совещания экспертов по водному балансу Балтийского моря (Ленинград, 17—19 апр. 1980 г.). — Л., 1981. — С. 75—84.
18. Герлах С. А. Загрязнение морей: диагноз и терапия. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 263 с.
19. Гидрохимический режим Балтийского моря/ Е. Н. Черновская, Н. М. Пастухова, А. Г. Буйневич и др. — Л.: Гидрометеоиздат, 1965. — 168 с.
20. Гловинска А., Маттеус В., Тамсалу Р. Э. Изменчивость гидрофизических полей Балтийского моря// Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 1. — М., 1984. — С. 91—114.
21. Годовой ход гидрологических и гидрохимических элементов в верхнем слое Балтийского моря/И. С. Шпаер, Н. В. Мякишева, И. П. Кубарев и др.//III съезд советских океанологов. Ленинград, 14—19 дек. 1987 г. Тез. докл. Секция «Физика и химия океана». Гидрохимия и проблемы загрязнения океанов и морей. — Л., 1987. — С. 227—229.
22. Гордеев В. В. Речной сток в океан и черты его геохимии. — М.: Наука, 1983. — 160 с.
23. Давидавичене Л. Г., Шопаускене Д. А. Оценки балансов биогенных элементов и органического вещества в Балтийском море. Поступление соединений азота и фосфора из атмосферы//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 112—118.
24. Демина Л. Л. Формы нахождения некоторых тяжелых металлов в водах Балтийского моря//Геологическая история и геохимия Балтийского моря. — М., 1984. — С. 55—64.
25. Дерюгин К. М. Гидрологические и гидробиологические исследования Невской губы. I. Гидрология и бентос//Исследование р. Невы и ее бассейна. Вып. 2. — Петроград, 1925. — 38 с.
26. Дерюгин К. М. Гидрологический очерк Невской губы// Труды ГОИН. — 1947. — Вып. 1 (13).
27. Дмитриев В. В. Общий органический азот в водах Северного и Балтийского морей//Вестн. ЛГУ. — 1977. — № 12. — С. 114—122
28. Друмева Л. Б. Об определении и расчете солености морских вод//Водные ресурсы. — 1986. — № 2.
29. Друмева Л. Б., Маврина М. В. Современный солевой состав вод Балтийского моря//Метеорология и гидрология. — 1988. — № 3. — С. 73—81.
30. Друмева Л. Б., Михайлова Н. А., Федосимов В. А. Водный и солевой баланс Балтийского моря// Водные ресурсы. — 1986. — № 6.
31. Емельянов Е. М., Пустельников О. О. Взвешенное вещество, его состав и баланс осадочного материала в водах Балтийского моря//Геология Балтийского моря.— Вильнюс, 1976. — С. 159—186.
32. Зекцер И. С. Количественная оценка подземного стока в Балтийское море//Труды XII конф. балтийских океанографов (Ленинград, 14—17 апр. 1980 г.) и VII совещания экспертов по водному балансу Балтийского моря (Ленинград, 17—19 апр. 1980 г.). — Л., 1981. — С. 217—221.

33. Иванов-Францкевич Г. Н. Совещание объединенной группы по изучению уравнения состояния морской воды//Океанология. — 1963. — Т. 3, вып. 6. — С. 1116—1118.
34. Изменение среднего уровня и объема вод Балтийского моря и новая оценка атмосферных осадков и испарения с его поверхности за исторический период/Н. Н. Лазаренко, А. Н. Некрасова, Л. П. Орленко и др.//Труды XII конф. балтийских океанографов (Ленинград, 14—17 апр. 1980 г.) и VII совещания экспертов по водному балансу Балтийского моря (Ленинград, 17—19 апр. 1980 г.). — Л., 1981. — С. 188—196.
35. Калейс М. В. Некоторые особенности продвижения каттегатских вод внутрь Балтийского моря//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1970. — Вып. 7. — С. 3—10.
36. Калейс М. В. Гидрологический режим промыслового района Центральной Балтики в 1960 г.//Труды конф. молодых специалистов НИИРХ СНХ Латв. ССР. — Рига, 1982.
37. Калейс М. В. Кислородный режим Балтийского моря// Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 1. — М., 1984. — С. 68—81.
38. Калейс М. В Гидрохимические показатели эвтрофикации. Кислород//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 74—78.
39. Калейс М. В., Тамсалу Р. Э. Соленостный режим Балтийского моря//Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 1. — М., 1984. — С. 33—51.
40. Калейс М. В., Тамсалу Р. Э. Термический режим Балтийского моря//Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря Т. 1. — М., 1984. — С. 51—67.
41. Лаанеметс К., Талвари А., Янковский Х. Неполярные углеводороды донных осадков Балтийского моря//Изв. АН ЭССР. Сер. Химия. — 1981. — № 36. — С. 226—231.
42. Лебединцев А. А. Гидрологические и гидрохимические исследования восточной части Балтийского моря в августе—сентябре 1908 г. — СПб.: Изд-во ГУЗ, 1910. — 87 с.
43. Ляэнс А. А. Оценки балансов биогенных элементов и органического вещества в Балтийском море. Нагрузка органическим веществом и биогенными элементами с суши//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 110—112.
44. Максимова М. П. Особенности баланса органического вещества в южных и северных внутренних морях СССР//Труды ВНИРО. — 1971. — Т. 30. — С. 7—17.
45. Максимова М. П. Баланс биогенных элементов и органического вещества в Балтийском море в период интенсивного антропогенного воздействия//Океанология. — 1982. — Т. 22, вып. 3. — С. 751—756.
46. Максимова М. П Баланс биогенных элементов и органического вещества Балтийского моря//Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 1. — М., 1984. — С. 242—272.
47. Метод анализа сезонной изменчивости неэквидистантных временных рядов гидролого-гидрохимических данных/С. М. Микулинская, Н. Н. Михайлов, В. А. Рожков, И. С. Шпаер//Режимообразующие факторы, информационная база и методы ее анализа. — Л., 1989. — С. 109—132.
48. Методические указания по химическому анализу распресненных вод морских устьевых областей рек и эпиконтинентальных морей. — М., 1984. — № 46. — С. 32—39.
49. Методы гидрохимических исследований океана. — М.: Наука. — 270 с.
50. Микульский З. Состояние исследования водного баланса Балтийского моря на современном этапе//Труды XII конф. балтийских океанографов (Ленинград, 14—17 апр. 1980 г.) и VII совещания экспертов по водному балансу Балтийского моря (Ленинград, 17—19 апр. 1980 г.). — Л., 1981. — С. 13—20.
51. Монин А. С., Лисицын А. П. Биогеохимия океана.— М.: Наука, 1983. — 368 с.
52. Морозов Н. П., Петухов С. А. Содержание и распределение тяжелых металлов в компонентах экосистемы Балтийского моря//Исследование экосистемы Балтийского моря. — Л.: Гидрометеоиздат, 1981. — С. 98—131.
53. Мякишева Н. В., Шпаер И. С. Режим солености верхнего слоя Балтийского моря и влияние на него речного стока//Вестн. ЛГУ. Сер. 7. — 1991. — № 10.
54. Неринг Д. Особенности солевого состава. pH и щелочность. Газы. Биогенные элементы. Азот//Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 1. — М., 1984. — С. 125—154, 194—213.
55. Ноздрик Ю. П. О многолетних изменениях солености, температуры и содержания кислорода на основных нерестилищах трески в Южной Балтике в 1958—1964 гг.// Труды АтлантНИРО. — 1969. — Вып. 21.
56. Орадовский С. Г., Токуев Ю. С., Федосов М. В. Изучение условий определения кремнекислоты в морской воде в ультрафиолетовой области спектра//Методы рыбохозяйственных химико-океанографических исследований. Ч. 2. — М., 1968. — С. 101—118.
57. Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 1. — М.: Координационный центр стран — членов СЭВ, 1984 — 390 с.
58. Пальм Т. Б., Сергеева З. М. Распределение тяжелых металлов в некоторых компонентах морской среды в прибрежной зоне северо-восточной Балтики//Изв. АН ЭССР. Сер. Биол. — 1987. — Т. 36. вып. 1. — С. 29—36.
59. Переходные и тяжелые металлы в воде и гидробионтах Балтийского бассейна/Н. П. Морозов, Л. Л. Демина, Л. М. Сононова, Н. П. Прохорычева//Труды ВНИРО. — 1974. — Т. 100. — С. 32—36.
60. Поликарпов Г. Исследования распределения ДДТ в воде и гидробионтах Черного моря и дельты Дуная//Радиоэкология Черного моря. — Киев, 1977. — С. 107—119.
61. Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Международный проект «Балтика» — Л.: Гидрометеоиздат, 1984, 1987, 1989.
Вып. 1: Экосистема и ее компоненты. — 1983. — 256 с.; Вып. 2: Изменчивость компонентов экосистемы и динамика вод. — 1984. — 207 с.; Вып. 3: Моделирование компонентов экосистемы. — 1987. — 256 с.; Вып. 4: Основные тенденции эволюции экосистемы. — 1989. — 262 с.
62. Пыдер Т А Приток, распределение и перенос тяжелых металлов в экосистеме Балтийского моря. — Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. — Тарту, 1981. — 15 с.
63. Результаты интеркалибрации методов определения тяжелых металлов/Н. П. Морозов, Р. Э. Отт. Г. Литпер. С. Лингрен//Исследование экосистемы Балтийского моря. Вып. 1. — Л., 1981. — С. 163—171.
64. Рожков В. А. Анализ натурных данных в проекте «Моря СССР»//Режимообразующие факторы, информационная база и методы ее анализа. — Л., 1989. — С. 9—22.
65 Роотс О. О., Пейкре Э. А. О содержании полихлорированных бифенилов и хлорорганических пестицидов в рыбах Балтийского моря//Изв. АН СССР. Сер. Химия. — 1981. — Т. 27, вып. 3. — С 193—196.
66. Роотс О. О., Пейкре Э. А. О содержании устойчивых бифенилов и пестицидов в зоопланктоне моря//Водные ресурсы. — 1981. — № 6 — С. 182—187.
67. Россолимо Л. Л. Изменение химических экосистем под воздействием антропогенного фактора. — М.: Наука, 1977. — 144 с.
68. Руководство по методам химического анализа морских вод. — Л : Гидрометеоиздат. 1977. — 208 с.
69. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. — Л : Гидрометеоиздат. 1977. — 541 с.
70. Рябиков О. Г. О распределении биогенных элементов в открытой части Балтийского моря в 1955 г.//Труды БалтНИИРО. — 1956 — Вып. 2.
71. Савинова Т. Н. Содержание хлорорганических соединений в планктоне//Планктон прибрежных вод восточного Мурманска. — Апатиты, 1982. — С. 120—129.
72. Савчук О. П. Структурно-функциональная характеристика и основные тенденции эволюции экосистемы Балтийского моря//Экосистема и ее компоненты. — Л.: Гидрометеоиздат. 1981. — С. 11—27.
73. Савчук О. П. О соотношении природных и антропогенных факторов эвтрофикации//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 144—149.
74. Савчук О. П. Проблемы составления балансов//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат. 1989. — С. 107—110.
75. Савчук О. П. Современные оценки балансов//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат. 1989. — С. 118—125.
76. Савчук О. П., Балоде М. Я. Фитопланктон//Экосистема и ее компоненты. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — С. 142—152.
77. Савчук О. П., Волкова В. В. Исследование и предсказание эвтрофикации Балтийского моря с помощью имитационной модели//Докл. АН СССР. — 1990. — Т. 314, № 4. — С. 1006—1009.

78. Савчук О. П., Гутшабаш Е. Ш. Модель многолетней динамики вещества в море//Моделирование компонентов экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — С. 111—137.
79. Савчук О. П., Гутшабаш Е. Ш. Моделирование многолетней динамики вещества//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 125—144.
80. Сапожников В. В. Гидрохимические особенности Балтийского моря//Океанология. — 1991. — Т. 31, вып. 6. — С. 955—962.
81. Сапожников В. В., Гусарова А. Н., Лукашев Ю. Ф. Определение нитратов в морской воде//Материалы Всесоюз. семинара «Совершенствование гидрохимических методов в промыслово-океанографических исследованиях ресурсов Мирового океана». — М., 1970. — С. 6—7.
82. Скопинцев Б. А., Максимова М. П. Расчет содержания свободной углекислоты и отдельных форм сернистых соединений в воде Черного моря//Химические ресурсы морей и океанов. — М., 1970.
83. Содержание цинка, свинца, кадмия и ртути в гидробионтах Рижского залива/З. К. Сейсума, И. Р. Куликова, Д. Р. Вадзис, М. Б. Маздиня//Биоценозы различных трофических уровней. — Рига, 1983. — С. 162—177.
84. Сопоставление гидрохимических данных, полученных различными методами, с помощью разведочного анализа/И. С. Шпаер, П. Г. Берг, Э. Г. Носкова, Ц. Ю. Разумовская//Режимообразующие факторы, гидрометеорологические и гидрохимические процессы в морях СССР. — Л., 1988. — С. 146—160.
85. Суставов Ю. В. Формирование изменчивости гидрофизических процессов в морях с различным характером водообмена с океаном//Режимообразующие факторы, информационная база и методы ее анализа. — Л., 1989. — С. 266—288.
86. Сухорук В. И., Ноздрин Ю. П. Некоторые особенности кислородного режима вод южной части Балтийского моря//Труды АтлантНИРО. — 1969. — Вып. 21.
87. Талвари А., Лаанеметс К., Янковский Х. Групповой состав липидов из поверхностного слоя донных осадков Балтийского моря//Изв. АН ЭССР. Сер. Химия. — 1987. — Т. 36. — С. 283—287.
88. Тихомирова А. А., Морозов Н. П., Патин С. А. Ртуть, свинец и кадмий в поверхностных водах Балтийского моря//Материалы I Всесоюз. симпозиума по океанографическим аспектам охраны вод от химических загрязнений. — М., 1975. — С. 150—153.
89. Тяжелые металлы в гидробионтах Рижского залива/З. К. Сейсума, И. Р. Куликова, Д. Р. Вадзис, М. Б. Легздиня. — Рига: Зинатне, 1984. — 179 с.
90. Тьюки Дж. Анализ результатов наблюдений/Пер. с англ. — М.: Мир, 1981. — 693 с.
91. Федосов М. В., Зайцев Г. Н. Водный баланс и химический режим Балтийского моря и его заливов//Труды ВНИИОРХ. — 1960. — Т. 2.
92. Федосов М. В., Зайцев Г. Н. Водный баланс и химический режим Балтийского моря и его заливов//Труды ВНИРО. — 1961. — Т. 42. — С. 3—14.
93. Физическая и химическая изменчивость Балтийского моря и проблемы мониторинга: совместный эксперимент в Готландской впадине/А. Айтсам, Ю. Элкен, Н. Кахру и др.//Комплексный глобальный мониторинг Мирового океана. Труды I Международного симпозиума. Таллинн, 2—10 окт. 1983 г. — Л., 1985. — Т. 3. — С. 151—159.
94. Характеристика информационной базы/В. А. Рожков, А. Е. Михайлов, Н. Н. Михайлов, И. Г. Ульянич//Изменчивость элементов экосистемы и динамика вод. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — С. 160—167.
95. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. — Л.: Гидрометеоиздат, 1990. — 280 с.
96. Химия океана. Т. I. Химия вод океана. — М.: Наука, 1979. — 520 с.
97. Хупфер П. Балтика — маленькое море, большие проблемы/Пер. с нем. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 136 с.
98. Черновская Е. Н. Некоторые особенности распределения и режима фосфатов в Балтийском море//Труды ГОИН. — 1961. — Вып. 59.
99. Черняк С. Хлорорганические углеводороды в морских донных отложениях Балтийского моря//Труды ГОИН. — 1979. — Вып. 149. — С. 44—49.
100. Шоходько Т. И., Мережко А. И., Малиновская М. В. Поглощение ДДТ некоторыми видами высших водных растений//Формирование и контроль качества поверхностных вод. Вып. 3. — Киев, 1976. — С. 113—116.
101. Шпаер И. С. Загрязнение Балтийского моря хлорированными и нефтяными углеводородами (обзор)//Труды ГОИН. — 1982. — Вып. 157. — С. 94—113.
102. Шпаер И. С. Оценка состояния гидрохимических условий акваторий с помощью квартильного анализа результатов наблюдений//Океанографические аспекты охраны морей и океанов от химических загрязнений. Материалы Всесоюз. науч. симпозиума. Одесса, 3—6 окт. 1988 г. — М., 1990. — С. 196—201.
103. Шпаер И. С., Ларионов Ю. В. Абиотические компоненты экосистемы. Кислород//Экосистема и ее компоненты. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — С. 102—117.
104. Шпаер И. С., Мякишева Н. В. Новые методические подходы к расчету характеристик годового хода гидрологических и гидрохимических элементов в верхнем слое Балтийского моря//III съезд советских океанологов. Тез. докл. Секция «Физика и химия океана». Гидрохимия и проблемы загрязнения океанов и морей. — Л., 1987.
105. Шпаер И. С., Мякишева Н. В. Методические подходы к статистическому обобщению материалов многолетних гидролого-гидрохимических наблюдений с помощью характеристики сезонной изменчивости//Режимообразующие факторы, гидрометеорологические и гидрохимические процессы в морях СССР. — Л., 1988. — С. 161—177.
106. Юревичус Р. Гидрохимическая характеристика залива Куршю Марес. Итоги комплексного исследования. — Вильнюс: Изд. АН ЛитССР, 1959.
107. Юрковский А. К. О причинах высокого содержания фосфатов в глубинных водах Балтийского моря//Методы рыбохозяйственных химико-океанографических исследований. Ч. 2. — М., 1968. — С. 191—203.
108. Юрковский А. К. О роли железо-гуматных коагулянтов в накоплении фосфатов в глубинах стагнированных впадин Балтийского моря//Исследование по теоретической и прикладной химии моря. — М., 1972. — С. 51—66.
109. Юрковский А. К. О значении некоторых химических процессов в придонном слое глубоководных впадин в динамике запасов минерального фосфора Балтийского моря//Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1974. — Вып. 10. — С. 3—16.
110. Юрковский А. К. О кинетике некоторых химических процессов во впадинах Балтийского моря//Химико-океанографические исследования морей и океанов. — М., 1975. — С. 124—129.
111. Юрковский А. К. Абиотические компоненты экосистемы. Биогенные элементы. Органическое вещество//Экосистема и ее компоненты. — Л.: Гидрометеоиздат, 1983. — С. 113—140.
112. Юрковский А. К. Кремний. Органическое вещество//Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 1. — М., 1984. — С. 214—241.
113. Юрковский А. К. Фосфор//Очерки по биологической продуктивности Балтийского моря. Т. 1. — М., 1984. — С. 155—194.
114. Юрковский А. К. Гидрохимические показатели эвтрофикации. Биогенные элементы//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 79—90.
115. Юрковский А. К., Луке М. П. Результаты изучения взвешенного фосфора в Балтийском море в 1971 г.// Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. — 1975. — Вып. 11. — С. 22—30.
116. Юрковский А. К., Ругайне И. О. О периодичности и динамике содержания фосфора в водах Готландской впадины//Режимообразующие факторы, гидрометеорологические и гидрохимические процессы в морях СССР. — Л., 1988. — С. 178—187.
117. Юрковский А. К., Хозиоский С. А. Анализ послойной, сезонной и многолетней динамики фосфора в Балтийском море на примере Готландской впадины// Океанология. — 1982. — Т. 22, вып. 4. — С. 584—589.
118. Янковский Х. И., Пыдер Т. А., Сымм М. А. Тяжелые металлы в экосистеме Балтики//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 150—200.
119. Ярвекюльг А. А. Проблема эвтрофикации//Основные тенденции эволюции экосистемы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — С. 61—67.
120. Accumulation of chlororganic compounds and petroleum hydrocarbons in the Baltic Sea algae/H. Kukk, H. Heinlaid, A. Talvari, H. Jankovski//Proc. of the 16th

Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1989. — P. 623—640.
121. Ahnoff M., Johnson L. Quantitation and characterization of petroleum hydrocarbons in Baltic Sea water// Chem. rep. to the Soviet-Swedish expertimeet. of evaluation of results from Joint Musson Exp., 1976, Apr. 24—30. — Getenburg, 1977. — P. 1—33.
122. Almgren T., Fonselius S. H. Determination of the alkalinity and total carbonate//Methods of sea water analysis. — Weinheim; N. Y., 1976. — P. 97—115.
123. Andersin A. B., Sandler H. Occurence of hydrogen sulphide and low oxygen concentrations in the Baltic deep basins//Proc. of the 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1989. — P. 102—111.
124. Andrulewicz E., Samp R. Chlorinated hydrocarbons in the cross-section Gdynia — BOSEX-77 area//Proc. of the 11th Conf. of Baltic Oceanographers. — 1978. — P. 298—305.
125. Andrulewicz E., Trzosinska A. Estimation of input and distribution of chlorinated hydrocarbons in the Baltic Sea//Proc. of the 14th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1984. — P. 422—427.
126. Andrulewicz E., Brzezinska A., Trzosinska A. Some aspects of the chemical composition of particulate matter in Southern Baltic//ICES C. M. — 1979. — 9 p.
127. Armstrong F. A. J., Williams P. M., Strickland J. D. N. Photooxydation of organic matter in the sea water by ultraviolet radiation, analytical and other applications//Nature. — 1966. — Vol. 211. — P. 481—483.
128. Assessment of the marine environment in the Baltic Sea areas//Rep. 4th Meet. of Scientific-technological working group of Inter. Baltic Mar. Environ. Protection Comm. Turku, 1977. — P. 89—132.
129. Assessment of the effects of pollution of the natural resources of the Baltic Sea/T. Melvasalo, J. Pawlak, K. Grasshoff et al.//Baltic Sea Environ. Proc. — 1981, N 5B. — 426 p.
130. Astok V., Nomm A., Taamsaalu R. Some ideas on optimization of the Baltic Sea monitoring//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. P. 297—306.
131. Astok V., Velner H., Shekhovtsov A. Monitoring and variability of the marine environment//Proc. of Symp. on ecol. investigation of the Baltic Sea environment, Riga, 1983. — Helsinki, 1985. — P. 23—27.
132. Bagge P. Pesticide residues in some Baltic animals. A review of selected literature//Pure Appl. Chem. — 1975. — Vol. 42, N 1—2. — P. 129—137.
133. Baltic Intercalibration Workshop. Report of the Baltic Intercalibration Workshop, March, 7—19, Kiel, 1977. — 156 p.; Annex. — 306 p.
134. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1984. Guidelines for the Baltic monitoring programme for the Second Stage//Baltic Sea Environ. Proc. — 1984. — N 12.
135. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1986. First Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea Area. General Conclusions//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 17A.
136. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1987. First Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea Area. Background Document//Baltic Sea Environ. Proc.— 1987. — N 17B.
137. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1988. Activities of the Commission 1987//Baltic Sea Environ. Proc. — 1988. — N 26.
138. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1988. Guidelines for the Baltic Monitoring Programme for the Third Stage//Baltic Sea Environ. Proc. — 1988. — N 27A, 27B, 27C, 27D.
139. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1989. Activities of the Commission 1988//Baltic Sea Environ. Proc. — 1989. — N 29.
140. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1990. Activities of the Commission 1989//Baltic Sea Environ. Proc. — 1989. — N 33.
141. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1990. Second periodic assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea, 1984—1988. General conclusions//Baltic Sea Environ. Proc. — 1990. — N 35A.
142. Baltic Marine Environment Protection Commission — Helsinki Commission — 1990. Second Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea, 1984—1988. Background Document//Baltic Sea Environ. Proc. — 1990. — N 35B.
143. Banse K. Die Verteilung von Sauerstoff, Phosphat und suspend ierter Substanz. Ergebnisse eines hydrographisch-productions biologischen Langschnitts durch die Ostsee im Sommer 1956. II//Kieler Meeresforsch. — 1957. — Bd. 13, H. 2.
144. Bendschneider K., Robinson R. J. A new spectrophotometric method for the determination of nitrate in sea water//J. Mar. Res. — 1952. — Vol. 11. — P. 87—96.
145. Berggren B. PCB and DDT in Baltic Sediments//2nd Swedish-Soviet Symp. of protection of Baltic from pollution. — 1973. — P. 3—12.
146. Berner M., Schemainda R. Über die Abhängigkeit du Laichdorschertrage im Bornholmbecken von der hydrographischen Situnation//Deutsche Fischerei Ztg. — 1958. — N 5. — S. 63—70.
147. Bolin B. Model studies of the Baltic Sea//Ambio Spec. Rep. 1972. — N 1. — P. 115—119.
148. Bolin B. Research programmes for investigations of the Baltic as a natural resource with special reference to pollution problems//ICES Coop. Res. Rep. Ser. A. — 1974. — N 42. — P. 1—45.
149. Borisov E. On the evaluation of the pollution rate of the Baltic Sea using monitoring data//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 76—87.
150. Borisov E. The Baltic monitoring programme. General outlines and first experiences//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 28—38.
151. Börngen M. On the causes of the strong salt inflows into the Baltic//Proc. of the 11th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1978. — P. 305—315.
152. Börngen M. Beitrag zur Analyse und Interpretation zeitlicher Anderungen des Salzgehaltes im Bereich des Ostsee — Eingäne//Geod. Geophys. Veröff. R. IV. — 1983. — N 38. — S. 67—109.
153. Böström K., Burman J. O., Ingri J. A. A geochemical massbalance for the Baltic//Proc. 5th Intern. Symp. on Environ. Biogeochemistry (ICES), Stockholm, 1981: Ecol. Bull. — 1983. — N 35. — P. 39—58.
154. Breder R., Flucht R., Nürnberg H. A comparative study of the toxic trace metal situation in the Tyrrhenian estuaries//Thalassia Jugosl. — 1982. — Vol. 18, N 1—4. — P. 135—171.
155. Broman D., Ganning B. Bivalve molluscs for monitoring diffuse oil pollution in a Northern Baltic archipelago//Ambio. — 1985. — Vol. 14. — P. 23—28.
156. Brügmann L. Zur Verteilung einiger Schwermetalle in der Ostsee — eine Übersicht//Acta Hydrochim. Hydrobiol. — 1977. — Bd. 5, H. 1. — S. 3—21.
157. Brügmann L. Some remarks on the content of mercury in the Baltic//Proc. of the 11th Conf. of Baltic Oceanographers. — 1978. — P. 249—263.
158. Brügmann L. Trace metals in the Baltic Sea 1980 and 1981//Proc. of the 13th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1982. — P. 182—187.
159. Brügmann L. Relation between «dissolved» and particulate trace metal fractions in Baltic Sea waters//Paper on Intern. Symp. «Complexation of trace metals in natural waters», Texel, May 1983.
160. Brügmann L., Hennings U. Trace metal budgets and fluxes for the Baltic Sea//Proc. of the 14th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1984. — P. 465—489.
161. Brügmann L., Lucas B. Zum Vorhommen von polychlorieten Biphenylen und DDT — Metaboliten in Plankton und Wasser der Ostsee//Fisherei—Forschung. — 1978. — Bd. 16. — S. 31—37.
162. Brügmann L., Wilde A. Die Bestimmung des Gehaltes an organischem Phosphor und Stickstoff im Meerwasser durch einen Aufschluss mit ultraviolettem Licht// Acta Hydrochim. Hydrobiol. — 1975. — Bd. 3. — S. 203—211.
163. Brügmann L., Nehring D., Rohde K.-H. Verteilung einiger Schadstoffe in der Ostsee//Geod. Geophys. Veröff. R. IV. — 1980. — H. 31. — S. 1—39.
164. Brzezinska A. Trace metals in the waters of the Gdansk Basin//Proc. of the 11th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1978. — P. 264—278.
165. Brzezinska A. Metale sladowa organizmach Baltyku Poludniowego//Gaz. Obserw. IMGW. — 1981. — Vol. 34, N 6. — P. 13—15.
166. Buch K. Eine biologisch-chemische Studie im Hafenwasser von Helsingfors//Conseil Perm. Intern. P. l'explor. Mer. Rapp. Proc. Verb. — 1931. — Vol. 75.

167. Buch K. Untersuchungen über gelöste Phosphate und Stichstoffverbindungen in der nordbaltischen Meeresgebieten//Havsforskningsinst. Skr. 1932. — N 86. — S. 1—28.
168. Buch K. Det biokemiska kretsloppet i Osterjobäckenet// Societas scientiarum Fennica. — 1934. — Vol. 12, N 6.
169. Buch K. Kolsyrejämvitken i Baltiska havet//Fennia. 1945. — Bd. 68, N 5. — 208 p.
170. Buch K. Physikalische und chemische Verhältnisse in Beziehung zur biologischen Aktivität im Wasser des Südwestlichen Schärenmeeres von Finland//Havsforskninginst. Skr. — 1954, N 159.
171. Buch K., Gripenberg S. Jahreszeifliher Verlauf der chemischen und biologischen Faktoren im Meereswasser bei Hangö im Jahre 1935//Merentutkimuslait. Julk. — 1938. — N 118. — S. 1—26.
172. Bulletins hydrographiques pour les annees 1908—1956//Conseil perm. intern. p. l'explor. Mer. — Copenhague, 1910—1962.
173. Carlberg C. The new Baltic manual//ICES Coop. Res. Rep. — 1972. — N 29A. — P. 1—145.
174. Carlberg S. R. The three year study of the occurence of non-polar hydrocarbons in the Baltic waters 1970—1973//ICES C. M. — 1973/E. — 28 p.
175. Carlberg S. R., Skarstedt C. B. Determination of small amounts of non-polar hydrocarbons (oil) in sea water//J. Cons. int. Explor. Mer. — 1972. — Vol. 34, N 3. — P. 506—515.
176. Carman R., Wulff F. Adsorption capacity of phosphorus in Baltic Sea sediments//Estuarine Coast. Shelf Sci.— 1989. — Vol. 29. — P. 447—456.
177. Cederwall H., Elmgren R. Biological effects of eutrophication in the Baltic Sea, particularly the coastal zone//Ambio. — 1990. — Vol. 19. — P. 109—112.
178. Chemical results of the Grid Program of the Patchiness Experiment 1986 in the Baltic Sea/S. H. Fonselius, D. Nehring, M. Perttilä et al.//Proc. of the 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1989. — P. 443—456.
179. Chlorinated hydrocarbons in animals of Skagerrak/ G. Eder, R. G. Schafter, W. Ernst, H. Goerke//Veröff. Inst. Meeresforsch. — 1976. — N 1. — P. 1—9.
180. Chlorinated hydrocarbons in the Gdansk Basin/ E. Andrulewicz, Cz. Garbolewski, R. Samp, W. Slaczka// Project EPA — USA. — 1977. — N PR.05.532—13.
181. Chlorinated hydrocarbons in the Baltic Sea, 1980/ M. Mohnke, K. Rohde, P. Franz, L. Brugmann//Proc. of the 13th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1982. — Vol. 2. — P. 548—564.
182. Collier R., Edmoud J. Trace element geochemistry of marine biogenic particulate matters//Progr. Oceanol. — 1984. — Vol. 13. — P. 113—199.
183. Concentrations of PCB, BHC and DDT residues in seaweeds of the east coast of Sicily/V. Amico, G. Oriente, M. Piatelli, C. Triangli//Mar. Pollut. Bull. — 1979.— Vol. 10, N 6. — P. 177—179.
184. Concentration and deposition of atmospheric pollutants on the Baltic Sea/S. Armalis, L. Davidaviciene, K. Kvietkus, D. Shopauskiene//Baltic Sea Environ. Proc.— 1987. — N 19. — P. 194—203.
185. Conran P. ICES fifth round intercalibration for trace metals in sea water//ICES C. M. — 1984. — N 40. — 16 p.
186. Contents of metals and chlorinated hydrocarbons in fish and benthic invertebrates in the Gulf of Bothnia and in the Gulf of Finland in 1979/V. Tervo, K. Erkomaa, H. Sandler et al.//Aqua Fenn. — 1980. — Vol. 10. — P. 42—57.
187. Cox I. L. DDT residues in marine phytoplankton//Sci. — 1970. — N 170. — P. 71—73.
188. Cox I. L. DDT in marine plankton and fish in the California current//Calif. Coop. Ocean. Fish. Inst. Repts. — 1972. — N 16. — P. 107—114.
189. Crosby D. G. The toxicant — wildlife complex//Pure Appl. Chem. — 1975. — Vol. 42. — P. 233—253.
190. Crusado A. Eutrophication in the pelagic environment and its assessment//UNESCO Rep. Mar. Sci. — 1988. — N 49. — P. 57—66.
191. Dahlmann G., Gaul H., Weichurt G. Investigations of temperature, salinity, oxygen, pH, alkalinity and organic pollutants in the Baltic Sea during BOSEX-77// ICES C. M. — 1979/C. — 2 p.
192. Danielsson L.-G., Westerlund S. Some results of trace metal analysis from BOSEX-77//Proc. of the 11th Conf. of Baltic Oceanographers. — 1978. — P. 279—289.
193. Dawson R., Riley J.-D. Chlorine — containing pesticides and polychlorinated biphenyls in British coastal waters//Estuarine Coast. Mar. Sci. — 1977. — N 4. — P. 55—69.
194. DDT and PCB in marine animals from Swedish waters/S. Jensen, A. G. Johnels, M. Olsson, G. Otterlind// Nature. — 1969. — N 224. — P. 247—250.
195. Determination of organochlorine compounds in waste water samples by gas chromatography and mass-spectrometry/A. Garcia-Gutierrez, A. E. McIntre, J. N. Lester, R. Perry//Environ. Techn. Letters. — 1983. — N 4. — P. 129—140.
196. Dickson R. R. A recurrent and persistent pressure — anomaly pattern as the principal cause of intermediate-scale hydrographic variations in European shelf seas// Deutsche Hydrogr. Ztschr. — 1971. — Bd. 24. — S. 97—119.
197. Dickson R. R. The prediction of major Baltic inflows// Deutsche Hydrogr. Ztschr. — 1973. — Bd. 26. — S. 97—105.
198. Distribution of various forms of nitrogen and their biological transformation in the Baltic Sea, Sept. 1977/ K. Gundersen, U. Rönner, V. Enoksson et al.//Proc. of the 11th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1978. — P. 1—9.
199. Dongerty R. C., Daton J., Biros F. J. Negative chemical ionization mass spectra of polycyclic chlorinated insecticides//Org. Mass. Spectrom. — 1972. — N 6. — P. 1171—1181.
200. Duinker J. Processes affecting the behavior of contaminants during estuarine mixing and in coastal areas, with particular reference to the southern North Sea// ICES Coop. Res. Rep. — 1983. — N 118. — P. 166—199.
201. Dybern B. I. Report of the ICES working group on pollution of the Baltic Sea//ICES Coop. Res. Rep. Ser. A. — 1970. — N 15.
202. Dybern B. I., Jensen S. DDT and PCB in fish and mussels in the Kattegat-Skagerrak area//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1978. — N 232. — P. 1—34.
203. Dynamics of Baltic ecosystems and causes of their variability/E. Gargas, K. I. Dahl-Madsen, H. Schroder, J. Rasmussen//Kieler Meeresforsch. — 1978. — H. 4. — S. 210—232.
204. Dyrssen D. W., Upprtröm L. R. The boron/chlorinity ratio in Baltic Sea water//Ambio. — 1974. — Vol. 3.— P. 44—46.
205. Elder I. F., Mattraw H. C. Accumulation of trace elements, pesticides and polychlorinated biphenyls in sediments and the clam Corbicula manilensis of the Apalachicola River, Florida//Bull. Environ. Contam. Toxicol. — 1984. — Vol. 31, N 4. — P. 453—469.
206. Elder P. L., Villeneuve P. P. Polychlorinated biphenyls in marine air, deep sediments and water of the Mediterranean Sea//Thalassia Jugosl. — 1977. — Vol. 13, N 1/2. — P. 59—62.
207. Elken J., Pavelson J., Laanemets J. Hydrophysically conditioned noise in the monitoring of the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 531—544.
208. Elmgren R. Trophic dynamics in the enclosed, brackish Baltic Sea//Rapp. Proc.-verb. Reun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1984. — Vol. 183. — P. 152—169.
209. Elmgren R. Man's impact on the ecosystem of the Baltic Sea: energy flows today and at the turn of the century//Ambio. — 1989. — Vol. 18. — P. 326—332.
210. Enoksson V., Sirensson F., Graneli W. Nitrogen transformations in the Kattegat//Ambio. — 1990. — Vol. 19. — P. 159—166.
211. Eräiden raskaiden metallien ja organokloriyhdisteiden pitoisundet Itämeren Kaloissa ja pohjaeläimissä/A. Voipio, K. Erkomaa, E. Karppanen et al.//Ympäristö ja Terveys. — 1977. — N 2. — S. 127—143.
212. Erhardt M. The particulate organic carbon and nitrogen and the dissolved organic carbon in the Gotland Deep in May 1968//Kieler Meeresforsch. — 1969. — Bd. 25, H. 1. — S. 71—80.
213. Erkomaa K. Öljypitoisunksien kartoitustutkimug Suomea ympäröivillä merialneilla vuosina 1971 ja 1972//Vesihallitus, Tiedotus 91. — Helsinki, 1975.
214. Estimating the load of metals to the Baltic Sea/ G. Lithner, H. Borg, U. Grimas et al.//Ambio Spec. Rep.— 1990. — N 7. — P. 7—9.
215. Etude des teneurs en metaux lourds et composes organochlores daus des organismes marine preleves faus la secteur de cortion (marsielle)/A. Arnoux, J. Tatossian, J. L. Monod, A. Blanc//J. Etud. Pollut. Mar. Mediterr., Cagliari. — 1981. — N 5. — P. 471—482.

216. Falandysz J. Trace metals and organochlorines in plankton from the Southern Baltic//Mar. Pollut. Bull. — 1984. — Vol. 15, N 11. — P. 416—418.
217. Falandysz J., Lorenc-Biala H. Trace metals in fish from the Southern Baltic//Meeresforsch. — 1983. — Bd. 30, H. 2. — S. 111—119.
218. Falkovska L. Deposition of airborn nitrogen and phosphorus compounds on the Baltic Sea//Proc. of 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1989. — P. 377—396.
219. Fat amount — a factor to consider in a determination of heavy metals in cod liver/U. Grimas, A. Göthberg, M. Nolter et al.//Ambio. — 1985. — Vol. 14. — P. 175—178.
220. Fedra K. Systems analysis and ecological modeling for assessment and central of marine eutrophication// UNESCO Rep. Mar. Sci. — 1988. — N 49. — P. 95—106.
221. Fonselius S. H. Hydrography of the Baltic deep basins//Fish Board Sweden. Ser. Hydrogr. — 1962. — N 13. — P. 1—41.
222. Fonselius S. H. The oxygen analysis during the informal intercalibration meeting, June, 1965, Copenhagen, Denmark//UNESCO Techn. Papers Mar. Sci. — 1966. — N 3. — P. 3—5.
223. Fonselius S. H. The intercalibration of the Winkler method for dissolved oxygen, Sept. 1966, Copenhagen, Denmark//UNESCO Techn. Papers Mar. Sci. — 1966. — N 9. — P. 53—62.
224. Fonselius S. H. Hydrography of the Baltic deep basins. II//Fish Board Sweden. Ser. Hydrogr. — 1967. — N 20. — P. 1—31.
225. Fonselius S. H. Hydrography of the Baltic deep basins. III//Fish Board Sweden. Ser. Hydrogr. — 1969, N 23. — P. 1—97.
226. Fonselius S. H. On the stagnation and recent turnover of water in the Baltic//Tellus. — 1970. — Vol. 22, N 5. — P. 533—544.
227. Fonselius S. H. On biogenic elements and organic matter in the Baltic//Ambio Special Rep. — 1972. — N 1. — P. 29—36.
228. Fonselius S. H. On eutrophication and pollution in the Baltic Sea//Marine pollution and sea life. — London, 1972. — P. 23—28.
229. Fonselius S. H. Determination of hydrogen sulphide// Methods of sea water analysis. — Weinheim; N. Y., 1976. — P. 71—78.
230. Fonselius S. H. On the nutrient variability in the Baltic//Ambio Spec. Rep. — 1976. — N 4. — P. 17—25.
231. Fonselius S. H. On nutrients and their role as production limiting factors in the Baltic//Acta Hydrochim. Hydrobiol. — 1978. — Vol. 6. — P. 329—339.
232. Fonselius S. H. Nutrient relations in Baltic surface water//Review and workshop on River Input to Ocean System (RIOS), FAO. — Rome, 1979. — P. 1—5.
233. Fonselius S. H. On long-time variations of phosphorus in Baltic surface water//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1980. — N 266. — P. 1—4.
234. Fonselius S. H. Oxygen and hydrogen sulphide conditions in the Baltic Sea//Mar. Pollut. Bull. — 1981. — Vol. 12, N 6. — P. 187—194.
235. Fonselius S. H. Oxygen and hydrogen sulphide in the deep water. Assessment of the effects of pollution of the natural resources of the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1981. — N 5B. — P. 129—146.
236. Fonselius S. H. Investigation of the stagnant conditions and the eutrophication of the Baltic Sea//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1984. — N 300. — P. 11—18.
237. Fonselius S. H. The nutrient measurements during BOSEX-77//ICES Coop. Res. Rep. — 1984. — N 127. — P. 49—59.
238. Fonselius S. H. Variation in the nutrient situation of the Baltic proper//Limnologia. — 1984. — N 15. — P. 277—287.
239. Fonselius S. H. Water renewal in a semi-stagnant sea studies by means of chemical parameters//Rap. Fiskideidar. — 1985. — Vol. 9. — P. 152—162.
240. Fonselius S. H. On long-term variations of dissolved oxygen in the deep water of the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 1—22.
241. Fonselius S. H. Long-term trends of dissolved oxygen, pH and alkalinity in the Baltic Deep Basins//Proc. of 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1989. — P. 433—442.
242. Fonselius S. H., Carlberg S. Dissolved oxygen concentrations and saturation//ICES Coop. Res. Rep. — 1972. — N 29. — P. 24—29.
243. Fonselius S. H., Rattansen Ch. On the water renewals in the eastern Gotland Basin after World War II//Medd. Havsfiskelab., Lysekil. — 1970. — N 90. — P. 1—6.
244. Franck H., Matthäus W. Are positive salinity anomalies in the Kattegat and negative mean sea levels in the Baltic Sea really necessary preconditions for major Baltic inflow?//Proc. of the 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1988. — P. 457—467.
245. Franck H., Matthäus W., Sammler R. Major inflows of saline water into the Baltic Sea during the present century//Gerlands Beitr. Geophysik. — 1987. — N 96. — S. 5—17.
246. Francke E. The Baltic monitoring programme — development and meaning//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 259—268.
247. Francke E., Matthäus W. International Baltic observation programmes and their advantages for baseline studies of the Baltic Sea//Rapp. Proc.-verb. Reun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1984. — N 185. — P. 30—38.
248. Francke E., Nehring D., Rohde K.-H. Zur Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser der Ostsee//Beitr. Meeresk. — 1977. — N 39. — P. 25—35.
249. Garrison S. Trace metals in contaminated waters//Environ. Sci. Technol. — 1981. — Vol. 15, N 4. — P. 396—403.
250. Gaul H. The distribution of several organochlorine compounds in the Baltic Sea//Deutsche Hydrogr. Ztschr. — 1984. — Bd. 37. — S. 129—145.
251. GEA Adehoc Group of experts on assessment of the state of the Marine Environment of the Baltic Sea. Harmful substanses. Trace metals. — 1985. — Ch. 3.
252. Gerlach S. A. Eutrophication of Kieler Bucht//Kieler Meeresforsch. S.-H. 6. — 1988. — P. 54—63.
253. Gerlach S. A. Nitrogen, phosphorus, plankton and oxygen deficiency in the German Bight and in Kiel Bay//Kieler Meeresforsch. S.-H. 7. — 1990. — 341 p.
254. Gessner F. Phosphat, Nitrat und Planktongehalt im Arconabecken. Ein Beitrag zur Produktionbiologie der Ostsee// Conseil Perm. Intern. P. l'explor. Mer. — 1933.
255. Gessner F. Productionbiologische Untersuchungen in Arconabecken und den Binnengewässern von Rugen//Kieler Meeresforsch. — 1940. — Bd. 3, H. 2.
256. Gieskes J., Grasshoff K. A study of the variability in the hydrochemical factors in the Baltic Sea on the basis of two anchor stations, Sept. 1967 and May 1968//Kieler Meeresforsch. — 1969. — Bd. 25, H. 1. — S. 105—133.
257. Glowinska A. Report on the phosphate investigations in the Southern Baltic for 1947—1960//Conseil Intern. P. l'explor. Mer. — 1960. — N 72.
258. Grasshoff K. Chemische Verhältnisse und ihre Veränderlichkeit// Meereskunde der Ostsee. — Berlin, 1974. — S. 85—101.
259. Grasshoff K. The Baltic Sea as an example for the interaction of natural and manmade stress factors//Thalassia Jugosl. — 1975. — Vol. 11, N 1/2. — P. 1—17.
260. Grasshoff K. The Hydrochemistry of landlocked basins and fjords//Chem. Oceanogr. — 1975. — N 2. — P. 455—597.
261. Grasshoff K. Determination of oxygen//Methods of sea water analysis. — Weinheim; N. Y., 1976. — P. 59—70.
262. Grasshoff K. Determination of the pH//Methods of sea water analysis. — Weinheim; N. Y., 1976. — P. 83—95.
263. Grasshoff K. Methods of sea water analysis. — Weinheim; N. Y.: Verlag Chemie, 1976. — 317 p.
264. Grasshoff K., Voipio A. Chemical oceanography// The Baltic Sea. — Amsterdam; Oxford; N. Y., 1981. — P. 183—218.
265. Gripenberg S. The calcium content of Baltic water// Conseil Intern. P. l'explor. Mer. — 1937. — Vol. 12, N 3. — P. 293—304.
266. Gripenberg S. On the alkalinity of Baltic waters// Conseil Intern. P. l'explor. Mer. — 1960. — Vol. 26, N 1. — P. 5—20.
267. Grönlund L., Leppänen J.-M. Long-term changes in the nutrient reserves and pelagic production in the Western Gulf of Finland//Fin. Mar. Res. — 1990. — N 257. — P. 15—28.
268. Guidelines for the Baltic monitoring programme for the First Stage//Baltic Sea Environ. Proc. — 1980.
269. Gundersen K. Nitrogen. Assessment of the effects of pollution of the natural resources of the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1981. — N 5B. — P. 169—191.
270. Gundersen K. The distribution and biological transformations of nitrogen in the Baltic Sea//Mar. Pollut. Bull. — 1981. — Vol. 12, N 6. — P. 199—205.

271. Gustavsson I. The concentrations of cadmium, lead and copper in filtrated Baltic Sea water. Samples collected at two seasons in 1979//Acta Hydrochim. Hydrobiol.— 1983. — Bd. 11, H. 3. — S. 303—317.
272. Hallberg R. O. Paleoredox conditions in the eastern Gotland Basin during the recent centuries//Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1974. — N 238. — P. 3—16.
273. Hamilton D. I., Simson B. W. Thin-layer chromatography of pesticides and related compounds on Florisil//J. Chromatogr. — 1969. — N 39. — P. 186—193.
274. Hansen H. P. The significance of discrete Baltic nutrient sampling discussed on the basis of continious measurements//Deutsche Hydrogr. Ztschr. — 1987. — Bd. 37, H. 6. — S. 221—265.
275. Hansen H. P. Phosphate anomaly at the oxic-anoxic interface in the Gotland Basin revealed by high-resolution profiles//Proc. 17th Conf. of the Baltic Oceanographers.— 1990.
276. Hansson S., Rudstam L. G. Eutrophication and Baltic fish communities//Ambio. — 1990. — Vol. 19. — P. 123—125.
277. Hardly R., Mackie P. R., Whittle K. J. Hydrocarbons and petroleum in the marine ecosystem//Rapp. Proc.-verb. Reun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1977. — Vol. 171, N 26. — P. 17—26.
278. Harvey G. R., Teal J. M. PCB and hydrocarbon contamination of plankton//Bull. Environ. Contam. Toxicol. — 1973. — Vol. 9, N 5.
279. Hasle J., Abdulish H. Analytical fractionation of dissolved copper, lead and cadmium in coastal sea water//Mar. Chem. — 1981. — Vol. 10. — P. 487—503.
280. Heavy metals, aliphatic hydrocarbons and organochlorinated pesticides in mussels from a pillar of the drilling platform «Amporsta» (The Ebro river delta)/A. Ballester, J. Sanches-Pardo, J. A. Garcia-Regueiro et al.//Thalassia Jugosl. — 1982. — Vol. 18, N 1—4. — P. 393—409.
281. Heinlaid H. U., Talvari A. F., Jankovski H. J. Chlororganic compounds in open Baltic waters//Proc. of symp. on ecological investigations of the Baltic Sea environment, Riga, 1983. — Helsinki, 1985. — P. 546—554.
282. Hollan E. Eine physikalische Analyse Kleinraumiger Änderungen Chemischer Parameter in der tiefer wasserschichten der Hotlandsee//Kieler Meeresforsch. — 1969. — Bd. 25, H. 2. — S. 255—267.
283. Holm N. G. The pool of mobile phosphorus in Baltic Sea sediments//Microbiol. Geochem. — 1978. — N 3. — P. 29—77.
284. Human exposure to polychlorinated biphenyls and polybrominated biphenyls/F. Cordle, P. Cornelinssen, C. Jelinek et al.//Environ. Heait Persp. — 1978. — N 24. — P. 157—172.
285. Hydrographical data. National Board of Fisheries. — Sweden, Inst. of Mar. Res. — 1973—1984, N 1—4, 7—9, 11—13, 15—16, 18—19, 22—23, 25—28, 30, 32, 34—37.
286. Hydrographical data. The Baltic cruises with r/v «Aranda», 1954—1961//Merentutkimuslait. Julk. Havsforskningsinst. Skr. — 1955, 1957—1959, 1961, 1963, 1964. — N 166, 177, 183, 186, 193, 197, 204, 214.
287. Hydrography First Periodic Assessment of the State of the Marine environment of the Baltic Sea area, 1980—1985/J. Launiainen, W. Matthäus, S. Fonselius, E. Francke//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 17B.— P. 7—34.
288. Hydrography. Second Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea, 1984—1988/V. Astok, W. Matthäus, V. Berzins et al.//Baltic Sea Environ. Proc. — 1990. — N 35B. — P. 21—68.
289. ICES. Report of the ICES Working group on the study of pollution in the Baltic//ICES Coop. Res. Rep. — 1977.— N 63. — P. 1—54.
290. ICES. Oceanographical Data Lists and inventories. Rep. on oceanographic cruises and data stations in 1959—1962.
291. ICES. Oceanographical Data Lists and inventories. Rep. on oceanographic cruises and data stations in 1969—1970 (International Baltic Year). — N 20—23.
292. ICES. Oceanographical Data Lists and inventories. Rep. on oceanographic cruises and data stations in 1977—1982.
293. ICES. PCB in the marine environment — An overview// ICES Coop. Res. Rep. — 1982. — N 112. — P. 44—50.
294. ICP as a tool for monitoring major and minor elements in the Southern Baltic/A. M. Brzezinska-Paudyn, J. C. Van Loon, M. R. Balicki, A. Trzosinska//Proc. of the 14th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1984.
295. Interaction between supply of nutrients, primary production, sedimentation and oxygen consumption in SE Kattegat/L. Rydberg, L. Edler, S. Floderus et al.//Ambio.— 1990. — Vol. 19. — P. 134—141.
296. Jahres bericht. 1983. — Hamburg: Deutsches Hydrographisches Institut. — 1984.
297. Jankovski H., Kaivo T., Põder T. Heavy metals in the Baltic: Study of the formation of the concentration of heavy metals in water//Proc. of the 13th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1982. — Vol. 1. — P. 392—405.
298. Jansson B. O. Ecosystem approach to the Baltic problem//Bull. Ecol. Res. Comm. NER. — 1972. — N 16. — P. 1—82.
299. Jansson B. O. Modelling of Baltic ecosystems//Ambio Special Rep. — 1976. — Vol. 5, N 4. — P. 157—169.
300. Jensen A. Preliminary report of the estimation of the accumulation rate of heavy metals in sediments from four Danish marine areas//ICES C. M. — 1980/E. — 63 p.
301. Jensen S. Report of a new chemical hazard//New Sci. — 1970. — Vol. 30, N 525. — P. 612.
302. Jensen S., Olsson M. DDT and PCB in the Baltic Sea//Swedish-Soviet Symp. on the Baltic Sea pollution, Riga. — 1973.
303. Jensen S., Reinberg L., Olsson M. PCB contamination from boat bottom paint and levels of PCB in plankton outside a polluted area//Nature. — 1972. — Vol. 240. — P. 358—360.
304. Jonannlan J., Etcheber H., Latouche C. Impoverishment and decrease of metallic elements associated with suspended matter in the Gironde estuary//Trace metals in sea water, NATO Conf. Ser. — 1983. — Vol. 9. — P. 245—263.
305. Jonsson P., Carman R., Wulff F. Laminated sediments in the Baltic — a tool for evaluating nutrient mass balances//Ambio. — 1990. — Vol. 19. — P. 152—158.
306. Joseffson B. Recent concepts in sampling methodology. Anal. org. micropollutants water//Proc. 2nd Europ. Symp. Killarney, Nov. 17—19, 1981. — 1982. — P. 7—15.
307. Kahma K. K., Voipio A. Elimination of seasonal variation from long-term changes of some nutrients in the Baltic Sea//Fin. Mar. Res. — 1990. — N 257. — P. 3—14.
308. Kaiser W., Schulz S. On the causes for the differences in space and time of the commencement of the phytoplankton bloom in the Baltic//Kieler Meeresforsch.— S.-H. 4. — 1978. — S. 161—170.
309. Kaleis M. V. Present hydrographical conditions in the Baltic//Ambio Special Rep. — 1976. — N 4. — P. 37—44.
310. Kalle K. Phosphatengehaltuntersuchungen in der Nord- und Ostsee im Jahre 1931//Ann. Hydrogr. Mar. Meteorol. — 1932. — Bd. 60, H. 1.
311. Kalle K. Die grosse Wasserumschichtung im Gotlandtief vom Jahre 1933/1934//Ann. Hydrogr. Mar. Meteorol.— 1943. — Bd. 71, H. 4—6.
312. Kautsky L. Phytoplankton dynamics and succession in a brackish eutrophicated bay following sewage diversion//Contrib. Askö Lab. Univ. Stockholm. — 1988. — N 33. — 65 p.
313. Kawahara T. K., Lichtenberg J. J., Eichelberger J. Thinlayer and gas chromatographic analysis of parathion and methyl parathion in presence of chlorinated hydrocarbons//J. Water Pollut. Contr. Fed. — 1967.— N 39. — P. 446—451.
314. Kirkwood D., Aminot A., Perttilä M. ICES (fourth) intercomparison exercise for nutrients in sea water//International Council for the Exploration of the sea. Marine Chemistry Working Group. — 1990.
315. Knudsen M. Berechnung der Hydrographischen Tabellen//Wissenschaft. Meeresunters. — 1902. — Bd. 6.
316. Korn S., Russel E. Acute toxicity of twenty insecticides to striped bass, Morone saxilities//Calif. Fish Jam.— 1974. — Vol. 60, N 3. — P. 128—131.
317. Körner D. Oxygen deficiency in the Western Baltic// Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 415—423.
318. Koroleff F. A note on the iron content of Baltic waters//ICES C. M. — 1968. — N C34. — 4 p.
319. Koroleff F. Determination of total nitrogen in natural waters by means of persulfate oxidation//ICES C. M.— 1969/C. — 8 p.
320. Koroleff F. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol//ICES C. M. — 1969/C. — 9 p.
321. Koroleff F. Determination of dissolved inorganic and total phosphorus//ICES Coop. Res. Rep. — 1972. — N A29 — P. 44—49.

322. Koroleff F. On the determination of area in sea water and some preliminary data from the Baltic//Proc. of the 9th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1974.
323. Koroleff F. Determination of silicon//Methods of sea water analysis. — Weinheim; N. Y., 1976. — P. 149—158.
324. Koroleff F. Determination of urea//Methods of sea water analysis. — Weinheim; N. Y., 1976. — P. 145—149.
325. Kremling K. Untersuchungen über die chemische Zusammensetzung des Meereswassers der Ostsee. I. Frühjahr, 1966//Kieler Meeresforsch. — 1967. — Bd. 25, H. 1.— S. 81—104.
326. Kremling K. Untersuhungen über die chemische Zusammensetzung des Meereswassers der Ostsee. II. Frühjahr, 1967 — Frühjahr, 1968//Kieler Meeresforsch. — 1970. — Bd. 26, H 1. — S. 1—20.
327. Kremling K. Untersuchungen über die chemische Zusammensetzung des Meereswassers der Ostsee. III. Frühjahr, 1969 — Herbst, 1970//Kieler Meeresforsch. — 1972. — Bd. 28, H 2. — S. 99—118.
328. Kremling K. The behavior of trace metals in anoxic Gotland Sea waters//Proc. of the 13th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1982. — Vol. 2. — P. 487—506.
329. Kremling K. Trace metals in the Baltic//The Background Document for the First Periodic Assessment. Chap. 3. Harmful Substances. — 1985. — GEA 5/2 c. — P. 1—20.
330. Kremling K., Petersen H. Synoptic survey on dissolved trace metal levels in Baltic surface waters//Mar. Pollut. Bull. — 1984. — Vol. 15, N 9. — P. 329—334.
331. Kullenberg G. On the oxygen deficit in the Baltic deep water//Tellus. — 1970. — Vol. 22, N 13. — P. 357.
332. Kullenberg G. Observations of the mixing in the Baltic thermo- and halocline layers//Tellus. — 1977. — Vol. 29, N 6. — P. 572—587.
333. Kwiecinski B. The relation between the chlorinity and the conductivity in Baltic water//Deep-Sea Res. — 1965. — Vol. 12, N 2. — P. 797—804.
334. Larsson U., Elmgren R., Wulff F. Eutrophication in the Baltic Sea, causes and consequences//Ambio.— 1985. — Vol. 14, N 1. — P. 9—14.
335. Law R., Andrulewicz E. Hydrocarbons in water, sediment and mussels from the Southern Baltic Sea//Mar. Pollut. Bull. — 1983. — Vol. 14, N 8. — P. 289—293.
336. Linko R. R., Rantamäki P., Urpo K. PCB residues in plankton and sediments in the south-western coast of Finland//Bull. Environ. Contam. Toxicol. — 1974. — Vol. 12, N 6. — P. 733—738.
337. Long-term data on concentration of chlororganic compounds and petroleum hydrocarbons in the Baltic Sea water/H. Heinlaid, K. Laanemets, A. Talvari, H. Jankovski//Proc. of the 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1988. — P. 491—497.
338. Luskas B., Wetzel H., Rechlin O. Ergebnisse der Trend-Untersuchungen von Ostseefischen in Bezung auf ihren Gehalt an DDT und seinen Metaboliten//Acta Hydrochim. Hydrobiol. — 1980. — Bd. 8. — S. 167—173.
339. Magnusson B., Westerlund J. The determination of Cd, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn in Baltic Sea water// Mar. Chem. — 1980. — Vol. 8. — P. 231—244.
340. Mälkki P., Tamsaly R. Physical features of the Baltic Sea//Fin. Mar. Res. — 1985. — N 252. — 110 p.
341. Manheim F. T. A geochemical profile in the Baltic Sea//Geochim. Cosmochim. Acta. — 1961. — Vol. 25. — P. 52—70.
342. Marine eutrophication case studies in Sweden/R. Rosenberg, R. Elmgren, S. Fleisker e. a.//Ambio. — 1990. — Vol. 19, N 3. — P. 102—108.
343. Mats W., Karin Ek. Residual nitrogen in Aland Sea//Ambio Special Rep. — 1976. — N 4. — P. 65—73.
344. Matthäus W. Zur Hydrographie der Gotlandsee III. Die Variation der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser des Gotlandtiefs auf 57° 20′ N, 20° E (F 81 bzw. BY 15A)//Beitr. Meeresk. — 1973. — N 32. — S. 115—136.
345. Matthäus W. Zur Hydrographie der Gotlandsee IV. Zum mittleren Jaheresgang des Sauerstoffgehalts im Oberflächenbereich des Gotlandtiefs//Beitr. Meeresk. — 1974. — N 33. — S. 141—151.
346. Matthäus W. Mittlere Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse in der Arkonasee am Beispiel der Station BY 2A auf 55° N, 14° E//Beitr. Meeresk. — 1975. — N 36. — S. 5—27.
347. Matthäus W. Zur mittleren jahreszeitlichen Veränderlichkeit der Temperatur in der offenen Ostsee//Beitr. Meeresk. — 1977. — N 40. — S. 117—155.
348. Matthäus W. Phytoplankton spring bloom and maximum oxygen content in the Baltic proper//Kieler Meeresforsch. — 1978. — S.-H. 4. — S. 147—152.
349. Matthäus W. Zur mittleren jahreszeitlichten Veränderlichkeit im Sauerstoffgehalt der offenen Ostsee//Beitr. Meeresk. — 1978. — N 41. — S. 61—94.
350. Matthäus W. Langzeitvariationen von Temperatur, Salzgehalt und Sauerstoffgehalt im Tiefenwasser der zentralen Ostsee//Beitr. Meeresk. — 1979. — N 42. — S. 41—93.
351. Matthäus W. Recent trend variations of oceanological parameters in the Baltic Sea//Proc. of 13th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1982. — Vol. 2. — P. 535—547.
352. Matthäus W. Actuelle Trends in der Entwicklung des Temperatur — Salzgehalts und Sauerstoffregimes in Tiefenwasser der Ostsee//Beitr. Meeresk. — 1983. — N 49. — S. 47—64.
353. Matthäus W. Climatic and seasonal variability of oceanological parameters in the Baltic Sea//Beitr. Meeresk. — 1984. — N 51. — S. 29—45.
354. Matthäus W. Analysis of long-term trends in the Baltic proper during the seventies//Beitr. Meeresk. — 1985. — N 52. — S. 49—56.
355. Matthäus W. The significance of the long-term monitoring of the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 33—51.
356. Matthäus W. The history of the Conference of Baltic Oceanographers//Beitr. Meeresk. — 1987. — N 57. — S. 11—25.
357. Matthäus W., Kremser U. Die Bereshnung mittlerer vertikaler Austauschkoeffisienten in der Ostsee auf der Gumdlage von Sauerstoffkonzendrationswerten//Beitr. Meeresk. — 1976. — N 37. — S. 111—136.
358. McIntyre A. E., Lester J. N. Organic contaminants in the aquatic environment. IV Analytical techniques//Sci. Total Environ. — 1983. — N 27. — P. 201—230.
359. Meddelande Havsfiskelab., Lysekil (1964—1972). — N 38, 52, 63, 70, 80, 83—85, 93, 104, 112, 116, 132, 160, 168.
360. Melvasalo T., Posemarin A. Status of the Baltic Sea — a sea in transition//Ambio Special Rep. — 1990. — N 7. — P. 1—2.
361. Meyer P. T., Kalle K. Die biologische Umstimmung der Ostsee in den letzten Jahrzehuten — eine Folge thydrographischen Wasserumschichtungen//Archiv für Fischerei wissenschaft. — 1950. — Bd. 2, N 1/2.
362. Method of studying geochemistry of sediment-water interference/R. O. Hallberg, L. E. Beganer, A. G. Engwall, F. A. Shippel//Ambio. — 1972. — Vol. 1, N 2. — P. 71—72.
363. Miettinen V., Hattula M. L. Chlorinated hydrocarbons and mercury in zooplankton near the coast of Finland//Merentutkimuslait. Julk. — 1979. — N 30. — P. 46—50.
364. Millero F. I. The conductivity — density — salinity — chlorinity relationships for estuarine waters//Limnol. Oceanogr. — 1984. — Vol. 29, N 6. — P. 1317—1321.
365. Möller H., Schneider R., Schnier C. Trace metal and PCB content of mussels (Mytilus edulis) from the South-Western Baltic Sea//Int. Rev. Gesamp. Hydrobiol.— 1983. — Vol. 68, N 5. — P 633—647.
366. Monitor — 1988. Sweden's marine environment — ecosystems under pressure. — Stockholm: Swed. Environ. Protect. Agency, 1988. — 207 p.
367. Morphy J., Riley J. P. Modified single solution method for determination of phosphate in natural waters// Anal. Chem. Acta. — 1962. — Vol. 27, N 1. — P. 31—36.
368. Mortimer C. H. The exhcange of dissolved substances between mud and water in lakes//J. Ecol. — 1942. — Vol. 30. — P. 147—201.
369. Morris R. W., Riley J. P. The determination of nitrate in sea water//Anal. Chem. Acta. — 1963. — Vol. 29. — P. 272—279.
370. Nehring D. Untersuchungen im Hinblick und die Zunehmend wasserverschlechtenung in der Ostsee//Beitr. Meeresk. — 1971. — N 28. — S. 57—74.
371. Nehring D. Untersuchungen zum Problem der Denitrifikation und Stickstoff Entbindung im Tiefenwasser der Estsee//Beitr. Meeresk. — 1974. — N 33. — S. 135—139.
372. Nehring D. Salinity and increasing nutrient concentrations in the mixed winter surface layer of the Baltic from 1969 to 1978//Ann. Appl. Biol. — 1980. — Vol. 35. — P. 104—106.

373. Nehring D. Hydrographisch-chemische Untersuchungen in der Ostsee von 1969—1978. II. Die chemischen Bedingugen und ihre Veranderungen unter besonderer Berücksichtigung der Nährstoff regimes//Geod. Geophys. Veröff. — 1981. — R. IV, H 35. — S. 45—56.
374. Nehring D. Nutrients. Phosphorus. Assessment of the effects of the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1981. — N 5B. — P. 151—169.
375. Nehring D. Phosphorus in the Baltic Sea//Mar. Pollut. Bull. — 1981. — Vol. 12, N 6. — P. 194—198.
376. Nehring D. Langezeittrends der Phosphat- und Nitratgehalts in der Ostsee//Beitr. Meeresk. — 1982. — N 47. — S. 61—64.
377. Nehring D. Nährstoffbalansen der Ostsee//Beitr. Meeresk. — 1982. — N 47. — S. 82—97.
378. Nehring D. On the denitrification in the stagnant Baltic deep water//Proc. of the 13th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1982. — Vol. 1. — P. 567—573.
379. Nehring D. Chemical investigations into nitrate reduction in Baltic deep waters//Beitr. Meeresk. — 1984. — N 51. — S. 51—56.
380. Nehring D. The further development of the nutrient situation in the Baltic proper//Ophelia. — 1984. — Suppl. 3.— P. 167—179
381. Nehring D. Nutrient trends in the Baltic Sea area// Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 23—32.
382. Nehring D. Nutrients/First Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea area, 1980—1985//Baltic Sea Environ. Proc. — 1987. — N 17. — P. 35—57.
383. Nehring D. Phosphate and nitrate trends, the ratio oxygen consumption to phosphate accumulation in the central Baltic deep waters in the alternating oxic and anoxic conditions//Beitr. Meeresk. — 1989. — N 59. — S. 47—58.
384. Nehring D., Brügmann L. Die Verteilung organischer Phosphor und Stickstoffverbindungen in der Ostsee// Acta Hydrochim. Hydrobiol. — 1977. — Bd. 5. — S. 533—539.
385. Nehring D., Brügmann L. Organisch gebundener Phosphor und Stickstoff im nordwestafrikanischen wasserauftriebsgebiet//Beitr. Meeresk. — 1977. — N 40. — S. 51—67.
386. Nehring D., Francke E. Hydrographisch — chemische Veränderungen in der Ostsee seit Beginn dieses Jahrhunderts und während des Internationalen Ostseejahres 1969/70//Fischerei — Forschung. — 1971. — Bd. 9, H. 1. — S. 35—42.
387. Nehring D., Matthäus W. Current trends in hydrographic and chemical parameters and eutrophication in the Baltic Sea//Int. Rev. Ges. Hydrobiol. — 1991. — Vol. 76, N 3. — P. 297—316.
388. Nehring D., Wilde A. Untersuchungen über den atmosphärishen Nährstoffeintrag in die Ostsee//Acta Hydrochim. Hydrobiol. — 1982. — Bd. 10, H. 1. — S. 89—100.
389. Nehring D., Schulz S., Kaiser W. Long-term phosphate and nitrate trends in the Baltic proper and some biological consequences: A contribution to the discussion concerning the eutrophication of these waters//Rapp. Proc.-Verb. Reun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1984. — Vol. 183. — P. 193—203.
390. Nehring D., Schulz S., Rechlin O. Eutrophication and fishery resources in the Baltic//Rapp. Proc.-Verb. Reun. Cons. Intern. Explor. Mer. — 1989. — Vol. 190. — P. 198—205.
391. Niemi A. Ecology of phytoplankton in the Tvärminne area (SW coast of Finaland). II. Primary production and environmental conditions in the archipelago and the sea zone//Acta Bot. Fennica. — 1975. — N 105. — P. 1—73.
392. Niemi A., Tulkki P. Views on changes in the Baltic Sea ecosystem during recent decades//Proc. of Symp. on ecological investigation of the Baltic Sea environment, Riga, 1983. — Helsinki, 1985. — P. 83—96.
393. Niemitö L. Redox processes in sediments. Assessment of the effects of the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc.— 1981. — N 5B. — P. 146—150.
394. Niemistö L., Tervo V. Preliminary results of some harmful substances in sediments of the BOSEX area// Proc. of the 11th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1978. — Vol. 2. — P. 668—673.
395. Niemistö L., Voipio A. Studies on the recent sediments in the Gotland Deep//Merentutkimuslait. Julk./Havsforskningsinst. Skr. — 1974. — N 238. — P. 17—32.
396. Niemistö L., Winterhalter B. Bottom photography used to study oxygen conditions in the Northern Baltic Sea//Merentutkimuslait. Julk. — 1977. — N 241. — P. 91—95.
397. Nikolaev A. V., Savchuk O. P. Inorganic nitrogen forms and the secondary nitrite maximum in the denitrification zone of the Baltic proper deep water//Proc. 17th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1990.
398. Nitrogen fixation by blue-green algae in the Baltic Sea/I. Rinne, T. Melvassalo, A. Niemi, L. Niemistö//Kieler Meeresforsch. — 1978. — H. 4. — S. 178—187.
399. Nutrients/D. Nehring, G. Aertebjerg, P. Alenius e. a.// Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 17B. — P. 35—81.
400. Nutrients. Second Periodic Assessment of the State of the marine environment of the Baltic Sea, 1984—1988/ D. Nehring, M. P. Hansen, L. A. Jorgenssen et al.//Baltic Sea Environ. Proc. — 1990. — N 35B. — P. 109—152.
401. Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea area/E. Graneli, K. Wallström, U. Larsson et al.//Ambio. — 1990. — Vol. 19. — N 3. — P. 142—151.
402. Oden S., Ekstedt I. PCB and DDT in Baltic sediments//Ambio Special Rep. — 1976. — N 4. — P. 125—129.
403. Olsson M., Jensen S. Pike as the test organism for mercury, DDT and PCB pollution//Rept. Inst. Freshwater Res. Drottnikgholm. — 1975. — N 54. — P. 83—106.
404. Olsson M., Jensen S., Reinberg L. PCB in coastal areas of the Baltic//PCB 2nd Conf. Stockholm, 1972. — Stockholm, 1973. — P. 59—69.
405. On the preparation of CSK standards for marine nutrient analysis. — UNESCO, 1969. — 187 p.
406. On the importance of the nitrogen fixation in the Baltic ecosystem/T. Melvassalo, A. Niemi, L. Niemistö, L. Rinne//Proc. of Symp. on ecological investigation of the Baltic Sea environment, Riga, 1983. — Helsinki, 1985. — P. 176—189.
407. Osterroht V. Dissolved PCB and chlorinated hydrocarbon insecticides in the Baltic determined by two different sampling procedures//Mar. Chem. — 1977. — Vol. 5.— P. 113—121.
408. Otzen F. Future activities of the Helsinki Commission//Ambio Special Rep. — 1990. — N 7. — P. 17.
409. Overall report on the Baltic open sea experiment 1977 (BOSEX)//ICES Coop. Res. Rep. — 1984. — N 127.— P. 1—82.
410. Oxygen Conditions/A. Trzosinska, M. Perttilä, G. Aertebjerg et al.//Ambio Special Rep. — 1990. — N 7. — P. 3—4.
411. Oxygen, hydrogen sulfide, alkalinity and pH. Second Periodic Assessment of the State of the Marine Environment of the Baltic Sea, 1984—1988/A. Trzosinska, M. Perttilä, V. Berzins et al.//Baltic Sea Environ. Proc. — 1990. — N 35B. — P. 69—108.
412. Ozmidov R. V., Shirshov P. P. Spectral structure of the fields of autropogenic contamination concentrations and techniques of their monitoring in the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 269—278.
413. Passivirta J., Pitkänen M. Structure analysis of the main components in PCB mixture//Finn. Chem. Lett. — 1975. — N 3—4. — P. 89—93.
414. Pedersen A. Studies on phenol content and heavy metal uptake in fucoids//Hydrobiol. — 1984. — P. 116—117, 498—504.
415. Perttilä M., Koljonen J., Tulkki P. Mean values and trends of hydrographical and chemical parameters in the Baltic proper in 1962—1978//Proc. of the 12th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1980.
416. Perttilä M., Tervo V., Parnanne R. Heavy metals in Baltic herring and cod//Mar. Pollut. Bull. — 1982. — Vol. 13, N 11. — P. 391—393.
417. Polychlorinated biphenyls in plankton from the Turku Archipelago/R. Linko, P. Rantamäki, K. Rainio, K. Urpo//Bull. Environ. Contam. Toxicol. — 1979. — Vol. 23, N 1—2. — P. 145—152.
418. Poutanen E. L., Räisänen S., Lindberg J. J. Determination of some aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons in marine sediments of the Baltic Sea// Chemosphere. — 1982. — N 10(4). — P. 347—354.
419. Proceedings of the 13th Conference of the Baltic Oceanographers, Helsinki, Aug. 1982. — Helsinki, 1982. — 844 p.
420. Proceedings of the 14th Conference of the Baltic Oceanographers, Gdynia, 1984. — Gdynia, 1984. — 849 p.
421. Proceedings of the 15th Conference of the Baltic Oceanographers, Copenhagen, 1986.— Copenhagen, 1987.— 689 p.

422. Proceedings of the 16th Conference of the Baltic Oceanographers, Kiel, Sept. 1988. — Kiel, 1989. — 1200 p.
423. Proceedings of 17th Conference of the Baltic Oceanographers. — Norrköping, 1990.
424. Processing and analysis of oceanological data by methods of the small sample theory/L. I. Lopatukhin, S. M. Mikulinskaya, V. A. Rozhkov, I. S. Shpaer//Proc. of 14th Conf. of the Baltic Oceanographers. — Gdynia, 1985. — P. 253—268.
425. Protasowicki M. Zmiany zawartosci wybranych metali ciekich w rybach Baltyku i streby njscia Odry// Zesz. Nank. AR Szcz. — 1982. — N 93. — P. 213—221.
426. Rahm L. A note on some hydrographic properties of the Eastern Gotland Basin//Beitr. Meeresk. — 1988. — N 58. — S. 47—58.
427. Ray S., McLeese D. W. Bioavailability of chlorinated hydrocarbons and heavy metals in sediments to marine invertebrates//ICES C. M. — 1980. — N e20. — P. 1—13.
428. Redfield A. C. The exchange of oxygen across the sea surface//J. Mar. Res. — 1948. — N 7. — P. 347—361.
429. Residues of chlorinated hydrocarbons in marine organism in relation to size and ecological parameters. PCB, DDT, DDE and DDD in fishes and molluscs from the English Channel/W. Ernst, H. Goerke, G. Eder, R. G. Schaefter//Bull. Environ. Contam. Toxicol. — 1976. — Vol. 15.— P. 55—65.
430. Results of 1985 Baseline study of contaminants in fish and shellfish//ICES Coop. Res. Rep. — 1988. — N 151.
431. Rhead M. M. The fate of DDT and PCB in the marine environment//Environ. Chem. — 1975. — Vol. 1. — P. 137—159.
432. Richards F. A. Anoxic basins and fjords//Chem. Oceanogr. — 1965. — N 1. — P. 611—645.
433. Richards F. A., Kletsch K. A. The spectrophotometric determination of ammonia and labile amino compounds in fresh and sea water by oxidation to nitrite// Sugawara Festival Vol. — Tokyo, 1964. — P. 65—81.
434. Rinne I., Niemistö, Niemi A. Blue-green algal blooms in the Baltic Sea — a sign of eutrophication//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 144—153.
435. Rohde K.-H. Bestimmung des Ölgehalts im Ostseewasser mit der Infrarotspektroskope//Seewirtschaft. — 1976. — Bd. 8, H. 2. — S. 115—116.
436. Rohde K.-H., Brügmann L. Petroleum hydrocarbons in the Baltic Sea, 1980—1982//Proc. of the 13th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1982. — P. 593—603.
437. Rönner U. Distribution, production and consumption of nitrous oxide in the Baltic Sea//Geochim Cosmochim. Acta. — 1983. — Vol. 47, N 12. — P. 2179—2188.
438. Rönner U. Nitrogen transformations in the Baltic proper/ denitrification counteracts eutrophication//Ambio. — 1986. — Vol. 15. — P. 134—138.
439. Roots O., Peikre E. The study of the Baltic Sea zooplankton pollution with chlorinated pesticides and polychlorinated biphenyls during the 10th cruise of the r/v «Ayu-Dag»//The investigation and modelling of processes in the Baltic Sea. Pt. 2. — Tallinn, 1981. — P. 131—137.
440. Rosenberg R., Larsson U., Edler L. Eutrophication in marine waters surrounding Sweden//Swed. Environ. Protect. — 1986. — Bd. 3054. — 137 p.
441. Rudling L. Oil pollution in the Baltic Sea//Stations Naturvärdsverk. — 1976. — 80 p.
442. Sanden P., Rahm L., Wulff F. Non-parametric trend test of Baltic Sea data//Environment. — 1991. — Vol. 2, N 3. — P. 263—278.
443. Savchuk O. P. The study of the Baltic eutrophication problems with the aid of simulation models//Baltic Sea Environ. Proc. — 1987. — N 19. — P. 52—61.
444. Savchuk O. P., Volkova V. V. Forecasting the future state of the Baltic Sea eutrophication//Proc. 17th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1990.
445. Savchuk O. P., Kolodochka A. A., Gutsabbath E. Sh. Simulation of the matter cycle in the Baltic Sea ecosystem//Proc. 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1989. — P. 921—931.
446. Schaule B., Patterson C. Pertrubations of the natural lead depth profile in the Sargasso Sea by industrial lead//Trace metals in sea water, NATO Conf. Ser. — 1983. — Vol. 9 — P. 487—503.
447. Schulz B. Hydrographische Beobachtungen insbesondere über die Kohlensäure, in der Nord und Ostsee im Sommer 1921//Aus dem Archiv der Deutsch Seewarte. — 1922. — Bd. 11, H. 2. — S. 1—43.
448. Schulz B. Hydrographische Untersuchungen besonders über den Durchlüftungszustand in der Ostsee im Jahre 1922//Aus dem Archiv der Deutschen Seewarte. — 1923.— Bd. 41, H. 1.
449. Schulz B. Einführung in die Hydrographie der Nord und Ostsee//Tierwelt der Nord und Ostsee. — 1932. — Bd. 71.
450. Schulz S. Der lebensraum Ostsee. Ökologische Probleme in einem geschichteten Brackwassermeer//Biol. Rdch. — 1970. — Bd. 8, H. 4.
451. Schulz S. Results of ecological time-series investigations in spring and summer in the Arkona Sea//Proc. of Symp. on ecological investigation of the Baltic Sea environment, Riga, 1983. — Helsinki, 1985. — P. 161—175.
452. Schulz S. Monitoring of pelagic biological variables in the Baltic Sea//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 104—114.
453. Schulz S., Kaiser W. Biological effects of the salt water influx into the Gotland Basin in 1969/70//Oikos. — 1973. — Suppl. 15, N 24. — P. 21—27.
454. Schulz S., Kaiser W. Produktionsbiologische Untersuchungen in der Ostsee 1975 und einige spezielle Ergebnisse aus dem Jahre 1974//Fischerei-Forschung. — 1976.— Bd. 14, H. 1. — S. 53—63.
455. Scientific foundations of the variability peculiarity description of the Baltic Sea hydrological and hydrochemical regime/V. A. Rozhkov, A. E. Mikhailov, A. I. Smirnova, I. S. Shpaer//Proc. 17th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1990.
456. Sediment-water oxygen and nutrient exchanges along a depth gradient in the Baltic Sea/K. Koop, W. R. Boynton, F. Wulff, R. Carman//Mar. Ecol. Prog. Ser. — 1990. — Vol. 63. — P. 65—77.
457. Segerstråle S. G. Recent trends in Baltic marine biological research//Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev. — 1976. — N 14. — P. 347—369.
458. Sen Gupta R. Inorganic nitrogen compounds in ocean stagnation and nutrient resupply//Sci. — 1968. — N 160. — P. 884—886.
459. Sen Gupta R. Biochemical relationships and inorganic nitrogen equilibrium in semi-enclosed basins//Tellus.— 1969. — Vol. 21. — P. 270—281.
460. Sen Gupta R. On nitrogen compounds in the Baltic//FAO technical conference on marine pollution and its effects in living resources and fishing. — Rome, 1970.
461. Sen Gupta R. On some trace metals in the Baltic// Ambio. — 1972. — Vol. 1, N 6. — P. 226—230.
462. Sen Gupta R. A study on nitrogen and phosphorus and their interrelationship in the Baltic//Diss. Univ. Gothenburg, 1973. — 79 p.
463. Sen Gupta R. Nitrogen and phosphorus budgets in the Baltic Sea//Mar. Chem. — 1973. — Vol. 1 (4). — P. 267—280.
464. Sen Gupta R., Koroleff F. A quantitative study of nutrient fractions and a stoichiometric model of the Baltic//Estuar. Coast. Mar. Sci. — 1973. — N 1. — P. 336—360.
465. Scura E. D., Theilacker G. H. Transfer of the chlorinated hydrocarbons PCB in a laboratory marine food chain//Mar. Biol. Ass. — 1977. — Vol. 40, N 4. — P. 317—325.
466. Shaffer G. Conservation calculations in natural coordinates (with an example from the Baltic)//J. Phys. Oceanogr. — 1979. — N 9. — P. 847—855.
467. Shaffer G. On the phosphorus and oxygen dynamics of the Baltic Sea//Contrib. Askö Lab. — 1979. — P. 1—90.
468. Shaffer G., Rönner U. Denitrification in the Baltic proper deep water//Deep-Sea Res. — 1984. — Vol. 31, N 3. — P. 197—220.
469. Shpaer I. S., Churilova T. E., Jakovlev I. G. The study of the long-term variations of the hydrochemical parameters in the intermediate and active deep layers of the Baltic Sea//Proc. 17th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1990.
470. Simonov A. I., Justchak A. A. Recent hydrochemist variations in the Baltic Sea//Ambio. — 1972. — Vol. 1, N 1. — P. 21—22.
471. Sjöberg S., Wulff F., Wahlström P. The use of computer simulations for systems ecological studies in the Baltic//Ambio. — 1972. — Vol. 1, N 6. — P. 217—222.

472. Smith D., Eichelberger J. Thin-layer chromatography of carbon adsorption extracts prior to gas chromatographic analysis for pesticides//J. Water Pollut. Control Fed. — 1965. — N 27. — P. 77—85.
473. Soviet-Swedish Symposium on the pollution in the Baltic, Stockholm, 1971//Ambio. — 1972. — Vol. 1, N 1. — P. 184—185.
474. Soviet-Swedish Symposium on the Pollution in the Baltic, Riga, 1973//Ambio Special Rep. — 1976. — N 4. — P. 6—7.
475. Spippel F. A., Hallberg R. O., Oden S. Phosphate exchange at the sediment-water interface//Oikos. — 1973. — Suppl. 15. — P. 64—67.
476. Stadler D., Ziebarth U. Beschreibung einer Methode zur Bestimmung von Dieldrin pp-DDT and PCBs in Seewasser und Werte für die Deutsche Bucht, 1974//Deutsche Hydrogr. Ztschr. — 1975. — Bd. 28, H. 6.— S. 263—273.
477. Stadler D., Ziebarth U. Pp-DDT. Dieldrin und polychlorierte Biphenyle (PCB) im Oberflächenwasser der Westlichen Ostsee, 1974//Deutsche Hydrogr. Ztschr. — 1976. — Bd. 29. — S. 25—31.
478. Stigebrandt A. Computations of oxygen fluxes through the sea surface and the net production of organic matter with application to the Baltic and adjacent seas// Limnol. Oceanogr. — 1991. — Vol. 36. N 3. — P. 444—454.
479. Stigebrandt A., Wulff F. A model for dynamics of nutrients and oxygen in the Baltic proper//J. Mar. Res. — 1987. — Vol. 45. — P. 729—759.
480. Stirn J. Eutrophication in the Mediterranean Sea// UNESCO Rep. Mar. Sci. — 1988. — N 49. — P. 161—187.
481. Studies on mercury content in selected fish species from Pomeranian Gulf and Szczecin Firth/A. Chodyniecki, M. Kurpios, M. Protasowicki et al.//Acta Ichtyol. Piscatoria. — 1975. — Vol. 5, N 1. — P. 51—57.
482. Studies of the pollution of the Baltic Sea by the ICES/SCOR working group on the study of pollution of Baltic//Ices Coop. Res. Rep. — 1977. — N 63. — P. 1—97.
483. Tarkiainen E., Rinne I., Niemistö L. On the chemical factors regulating the primary production of phytoplankton in the Baltic proper//Merentutkimuslait. Julk./ Havsforskningsinst. Skr. — 1974. — N 238. — P. 39—52.
484. Tervo V. Petroleum hydrocarbon concentrations in the Baltic Sea water in 1978—1979 by fluorescence spectrometry//Proc. of the 13th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1982. — Vol. 1. — P. 128—129.
485. Tervo V. Raskasmetallipitoisundet silakassa//Meri. — 1983. — N 12. — S. 94—96.
486. The peculiarities of the annual cycle of hydrological and hydrochemical elements in the upper layer of the Baltic Sea/I. S. Shpaer, N V. Mjakisheva, M. O. Arsenchuk et al.//Proc. 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1988. — P. 932—949.
487. Time trends of chlordane, DDT and PCB concentration in pike (Esov lucius) and Baltic herring (Clupea harengus) in the Turku Archipelago, Northen Baltic Sea for period 1971—1982/R. Moilanen, H. Pyysalo, K. Wickström, R. Linko//Bull. Environ. Contam. Toxicol. — 1982. — Vol. 29. — P. 334—340.
488. Trace metals in some organisms from the Southern Baltic/A. Brzezinska, A. Trzosinska, W. Zmijewska, L. Wodkiewicz//Oceanologia. — 1984. — Vol. 18. — P. 79—84.
489. Trzosinska A. Bagan zasolenie Poludniowego Baltiku//Przegland geofis. — 1967. — N 12. — P. 3—4.
490. Uberwachung des Meers. Bericht für das Jahr. 1982. T. 1: Daten. — Hamburg: Deutsches Hydrographisches Institut, 1983.
491. Viljamaa H. DDT-ja PCB-aineiden esijutyminen planktonissa//Vesilaboratorion Tiedonantoja. — 1977. — Vol. 9, N 2. — P. 120—123.
492. Voipio A. The silicate in the Baltic Sea//Ann. Acad. Sci. Fenn. All. — 1961. — Vol. 106. — P. 1—15.
493. Voipio A. On the cycle and the balance of phosphorus in the Baltic Sea//Suomen Kemistilehti. — 1969. — N A42. — S. 48—53.
494. Voipio A. The Baltic Sea. — Amsterdam; Oxford; N. Y.: Elsevier Sci. Publ. Com., 1981. — 418 p.
495. Voipio A., Niemistö L. Sedimentological studies and their use in pollution research//ICES C. M. — 1979/ S: 46. — 10 p.
496. Voipio A., Tervo V. River input of the dissolved substances into the Baltic Sea. Preliminary report for the period 1.7.—31.12. 1975//5th Meet. of experts on the water balance of the Baltic Sea. — Rostock, 1977. — 3 p.
497. Voipio A., Tervo V. River input of dissolved substances into the Baltic Sea in 1976//6th Meet. of experts on the water balance of the Baltic Sea. — Hanasaari, 1979. — 3 p.
498. Wattenberg H. Der hydrographisch-chemische Zustand der Ostsee in Sommer 1939//Ann. Hydrogr. Mar. Meteorol. — 1940. — H. 6.
499. Wattenberg H., Meyer H. Der jahrzeitliche Gang der Gehalts der Meerwassers an Planktonnährstoffen in der Kieler Bucht im Jahre 1935//Kieler Meeresforsch. — 1936. — Bd. 1, H. 1.
500. Weigel H.-P. Atomabsorption Messungen von Blei, Cadmium, Kupfer, Eisen und Zink im Seston der Ostsee// Wissenschaft. Meeresunters. — 1976. — Bd. 28, H. 2. — S. 206—216
501. Weigelt M. Oxygen conditions in deep water of Kiel Bay and the impact of inflowing salt rich Kattegat water//Proc. of the 16th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1989. — P. 1108—1132.
502. Witting H Über die Verteilung des Kalzium und der Alkalinität in der Ostsee//Kieler Meeresforsch. — 1940. — Bd. 3, H. 2.
503. Wrembel H. Mercury in the waters of the Polish Baltic//Shore Area Acta Geophys. Pol. — 1982. — Vol. 30, N 1. — P. 39—48.
504. Wulff F., Niemi A. Priorities for the restoration of the Baltic Sea — a scientific perspective//Ambio. — 1992. — Vol. 21. — P. 193—195.
505. Wulff F., Rahm L. Long-term, seasonal and spatial variations of nitrogen, phosphorus and silicate in the Baltic: An overview//Mar. Environ. Res. — 1988. — N 26. — P. 19—37
506. Wulff F., Rahm L. Optimizing the Baltic sampling programme. The effects of using different stations in calculations of total amount of nutrients//Beitr. Meeresk. — 1989. — N 60. — S. 61—66.
507. Wulff F., Stigebrandt A. A time-dependent budget model for nutrient in the Baltic Sea//Global Biochem. Cycles. — 1989 — Vol. 3. — P. 53—78.
508. Wulff F., Rahm L., Stigebrandt A. Spatio-temporal distributions on hydrographical and chemical properties of the Baltic Sea//Contrib. Askö Lab. — 1987. — N 39. — P. 1—304.
509. Wulff F., Stigebrandt A., Rahm L. Nutrient dynamics of the Baltic Sea//Ambio. — 1990. — Vol. 19, N 3. — P. 126—133.
510. Young M. L. The transfer of ^{65}Zn and ^{59}Fe along a *Fucus serratus (L.), Littorina obtusata (L.)* food chain// J. Mar. Biol. — 1975. — Vol. 55, N 3. — P. 583—610.
511. Youngblood W. W., Blumer M. M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment: homologous series in soils and recent marine sediments//Geochem. Acta. — 1975. — N 39. — P. 1303—1314.
512. Yurkovskis A. K. Interpretation of the long-term dynamics of phosphorus and nitrogen in the Baltic proper// Baltic Sea Environ. Proc. — 1987. — N 19. — P. 131—143.
513. Yurkovskis A. K. Phosphorus and nitrogen dynamics studies in the depths of the Gotland deep by regression modelling of concentrations//Proc. 17th Conf. of the Baltic Oceanographers. — 1990.
514. Yurkovskis A. K., Kaleis M. V. Investigation of the correlation between year-to-year cycles of phosphorus in the Baltic Sea and the variability in the river discharge//Baltic Sea Environ. Proc. — 1986. — N 19. — P. 512—520.
515. Yurkovskis A. K., Kostrichkina E. M. Accumulation of the nutrients in the Baltic Sea and its biological concequences//Baltic Sea Environ. Proc. — 1985. — P. 482—502.
516. Zmudzinski L., Szarejko D. Badania hydrograficznobiologiczne zalewu Wislanego//Prace Morsk. Inst. Ryback., Gdynia. — 1955. — N 8.
517. Zsolnay A. The relative distribution of non-aromatic hydrocarbons in the Baltic in September 1971//Mar. Chem. — 1972—1973. — Vol 1. — P. 127—136.
518. Zsolnay A. Measurements made at the sea of the saturated and aromatic hydrocarbons in the Baltic in April 1973//ICES C. M. — 1973. — N 22.

Справочное издание

Проект «Моря»

Гидрометеорология и гидрохимия морей

Том III

БАЛТИЙСКОЕ МОРЕ

Выпуск 2

Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности

Редактор *О. М. Федотова.* Художественный редактор *Б. А. Бураков.*
Технический редактор *Н. Ф. Грачева.* Корректор *О. В. Андреева.*

Н/К

Сдано в набор 18.09.93. Подписано в печать 11.06.94. Формат 60×90¹/₈.
Бумага писчебланочная. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Печ. л. 54.5. Кр. отт. 55. Уч.-изд. л. 65.91. Тираж 600 экз. Индекс ОЛ-38. Заказ № 985.
Гидрометеоиздат. 199397. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38.
Санкт-Петербургская картографическая фабрика ВСЕГЕИ
199178, Санкт-Петербург, Средний проспект, 72.

Замеченные опечатки в кн. «Балтийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Сер. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. III» (Л.: Гидрометеоиздат, 1992)

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
5 (слева)	22-я снизу	В. А. Строк	В. Л. Стрюк
5 (слева)	6-я снизу	гл. 2.10 — Т. И. Румянцева	Гл. 2.10 — С. Н. Тупикин, п. 2.10.3 — С. Н. Тупикин, Т. И. Румянцева
5 (справа)	1-я сверху	Т. А. Чижева	Т. А. Гожева

Замеченные опечатки в кн. «Балтийское море. Вып. 2. Сер. Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. III» (СПб.: Гидрометеоиздат, 1994)

Страницы	Напечатано	Следует читать
246, 248, 250, 251, 253 — рис. 12.28	«Профессор Адольф Пенк»	«Профессор Альбрехт Пенк»
336, 337 — рис. 14.20	То же	То же
339—341 — рис. 14.21	„	„
378, 380, 381 — рис. 14.47	„	„
398—401 — рис. 14.58	„	„