ПРОЕКТ «МОРЯ СССР»

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОХИМИЯ МОРЕЙ СССР

ТОМ IV

ЧЕРНОЕ МОРЕ

ВЫПУСК 2

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ

КОМИТЕТ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ ПРИ КАБИНЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
СЕВАСТОПОЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
МИНИСТЕРСТВО РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА СССР
АЗОВСКО-ЧЕРНОМОРСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МОРСКОГО РЫБНОГО ХОЗЯЙСТВА И ОКЕАНОГРАФИИ

ПРОЕКТ «МОРЯ СССР»

ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЯ И ГИДРОХИМИЯ МОРЕЙ СССР

ТОМ IV

ЧЕРНОЕ МОРЕ

ВЫПУСК 2

ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ И ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

Под редакцией д-ра геогр. наук, проф. А. И. СИМОНОВА,
канд. хим. наук А. И. РЯБИНИНА,
д-ра геогр. наук, проф. Д. Е. ГЕРШАНОВИЧА

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ ГИДРОМЕТЕОИЗДАТ 1992

УДК 551.46

Редакционная коллегия серии монографий
«Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР»:
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

Приведены результаты систематических исследований гидрохимического режима вод Черного моря в 1960—1986 гг. Рассмотрены детали гидрохимической структуры вод. Выявлены основные закономерности в изменении гидрохимического режима моря. Проведена математическая обработка результатов наблюдений (статистика, спектральный анализ, множественная корреляция). Предложены уравнения регрессии для отдельных гидрохимических характеристик. Рассмотрены океанологические основы формирования биологической продуктивности.

Для гидрохимиков, океанологов, экологов, морских биологов, работников рыбного хозяйства.

Ответственный редактор Ф. С. Терзиев

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

Г $\frac{1805040600\text{-}022}{069(02)\text{-}92}$ Без объявл.

© Комитет гидрометеорологии при Кабинете министров СССР (Госгидромет СССР), 1992 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

ЧАСТЬ I. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

1. Методы систематизации и обработки материалов наблюдений 7
1.1. Расчет статистических характеристик . . . . . —
1.2. Корреляционный анализ . . . . . —
1.3. Расчет трендов . . . . . —
1.4. Метод Монте-Карло 8
1.5. Спектральный анализ временных рядов . . . . —
1.6. Множественная регрессия . . . . . —

2. Солевой состав 9
Введение . . . . . —
2.1. Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы 10
2.2. Распределение главных ионов в прибрежных районах . . . . . —
2.2.1. Рукав Быстрый — море (рис. 2) . . . . . —
2.2.2. Сухой лиман 14
2.2.3. Одесский залив (см. рис. 2) 15
2.2.4. Ялтинский залив (1965, 1967 гг.) (см. рис. 2) —
2.2.5. Феодосийский залив (см. рис. 2) . . . . —
2.2.6. Новороссийская бухта (рис. 3) 16
2.2.7. Туапсинская бухта (см. рис. 3) . . . . . —
2.2.8. Порт Сочи . . . . . —
2.2.9. Порт Сухуми (см. рис. 3) 17
2.2.10. Порт Поти (см. рис. 3) . . . . . —
2.2.11. Батумская бухта . . . . . —
2.3. Распределение сульфат-ионов в водах открытой акватории . . . . . —
2.4. Распределение кальция и магния в водах открытой акватории 20
2.5. Распределение калия, брома и стронция в водах открытой акватории 22
2.6. Карбонатная щелочность 23
2.7. Содержание и распределение бора 29
2.8. Вопросы о точности определения солености. . . . —

3. Водородный показатель 31
Введение . . . . . —
3.1. Материалы наблюдений. Аналитические методы . 33
3.2. Распределение водородного показателя 35

4. Растворенный кислород 45
4.1. Северо-западный район . . . . . —
Введение . . . . . —
4.1.1. Материалы наблюдений. Аналитические методы 46
4.1.2. Распределение растворенного кислорода . . —
4.1.3. Оценка баланса растворенного кислорода . . 53
4.1.4. Оценка суточного хода содержания растворенного кислорода 55
Выводы 58
4.2. Открытое море . . . . . —
Введение . . . . . —
4.2.1. Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы 59
4.2.2. Режим растворенного кислорода . . . . . —
Выводы и обобщения по распределению растворенного кислорода 101
4.3. Элементы баланса 103
4.3.1. Оценка продукции кислорода в отдельных районах моря . . . . . —
4.3.2. Оценка поступления кислорода в атмосферу и его переноса в водной толще . . . . . —

5. Сероводород 104
5.1. Результаты океанографических исследований в период 1890—1965 гг. . . . . —
5.2. Материалы наблюдений и состояние изученности 106
5.3. Сероводород в слое 75—250 м в 1964—1986 гг. . . 107
5.3.1. Горизонт 75 м . . . . . —
5.3.2. Горизонт 100 м . . . . . —
5.3.3. Горизонт 150 м 108
5.3.4. Слой воды 200—250 м 109
5.4. Слой 300—1500 м 110
5.4.1. Горизонт 300 м . . . . . —
5.4.2. Горизонт 500 м 111
5.4.3. Слой воды 1000—1500 м 112
5.5. Глубинные воды . . . . . —
5.6. Проблемы происхождения сероводорода в море . . —

6. Биогенные вещества 114
6.1. Кремний . . . . . —
Введение . . . . . —
6.1.1. Информация о материалах наблюдений (табл. 50). Аналитические методы 115
6.1.2. Динамика концентраций кремния . . . . . —
6.1.3. Элементы баланса кремния 126
6.2. Фосфор 129
Введение . . . . . —
6.2.1. Фосфаты . . . . . —
6.2.2. Общий фосфор 139
6.3. Азот 141
Введение . . . . . —
6.3.1. Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы 142
6.3.2. Нитритный азот 143
6.3.3. Нитратный азот 147
6.3.4. Аммонийный азот 149
6.3.5. Органический азот 150
Выводы . . . . . —

7. Микроэлементы 151
Введение . . . . . —
7.1. Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы . . . . . —
7.2. Характеристики содержания и распределения микроэлементов 153
7.2.1. Медь в открытой акватории моря . . . . —
7.2.2. Кадмий и свинец в открытой акватории моря 156
7.2.3. Некоторые общие закономерности распределения меди, кадмия и свинца в открытой акватории моря 158
7.2.4. Цинк, ртуть, кобальт, хром 159
7.3. Некоторые статьи балансов 161
7.3.1. Потоки микроэлементов из атмосферы . . . —
7.3.2. Потоки микроэлементов в гидробионты на примере Севастопольской бухты 163
7.4. Некоторые выводы и суждения 165
Заключение . . . . . —
Список литературы 168

ЧАСТЬ II. ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

1. Основные компоненты биоценоза 173
1.1. Фитопланктон . . . . . —
1.2. Зоопланктон 175
1.3. Бентос 178
1.4. Ихтиофауна 179
1.4.1. Пелагические рыбы 180
1.4.2. Донные и придонные рыбы 183
1.4.3. Ихтиопланктон 188

2. Механизмы формирования продуктивности вод Черного моря 196
2.1. Речной сток . . . . . —
2.2. Биохимические механизмы . . . . . —
2.3. Физико-динамические факторы 197
2.4. Антропогенное воздействие 199
2.4.1. Влияние качественного состава вод . . . . —
2.4.2. Зарегулирование стока рек 200
2.4.3. Дноуглубительные работы и дампинг грунтов 201
2.4.4. Донный промысел рыб и моллюсков . . . —
2.4.5. Нерациональный промысел рыб . . . . . —

3. Влияние океанографических условий на распределение и поведение промысловых объектов Черного моря . . . . . —
3.1. Роль температуры воды в миграционном и стайном поведении хамсы . . . . . —
3.2. Влияние абиотических факторов на формирование скоплений шпрота 204
3.3. Влияние динамических факторов на распределение хамсы в восточной части Черного моря в осенний период 205

4. Гидрометеорологические основы рыбопромыслового прогнозирования в Черном море 207
4.1. Анчоус 209
4.2. Шпрот 211
4.3. Ставрида 212

Заключение 215
Список литературы 216

ПРЕДИСЛОВИЕ

Окраинные и внутренние моря Советского Союза обладают огромными биологическими, минерально-сырьевыми, энергетическими, водными и другими ресурсами, которые используются многими отраслями народного хозяйства. К числу наиболее крупных отраслей относятся 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 других пособий 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, республиканских и территориальных 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 обеспечения относятся следующие:

1. Серия справочно-кадастровых пособий по 12 морским бассейнам, содержащих режимные и статистические данные по важнейшим элементам гидрометеорологического и гидрохимического режимов 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 СССР, состоящая из 13 томов, изданная в середине 80-х гг.

В соответствии с заданиями проекта «Моря СССР» научно-технической программы ГКНТ «Мировой океан» 39 организациями Госгидромета СССР, 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 СССР». 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 формирования биопродуктивности морей. Существенное внимание уделяется современным и ожидаемым антропогенным изменениям элементов режима. В силу объективных причин — специфики режима морей, степени изученности, 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 особен-

ности, 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 особо опасные 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, фосфора и азота, характеристика элементов баланса биогенных веществ, антропогенные изменения баланса биогенных веществ.

В разделе «Океанологические основы формирования биопродуктивности вод», 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 натурные данные и современные гидротермодинамические 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 СССР» 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 океанографических и 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 СССР.

В целом настоящая серия монографий представляет собой естественное продолжение и развитие общей системы обеспечения режимной гидрометеорологической и гидрохимической информацией морских отраслей народного хозяйства страны на морях, омывающих берега Советского Союза, и служит ее важнейшей составной частью.

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 СССР» и по подготовке серии монографий «Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР» осуществлялась 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 СССР» выполнена под общим руководством научного руководителя проекта «Моря СССР» канд. геогр. наук Ф. С. Терзиева. Ответственные исполнители работ канд. геогр. наук Н. П. Гоптарев, д-р физ.-мат. наук В. И. Калацкий, д-р геогр. наук А. И. Симонов (ГОИН), д-р биол. наук Д. Е. 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 посвящена гидрохимическим условиям

Черного моря и подготовлена А. И. Рябининым, В. И. Губановым, В. Н. Кравец, Е. А. Лазаревой, Л. В. Малаховой, Л. В. Савиной, Л. О. Тарасовой.

Со времени выхода в свет фундаментальной книги Б. А. Скопинцева [150], обобщившей материалы исследования гидрохимии Черного моря за период до 1970 г., наблюдается определенный «бум» в изучении химии его вод. К этому «буму» имеют непосредственное отношение, кроме организаций Госгидромета СССР (ГОИН, Дунайская, Николаевская и Аджарская гидрометеорологические обсерватории, Одесская, Ялтинская, Туапсинская гидрометеорологические станции), Морской гидрофизический институт и Институт биологии южных морей АН УССР, АзЧерНИРО Минрыбхоза СССР, Болгарская академия наук и др. Результаты экспедиционных исследований за период с 1970 г. нашли отражение в океанографической литературе в виде многочисленных публикаций, а также в виде многочисленных докладов на всесоюзных и региональных совещаниях, в том числе на съездах советских океанологов, и ежегодных заседаниях секции Океанографической комиссии по южным морям и Индийскому океану (МГИ АН УССР).

Наиболее длинные и систематические ряды наблюдений за характерными гидрохимическими показателями режима вод Черного моря (растворенный кислород, сероводород, главные ионы солевого состава, элементы главного биогенного цикла, водородный показатель, микроэлементы) получены подразделениями Госгидромета СССР благодаря выполнению океанографических программ по «вековым разрезам и ОГСНК (Общегосударственная служба наблюдения и контроля окружающей среды). Наличие таких рядов позволило впервые применить современные методы математической статистики, что в свою очередь позволило выявить характерные статистические закономерности гидрохимического режима моря по ряду химических показателей.

Поэтому, учитывая достаточно ранний выход обобщающего труда Б. А. Скопинцева [150] по гидрохимии Черного моря, с одной стороны, и накопленные статистически значимые ряды наблюдений по ряду гидрохимических показателей, с другой стороны, была выполнена подготовка настоящего монографического труда (ч. I).

Основная цель этой части монографического труда состоит в освещении современного гидрохимического режима моря по приоритетным гидрохимическим показателям на основе главным образом исследований и работ органов Госгидромета СССР. Отличие обсуждаемого труда от ранее опубликованных аналогичных трудов по Черному морю, в том числе от монографии Б. А. Скопинцева [150], состоит в его своеобразии, заключающемся в отказе от комплексного, всеобъемлющего представления материалов экспедиционных и экспериментальных исследований по гидрохимическому режиму, т. е. коллектив авторов, рассматривая современный гидрохимический режим моря, сознательно сосредоточил свое внимание на вышеперечисленных гидрохимических показателях, изучавшихся по «стандартным» схемам положения станций наблюдений, приурочивавшихся, как правило, по времени к гидрологическим сезонам.

Отметим, что в настоящем труде один из важнейших гидрохимических показателей газового режима моря — сероводород—рассматривается только кратко (гл. 5), так как ему посвящена отдельная монография.

Авторы особенно подчеркивают, что материалы, положенные в основу ч. I монографии, являются результатом работы большого коллектива сотрудников института: участников экспедиционных рейсов, химиков-аналитиков, исследователей и оформителей. Активными участниками экспедиционных рейсов в различное время были сотрудники Севастопольского отделения Государственного океанографического института на НИС «Мгла» и «Яков Гаккель»: А. С. Романов, Е. А. Лазарева, Л. Б. Жидкова, Т. Ю. Власова, Е. В. Постников, Н. А. Чудотворова, Н. П. Клименко, Т. А. Рясская, Т. Л. Монина, Е. В. Грель, А. И. Алексеенко, В. И. Губанов, С. А. Назаренко, С. В. Медков, А. Г. Пономарева, В. И. Целикова, Т. М. Цуканова, В. И. Потипун, Л. В. Малахова, С. К. Коновалов и др. Большой вклад в предварительные исследования массивов наблюдений внесла А. Ф. Даниленко. Химико-аналитические работы и расчеты на ЭВМ, помимо участников экспедиционных рейсов, выполнялись В. Б. Белявской, М. М. Мирошниченко, Я. И. Мазюк, Н. А. Коноваленко, Т. В. Коротковой, В. И. Пальчаком, А. А. Афониной. В оформлении монографии принимали участие Л. А. Максимова, Н. Н. Скрипченко.

Естественно, что в экспедиционных исследованиях принимали участие несколько поколений гидрохимиков организаций Госгидромета СССР на Черном море, а также специалисты Одесского отделения Государственного океанографического института.

В монографии материалы представлены: по солевому составу и H_2S А. И. Рябининым, по щелочности, водородному показателю, растворенному кислороду в открытой части моря, растворенному кислороду в северо-западном районе моря, по элементам главного биогенного цикла и по микроэлементам совместно с А. И. Рябининым соответственно Л. О. Тарасовой, Л. В. Малаховой, В. Н. Кравцом, Л. В. Савиной, В. И. Губановым, Е. А. Лазаревой.

Часть II монографии посвящена описанию океанологических основ формирования биологической продуктивности Черного моря и подготовлена коллективом авторов: В. И. Малышевым, Л. Г. Елизаровой, П. Н. Золотаревым, А. Г. Архиповым, А. В. Жигуненко, А. Н. Михайлюк, Л. К. Чащиным, В. А. Шляковым, Л. Л. Шишло, Э. З. Самышевым, Л. К. Себах, Д. Я. Фашук, А. Ю. Деружинским, Д. Г. Добаткиным, В. В. Дроновым, В. А. Брянцевым.

Вплоть до 50-х гг. нашего столетия среди ученых бытовало мнение, что это море является неблагоприятным для жизни гидробионтов и его биологическая продуктивность находится на весьма низком уровне. И только в последние 30 лет в результате интенсивных комплексных исследований было достаточно подробно изучено количественное распределение основных элементов биологической структуры моря, скорости их воспроизводства, определяющие уровень продукции, и был сделан вывод о довольно высокой продуктивности этого водоема.

Первичная продукция в Черном море используется в пищевой цепи достаточно полно, что свидетельствует о ее большой зрелости. Прямое выедание фитопланктона зоопланктоном происходит более интенсивно, чем в других морских бассейнах. Характерной особенностью экосистемы является также значительное богатство бентоса.

Оценки рыбных ресурсов Черного моря весьма противоречивы. Годовая продукция рыб разными авторами оценивается от 0,25 до 2,85 млн т. Начиная с 1975 г. более 95 % добычи приходится на хамсу, черноморский шпрот, ставриду и мерланга — они являются основными объектами промысла. В 1986 г. вылов указанных рыб составил 626 тыс. т, в том числе в СССР — 207 тыс. т.

Знания, полученные в течение почти 100-летнего периода исследований Черного моря, были расценены человеком как право на активную эксплуатацию его рыбных, водных, рекреационных, минеральных богатств, развитие интенсивной хозяйственной деятельности в бассейне водоема. Однако реакция черноморской экосистемы на эти воздействия показала, что любое вмешательство в жизнь моря должно основываться не только на знании особенностей его режима, но и на глубоком понимании механизмов, поддерживающих эту сложную динамическую систему в равновесии. В этой связи в предлагаемом разделе наряду с характеристикой биологической части экосистемы Черного моря, данной в гл. 1, сделана попытка выделить механизмы, определяющие формирование продуктивности водоема, включая антропогенный фактор. Эти вопросы рассмотрены в гл. 2.

В гл. 3 изложены материалы исследований последних лет, выполненных сотрудниками ЮгНИРО, направленных на выявление связи условий среды с жизнедеятельностью гидробионтов, которые, безусловно, нельзя расценивать как окончательные результаты. Тем не менее, по нашему мнению, они могут представлять определенный интерес в плане направлений экологических черноморских исследований.

В гл. 4 рассмотрены подходы и результаты применения прогностических разработок, выполненных в лаборатории промысловой океанологии Черного моря ЮгНИРО при рыбопромысловом прогнозировании в водоеме. Их основу составляет связь атмосферной циркуляции с гидрологической структурой вод и параметрами урожайности, динамики численности, особенностями поведения и распределения основных промысловых объектов моря.

В заключении приводятся примеры попыток искусственного повышения уровня продуктивности вод моря, направлений исследований и работ по улучшению экологической обстановки в водоеме.

ЧАСТЬ I. ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

1. МЕТОДЫ СИСТЕМАТИЗАЦИИ И ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ НАБЛЮДЕНИЙ

Количественная оценка пространственно-временного распределения ряда гидрохимических параметров моря проводилась путем расчета статистических характеристик полей, подбором эмпирических уравнений регрессии между парами исследуемых ингредиентов (корреляционный анализ), вычислением многолетних изменений (трендов) показателей гидрохимического режима и восстановлением неизвестных значений концентраций методом вероятностной локально-скользящей интерполяции (метод Монте-Карло). Все расчеты выполнялись на ЭВМ М-222 с применением диспетчера пятой версии 01.10.72 г. и программ, написанных на языке Алгол-60.

1.1. Расчет статистических характеристик

Обработка материалов наблюдений проводилась по программе «Статистика», по которой в каждом квадрате вычислялись средняя арифметическая концентрация $\bar{C}_N$ и среднее квадратическое отклонение σ_N. Эта информация характеризует каждый из 95 квадратов Черного моря, размеры которых 1°00′ ш. и 0°40′ д. В случае если наблюдения в квадрате не проводились или их было недостаточно, расчет статистических характеристик выполнялся по районам моря. Районирование моря (рис. 1) проведено на основании анализа многочисленных данных по содержанию, распределению и динамике основных гидрологических и гидрохимических показателей, а также с учетом гидрометеорологических и геоморфологических условий [89, 162, 163].

По рассчитанным средним значениям концентраций построены осредненные поля гидрохимических параметров для заданных горизонтов.

1.2. Корреляционный анализ

Корреляционные уравнения связи рассчитаны на ЭВМ М-222 методом наименьших квадратов. При этом исследовались следующие уравнения регрессии:

а) прямолинейная корреляция $x = A + By$;

б) нелинейная корреляция:

$$x^{1/2} = A + By;$$
$$x^{-1} = A + By;$$
$$\lg x = A + By;$$
$$\lg x = A + B \lg y;$$
$$x = A + B\sqrt{y},$$

где A и B — коэффициенты уравнений регрессии.

При коэффициенте корреляции $r > 0{,}6$ связь между парой ингредиентов x и y признавалась хорошей; при $r = 0{,}5...0{,}4$ — слабой, а при $r < 0{,}3$ — весьма слабой.

1.3. Расчет трендов

Вычисление многолетних изменений гидрохимических параметров для различных квадратов (районов) моря производилось по программе «Тренд». С помощью метода наименьших квадратов подбиралась линия регрессии для оценки изменений содержания ингредиента во времени в виде уравнения

$$C' = a + bT,$$

где C' — концентрация ингредиента, вычисленная с помощью линии регрессии, в то время как C представляет фактически наблюденное значение;

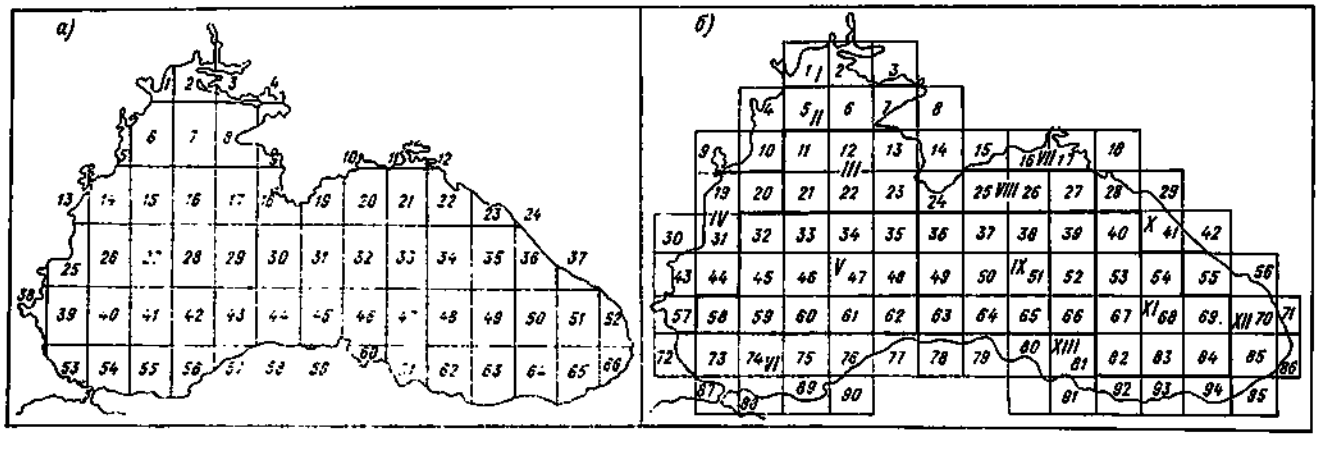

Рис. 1. Схемы расположения и номер квадратов (арабские цифры) и районов (римские цифры) для периодов 1939—1962 гг. (*а*) и 1963—1986 гг. (*б*).

$a = \overline{C} - b\overline{T}$ — свободный член; $b = (\overline{CT} - \overline{C}\,\overline{T})/(\overline{T^2} - \overline{T}^2)$ — коэффициент тренда (черта над величиной означает операцию осреднения); T — время.

Уровень статистической значимости коэффициентов регрессии a и b оценивался с помощью F-критериев Фишера [121], согласно которым отношение дисперсии наблюденных значений от среднего и дисперсии наблюденных значений от линии регрессии должно быть больше критического $F_{кр}$. Значения для 1 %-ного и 5 %-ного уровня значимости табулированы [121].

1.4. Метод Монте-Карло

Проверка правильности восстановления поля проводилась методом Монте-Карло [33]. Для этого метода не характерно накопление погрешностей округления при использовании ЭВМ. Для анализируемого поля строилась единая система линейных алгебраических уравнений, которая решалась по программе восстановления полей локально-скользящей интерполяции [169].

Для подготовки результатов наблюдений к вычислительному процессу произведено районирование моря с помощью регулярной сетки квадратов со сторонами 20′ по широте и 30′ по долготе. Наблюдения на станции приписываются к центру квадрата, в котором она расположена. Если в квадрате больше одного наблюдения, то в квадрат записывается среднее арифметическое значение. Квадратам, в которых имеются наблюдения, присваивается признак «1». Там, где необходимо восстановить поле, присваивается признак «Ø». Квадратам, находящимся за областью исследований и на ее границах, присваивается признак «2».

Из квадратов с присвоенными признаками образуют прямоугольную матрицу и матрицы массива значений. В матрицу массива значений записываются результаты наблюдений в квадратах или «Ø».

Исключение или исправление грубых ошибок производится согласно закону распределения гидрохимических параметров на каждом горизонте. Значения наблюдений за концентрациями ингредиента, отклонения которых от нормы больше 3σ, выбрасываются. Массив признаков и массив значений набиваются на перфокарты.

Реализация «блужданий» с заданным законом распределения вероятностей на каждом горизонте осуществляется на ЭВМ по программе «Монте-Карло» [169]. В результате счета в квадратах с признаком «Ø» вычисляется концентрация ингредиента.

Ошибки интерполяции находятся по отклонению расчетных значений от наблюдаемых методом сумм и вычисляются следующим образом. По данным наблюдений восстанавливается поле исследуемого параметра методом Монте-Карло. Затем по восстановленным значениям снова этим же методом находится значение концентраций в тех квадратах, где были наблюдения, предполагая, что эти квадраты с неизвестным содержанием параметра. После повторного восстановления поля средняя квадратическая погрешность интерполяции находилась по формуле

$$\sigma = 3\sqrt{\left[\sum_{i=1}^{n}(C_i - C_i')^2\right] \Big/ [N(n-1)]},$$

где N — полное число «блужданий», которое необходимо промоделировать, чтобы достичь нужной точности решения; C_i — значение содержания ингредиента в i-м квадрате ($i = 1, 2, 3, \ldots$), наблюдаемое в натуре; C_i' — рассчитанное методом Монте-Карло значение ингредиента в том же квадрате.

Таким образом, методом Монте-Карло можно достичь практически любой точности, которая будет лимитироваться временем решения задачи на ЭВМ [33], т. е. ее быстродействием.

Точность решения зависит еще от того, насколько мала сторона квадрата. С уменьшением стороны квадрата время вычисления увеличивается [33] и имеет порядок

$$T \sim t_r^2/\varepsilon^2,$$

где t — быстродействие ЭВМ; r — радиус рассматриваемой области (в количестве квадратов); ε — требуемая точность вычисления.

1.5. Спектральный анализ временных рядов

Для вычисления значений оценок спектральных плотностей временных рядов наблюдений за концентрацией кислорода на многосуточной станции использовалось преобразование Фурье оценок корреляционных функций по формуле «трапеций»:

$$S_x^*(\omega) = \frac{\Delta\tau}{\pi}\sum_{l=0}^{m}\delta(l)\,R_x^*(l\,\Delta l)\cos\left(\frac{\pi l K}{m\,\Delta\tau}\right)h(\tau),$$

где

$$\delta(l) = \begin{cases} 0 & \text{при } l > m;\ l < 0; \\ 1/2 & \text{при } l = 0;\ l = m; \\ 1 & \text{при } 0 < l < m; \end{cases}$$

$l = 0, 1, 2, \ldots, m$ — число ординат оценки автокорреляционной функции; $\Delta\tau$ — интервал между ординатами; $K = 0, 1, \ldots, y$ — число вычисляемых ординат $S_x^*(\omega)$; $h(\tau)$ — весовая функция Хемнинга;

$$\begin{cases} h(\tau) = 0{,}54 + 0{,}46\cos(\pi\tau/T_0) & \text{при } 0 \leqslant \tau \leqslant \tau_0, \\ h(\tau) = 0 & \text{при } \tau > T_0. \end{cases}$$

Так как низкочастотные компоненты (сопоставимые с длиной реализации) существенно ухудшают свойства оценки спектра, то из анализируемых временных рядов предварительно вычиталось значение линейного тренда, рассчитанного по методу наименьших квадратов.

1.6. Множественная регрессия

Использовалась программа А. В. Цуканова и Ю. В. Подвинцева «Множественная регрессия», написанная на языке Алгол-60 для ТА-2М ЭВМ М-222. Программа предусматривает выдачу исходных данных, матриц коэффициентов корреляции, значений свободного члена a в уравнении регрессии, коэффициентов Стьюдента, критерия Фишера. Коэффициент множественной корреляции R выражает точность прогноза зависимой случайной переменной по линейному уравнению регрессии и выражается соответственно через коэффициенты пар-

ной корреляции. При этом

$$R=\sqrt{\Delta^*}/\Delta,$$

$$\text{где } \Delta=(-1)^{n+1}\begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \dots & r_{3n} \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \dots & r_{nn} \end{vmatrix};$$

r_{nn} — коэффициенты парной корреляции. Определитель Δ^* получается из определителя Δ добавлением одной строки (верхней, содержащей коэффициенты корреляции между y и x_i) и столбца из тех же коэффициентов.

Добавим, что элементы нормированной корреляционной матрицы определяются [110] по формуле

$$r_{x_i, x_j}=\frac{\frac{1}{N}\sum\limits_{K=1}^{N} x_i^K x_j^K-\left(\frac{1}{N}\sum\limits_{K=1}^{N} x_i^K\right)\left(\frac{1}{N}\sum\limits_{K=1}^{N} x_j^K\right)}{\sqrt{\frac{1}{N}\sum\limits_{K=1}^{N}(x_i^K)^2\left(\frac{1}{N}\sum\limits_{K=1}^{N} x_i^K\right)^2}\times\sqrt{\frac{1}{N}\sum\limits_{K=1}^{N}(x_j^K)^2-\left(\frac{1}{N}\sum\limits_{K=1}^{N} x_j^K\right)^2}},$$

где $K=1, 2, \dots, N$; x_i, x_j — факторы.

2. СОЛЕВОЙ СОСТАВ

Введение

Работы, выполненные в период с 1890 по 1937 г., малочисленны, эпизодичны и освещают распределение отдельных компонентов солевого состава на отдельных горизонтах моря.

Наиболее ранние работы по определению содержания главных ионов в водах открытой части моря выполнены в 1892 г. С. Н. Колотовым в шести пробах воды, взятых с разных глубин четырех станций [96], в 1892 г. А. А. Лебединцевым в поверхностных водах [106], в 1926—1927 гг. Н. В. Кондыревым и В. И. Юрьевым в пробах воды взятых с разных глубин [150].

Из данных зарубежных исследований имеются сведения, опубликованные З. Караоглановым и М. Д. Хаджиевым в 1925—1926 гг., о содержании главных ионов в пробах черноморской воды, взятых с 0 и 290 м на одной станции в 90 км от п. Варна, а также данные А. Р. Рождественского о содержании сульфатов, натрия, калия, кальция в трех пробах поверхностных вод моря.

А. П. Виноградов [37] относит к главным ионам катионы (Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^+; Sr^{2+}) и анионы (Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^- и CO_3^{2-}, Br^-, F^-, H_3BO_3). Согласно Б. А. Скопинцеву [150], первые определения главных ионов (Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, Cl^-, Br^-, CO_3^{2-}, SO_4^{2-}) были выполнены С. Колотовым в 1892 г.

Б. А. Скопинцев с сотрудниками в период 1952—1960 гг. изучали сульфаты, щелочность, кальций и магний. Результаты этих работ подробно изложены в монографии [150]. По отдельным ионам (хлорность) с 1924 г. проводятся систематические и массовые наблюдения в связи с изучением полей солености вод Черного моря. В 1964—1966 гг. А. В. Рождественский [129] исследовал содержание Na^+, K^+ и Mg^{2+}. Содержание Sr^{2+} впервые определено Тамоньевым и Бруевичем (1964). Содержание бора впервые определено в водах моря М. А. Добржанской в 1935 г. [65], а содержание фтора — А. В. Рождественским с сотрудниками [133].

МГИ АН УССР в 1952—1955 гг. [151—153] и в 1964—1965 гг. [113] были проведены определения главных элементов солевого состава на пяти станциях открытой части Черного моря на всех стандартных горизонтах. В этих же исследованиях были тщательно отработаны методики определения главных компонентов солевого состава черноморских вод.

С 1964 по 1970 г. Бассейновой гидрометеорологической обсерваторией под руководством Государственного океанографического института совместно с гидрометеорологическими станциями Одессы, Туапсе и Дунайской ГМО проводились работы по определению главных компонентов солевого состава: Cl^-, $CO_3^{2-}+HCO_3^-$, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+) в прибрежных водах главнейших портов Черного моря — на взморье Дуная (рукав Быстрый—море), в Одесском заливе и Сухом лимане, в Севастопольской бухте, Ялтинском и Феодосийском заливах, в портах Новороссийск, Туапсе, Сочи, Сухуми, Поти, Батуми. Ранее результаты этих наблюдений не опубликовывались. Из обзора литературы следует, что, несмотря на длительный период исследования (до 1970 г.) главных ионов в водах моря, нет полного представления о содержании и распределении главных ионов в толще вод всей акватории Черного моря. В то же время степень изменчивости соотношений главных ионов между собой, как наиболее консервативных химических характеристик морских вод, может служить наиболее значимым показателем «здоровья» морской среды, и отклонение этого «здоровья» от нормы может возникать под влиянием долговременных и интенсивных антропогенных воздействий.

Первые определения бора в Черном море были проведены М. А. Добржанской в 1935 г. на Севастопольской биологической станции АН СССР. Было выполнено около 200 определений, относящихся как к открытой части моря, так и к прибрежной его полосе. Бор определялся по отдельным горизонтам от поверхности до дна (0, 50, 100, 150, 200, 300, 500, 1000, 1500 и 2000 м, а в некоторых случаях были дополнительные горизонты — 10, 25, 60, 75, 125, 250 м). Единичные определения бора в Черном море (район Карадага и Евпатории — три пробы) проводились также Биогеохимической лабораторией АН СССР в 1937—1938 гг.

По данным М. А. Добржанской [63], в Черном море в связи со значительными колебаниями солености в отдельных районах более четко

выступают и изменения в значениях B/Cl. В северо-западном районе, где соленость значительно ниже, чем в остальной части моря, отношение бора к хлору в отдельных случаях достигает 29,0, в поверхностных слоях открытой глубоководной части моря ниже 27,0.

Вертикальное распределение бора в Черном море резко отличается от такового в океане. Для Черного моря характерно неуклонное увеличение с глубиной абсолютных и относительных количеств бора. Заметное накопление бора отмечается уже с глубины 150—200 м, где B/Cl в среднем около 28,0, а на глубинах 1500—2000 м (в зависимости от общей глубины) достигает 30,0.

Несколько отличается вертикальное распределение бора в северо-западном районе. Непосредственно в тех участках где имеется сильное распреснение поверхностных вод, наблюдались случаи более высоких значений B/Cl на поверхности, чем на нижележащих горизонтах.

По данным Г. А. Глебовича [43] в воде Черного моря отношение B/Cl на поверхности в среднем равно 0,23.

Систематические исследования щелочности вод Черного моря проводились с 1923 по 1928 г. Главным гидрографическим управлением ЧФ совместно с Севастопольской биологической станцией (СБС) АН СССР под руководством Ю. М. Шокальского. Наблюдения велись на э/с «Ингул», затем на «Гидрографе». На последнем судне исследования продолжались и в дальнейшем. Кроме того, экспедиционные исследования в прибрежной полосе проводились на судне СБС «Александр Ковалевский». Интенсивное исследование Черного моря СБС продолжала и в послевоенные годы [64].

Общая щелочность в открытой части Черного моря определялась М. А. Добржанской в 1925—1927 гг. иодометрическим методом; методом Бруевича в 1949 г. определения проводил Я. К. Гололобов, в 1954—1955 и 1960 гг. в МГИ АН СССР определения проводились этим же методом [150].

Гидрометслужба СССР исследования щелочности проводила с 1957 г. (БГМО ЧАМ). В современный период в СО ГОИНа были предприняты исследования содержания и распределения некоторых главных ионов (SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+}) в открытой акватории моря и подробно изучено содержание и распределение бора в западной части моря. Одновременно выполнена работа по уточнению формул расчета хлорности в сероводородных и кислородсодержащих водах. Также проведено изучение солености вод путем сопоставления двух методов ее определения (гравиметрического и расчетного по значениям хлорности) и содержание ионов брома, калия, кальция и стронция разработанным в СО ГОИНа рентгенорадиометрическим методом.

2.1. Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы

Информация о материалах наблюдений за содержанием главных ионов ($Na^+ + K^+$, Mg^{2+}, Ca^{2+}, SO_4^{2-}, хлорность) и карбонатной щелочностью в прибрежных водах представлена в табл. 1. Здесь же дана информация о материалах наблюдения в открытых водах моря за содержанием магния, кальция, сульфата, калия, брома, стронция, карбонатной щелочности и бора.

Карбонатная щелочность воды составляет основную долю общей щелочности, так как доля ионов, определяющих некарбонатную щелочность (HBO_3^-, HPO_4^{2-}, SiO_3^{2-} и т. д.) в Черном море, весьма незначительна.

Хлорность определялась аргентометрическим и электрометрическим методами [125, 126], сульфаты — гравиметрическим [113, 114, 179], кальций и магний — комплексометрическим [114]. Сумма натрия и калия находилась по разности между суммой эквивалентов анионов и суммой эквивалентов кальция и магния. Перевод в массовую концентрацию (мг/л) осуществлялся умножением эквивалентной концентрации на 25 (эмпирический коэффициент) [114]. Борная кислота определялась потенциометрическим обратным титрованием [104].

Методика основана на реакции образования сильной маннитоборной кислоты при взаимодействии борной кислоты с маннитом и последующего титрования раствором гидроксида бария с электрометрическим фиксированием эквивалентной точки (нижний предел определения — 0,01 мг/л с точностью ±0,002: стандартное отклонение единичного измерения). Хлор, калий, кальций, бром, стронций определялись рентгенорадиометрической методикой, разработанной в СО ГОИНа [135]. Методика основана на измерении характеристических спектров вторичного рентгеновского излучения, образующихся при облучении сухого солевого остатка пробы источниками радионуклидов железо-55 и америций-241. Соленость пробы воды определялась весовым методом по Кнудсену с предварительной отгонкой воды от солевой массы в виде легкокипящей азеотропной смеси с четыреххлористым углеродом. Карбонатная щелочность определялась методикой, разработанной С. В. Бруевичем [125, 126], на основе прямого титрования проб соляной кислотой на холоде при непрерывном продувании титруемого раствора током воздуха, очищенного от следов CO_2 и NH_3, со смешанным индикатором (метилрот + метиленовая голубая). Ошибка составляет 0,2—0,3 % [169]. Методика удобна в эксплуатационных условиях и ее сравнение с определением щелочности по методу обратного титрования дало одинаковые результаты [106].

Отбор проб воды производят из батометра после взятия проб на кислород и pH, помещают в пластиковые или стеклянные бутыли, плотно закрывают. Очистка воздуха осуществляется путем его пропускания последовательно через концентрированный раствор щелочи для поглощения углекислоты, через раствор кислоты фосфата натрий-аммония с несколькими каплями 1 %-ного метилоранжа для поглощения аммиака, через слой натронной извести для поглощения следов углекислоты и через баритовый раствор с несколькими каплями 0,5 %-ного фенолфталеина.

2.2. Распределение главных ионов в прибрежных районах

2.2.1. Рукав Быстрый—море (рис. 2)

Хлорность. В период наблюдений (1968—1971), охватывавший все четыре сезона года, хлорность изменялась в пределах 39—10 525 мг/л. Воды,

Таблица 1

Материалы наблюдений за главными ионами подразделений Госгидромета СССР

Период наблюдений		Подразделение	Район наблюдений	Количество проб
		Главные ионы в прибрежных районах		
1964	Март, июль, август	БГМО ЧАМ (СО ГОИН)	Севастополь	11
	Лето, осень	МГС «Туапсе»	Туапсе	22
	Зима, лето		Сочи	22
	Зима, лето		Сухуми	19
	Зима, лето		Поти	20
	Зима		Батуми	10
	Лето, осень		Новороссийск	24
	Лето	МГС «Ялта»	Феодосия	4
1965	Январь — февраль, март, апрель, август	БГМО ЧАМ	Севастополь	61
	Зима, весна, лето, осень	МГС «Ялта»	Ялта	61
	Зима, весна, лето		Феодосия	29
	Весна, осень	МГС «Туапсе»	Новороссийск	25
	Весна, осень		Туапсе	21
	Весна, осень		Сочи	24
	Весна, осень		Сухуми	31
	Весна, осень		Поти	45
	Весна, осень		Батуми	36
1966	Март, апрель июль, декабрь	БГМО ЧАМ	Севастополь	40
	Зима, весна	МГС «Туапсе»	Туапсе	38
	Зима, весна		Сочи	38
	Зима, весна		Сухуми	28
	Зима, весна		Поти	42
	Зима, весна, осень		Батуми	35
1967	Март, апрель	БГМО ЧАМ	Севастополь	33
	Апрель, май	МГС «Одесса»	Сухой лиман, Одесса	48
	Весна	МГС «Ялта»	Ялта	10
	Весна		Феодосия	13
	Зима, весна, лето	МГО «Туапсе»	Новороссийск	24
	Зима, весна, лето		Туапсе	40
	Весна, лето, зима		Сочи	22
	Весна, лето, зима		Сухуми	30
	Лето, зима, весна		Поти	24
	Зима, весна, лето		Батуми	40
1968	Июль — август	БГМО ЧАМ	Севастополь	30
	Январь, февраль, май, июль, ноябрь	Дунайская ГМО	Разрез рукав Быстрый — море	118
	Лето	МГС «Ялта»	Феодосия	18
1969	Январь, март, май, ноябрь, декабрь	БГМО ЧАМ	Севастополь	86
	Май, июнь, август, ноябрь	Дунайская ГМО	Разрез рукав Быстрый — море	116
	Май, июль, август, декабрь	МГС «Одесса»	Сухой лиман, Одесса	64
	Лето, осень	МГО «Туапсе»	Новороссийск	8
	Лето, осень		Туапсе	31
	Лето, осень		Сочи	34
	Зима, весна, осень	МГС «Ялта»	Феодосия	49
1970	Январь, март, октябрь	БГМО ЧАМ	Севастополь	69
	Май, июль, сентябрь, ноябрь	Дунайская ГМО	Разрез рукав Быстрый — море	132
1970	Июль, август	МГС «Одесса»	Сухой лиман, Одесса	26
	Зима, весна, осень	МГС «Туапсе»	Новороссийск	32
	Зима, весна, лето, осень		Туапсе	59
	Зима, весна, лето, осень		Сочи	42
	Зима, осень	МГС «Ялта»	Феодосия	34
1971	Май, июнь, август, ноябрь	Дунайская ГМО	Разрез рукав Быстрый — море	132
		Главные ионы в открытых районах		
1978	Ноябрь	СО ГОИН	Западная часть открытого моря	61
1983	Март, июль, ноябрь	СО ГОИН	Открытое море	65
1985	Январь — февраль	СО ГОИН	Открытое море	31
1986	Лето	СО ГОИН	Открытое море	94
		Карбонатная щелочность в прибрежных районах		
1957	Апрель	МГС «Туапсе»	Туапсе	53
1959	Июль, сентябрь	БГМО ЧАМ	Разрез м. Херсонес — пр. Босфор, Керченский пролив	30
	Апрель, июнь, октябрь, ноябрь	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	93
	Апрель, май, июнь, июль, октябрь, декабрь	МГС «Туапсе»	Поти, Туапсе	334
1960	Февраль, июнь, июль, сентябрь, октябрь	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	134
	Февраль, апрель, июнь, август, сентябрь, октябрь, декабрь	МГС «Туапсе»	Геленджик	128
	Апрель, декабрь	МГС «Ялта»	Ялта	251

Период наблюдений		Подразделение	Район наблюдений	Количество проб
1960	Май	БГМО ЧАМ	м. Херсонес — пр. Босфор; пр. Босфор — Синоп, Синоп — Керченский пролив	200
	Февраль, март, апрель, июнь, июль, август, ноябрь	МГС «Туапсе»	Поти и Сочи	100
1961	Март, май, август	БГМО ЧАМ	Разрез м. Херсонес — пр. Босфор, Синоп — Керченский пролив	61
	Январь, апрель, август, октябрь, ноябрь	МГС «Ялта»	Ялта, Алушта	200
	Январь, август, октябрь, ноябрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	654
	Январь — февраль, апрель — август, октябрь	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	116
1962	Июль — август, ноябрь, декабрь	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	50
	Январь, ноябрь	БГМО ЧАМ	м. Херсонес, Ялта	147
	Январь, февраль, апрель, май, июнь, август — ноябрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	605
	Январь, февраль, август	МГС «Ялта»	Ялта	159
	Январь, февраль, май, июнь, август, декабрь	ДГМО	Северо-западный район моря	281
1963	Январь, март — октябрь	МГС «Одесса»	Сухой лиман, Одесса	358
	Февраль — август, ноябрь	СО ГОИН	Керченский пролив, Ялта	250
	Апрель — октябрь, декабрь	МГС «Туапсе»	м. Кодош, Туапсе, Батуми	626
	Май, август, ноябрь	БГМО ЧАМ	разрез м. Херсонес — пр. Босфор	221
1964	Июнь — август	ДГМО	Северо-западный район моря	220
	Апрель, май, июль — ноябрь	МГС «Одесса»	Одесса, Каркинитский залив	296
	Май, август, сентябрь — ноябрь	БГМО ЧАМ	Прибосфорский район	782
	Март — октябрь	МГС «Туапсе»	Новороссийск, Туапсе, м. Кодош	301
1965	Февраль	БГМО ЧАМ	Прибосфорский район	487
	Все сезоны	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	586
	Июль — август, октябрь, ноябрь	ГМО «Одесса»	Северо-западный район моря	105
	Апрель, май, август, ноябрь	БГМО ЧАМ	Ялта, Севастополь	183
	Январь, апрель, ноябрь, декабрь	ГМО «Феодосия»	Феодосия	105
	Январь, март — май, август, ноябрь	МГС «Ялта»	Ялта	55
1966	Январь — апрель, октябрь — декабрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	583
	Май — сентябрь, ноябрь	ГМО «Одесса»	Северо-западный район моря	144
	Ноябрь	МГС «Ялта»	Разрез Ялта — море	200
	Март — май	БГМО ЧАМ	Крым	200
	Июль — декабрь	ГМО «Феодосия»	Феодосия	172
	Август	МГС «Опасное»	Керченский пролив	37
1967	Февраль — май, август — октябрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	330
	Апрель — июнь, август ноябрь	ГМО «Одесса»	Северо-западный район	395
	Август	ГМО «Феодосия»	Феодосия	98
	Март, май, август	БГМО ЧАМ	Крым	319
1968	Январь, февраль, июль — декабрь	БГМО ЧАМ	Феодосия, Ялта, м. Херсонес — пр. Босфор	78
				615
			Кавказское побережье	160
	Май, август	МГС «Опасное»	Керченский пролив	50
	Январь, февраль, май, август, ноябрь	ДГМО	Северо-западный район моря	80
1969	Январь, май, август, сентябрь, ноябрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	100
	Май — август, ноябрь, декабрь	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	220
	Август, октябрь, ноябрь	ДГМО	Рукав Быстрый, Цареградское гирло	98
	Август, ноябрь	МГС «Опасное»	Керченский пролив	62
	Январь — декабрь	БГМО ЧАМ	Кавказское побережье, Ялта, Феодосия, м. Херсонес — Босфор	1000
1970	Январь, март, май — июль, сентябрь, ноябрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	116
	Август, ноябрь	МГС «Опасное»	Керченский пролив	50
	Январь, март, май, июль, октябрь	МГС «Ялта»	Ялта	80
	Май, июль, декабрь	ДГМО	Северо-западный район моря	180
	Декабрь	МГС «Одесса»		
	Январь, март, май, август, октябрь — декабрь	БГМО ЧАМ	Крым	835
1971	Апрель — декабрь	МГС «Батуми», МГС «Туапсе»	Батуми, Туапсе, Сочи	253
	Январь, май, июль, октябрь, ноябрь	МГС «Ялта»	Ялта	527
	Май — ноябрь	МГС «Одесса», ДГМО	Северо-западный район	703
	Июль, сентябрь	ЛЮМ ГОИН	Севастополь, разрез м. Херсонес — прол. Босфор	372
	Август, ноябрь	МГС «Опасное»	м. Такиль — море	236
1972	Февраль, март — июль, октябрь, ноябрь	ЛЮМ ГОИН	Севастополь, м. Херсонес — прол. Босфор	417
			Ялта, Каркинитский залив	

Период наблюдений		Подразделение	Район наблюдений	Количество проб
1972	Февраль, июнь, август — октябрь	МГС «Ялта»	Крым	608
	Май, июль, октябрь, ноябрь	ДГМО	Северо-западный район моря	98
	Январь — март, май — ноябрь	МГС «Туапсе»	Туапсе, Новороссийск	373
1973	Октябрь — ноябрь	СО ГОИН	Все море	293
	Январь — ноябрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	393
	Февраль, май, июль, август, октябрь	МГС «Ялта»	Ялта	505
1974	Февраль, июль, июнь, ноябрь	ДГМО	Северо-западный район моря	602
			Сухой лиман, Одесса, Каркинитский залив	795
	Май — ноябрь	МГС «Одесса»		
	Январь — декабрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	198
	Январь — апрель, июль — декабрь	МГС «Ялта»	Ялта	308
	Январь, февраль	СО ГОИН	Все море	449
	Апрель	ОдО ГОИН	Все море	297
1975	Январь — май, июль, август, ноябрь	МГС «Ялта»	Ялта, Гурзуфский залив, Алупка	154
	Январь — декабрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	313
	Январь, ноябрь	ДГМО	Северо-западный район моря	277
	Июль, август, сентябрь, октябрь	МГС «Одесса»		
1976	Май — сентябрь, ноябрь, декабрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	947
	Январь — июнь	МГС «Ялта»	Ялта, Гурзуфский залив	277
	Май — август, октябрь, ноябрь	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	356
	Май, август	ДГМО	Цареградское гирло, рукав Быстрый	350
1977	Июнь — август, сентябрь — ноябрь	ГМО «Батуми»	Батуми, Поти, Сухуми	301
	Апрель — декабрь	МГС «Туапсе»	Туапсе, Сочи, Новороссийск	865
	Апрель — ноябрь	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	440
1978	Март — август	ГМО «Батуми»	Поти	49
	Январь — декабрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	1155
1979	Январь — декабрь	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	618
	Апрель, май	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	40
1980	Январь — декабрь	МГС «Туапсе»	Анапа	744
1981	Январь — декабрь	МГС «Ялта»	Ялта	128
	Апрель	МГС «Одесса»	Северо-западный район моря	18
1982	Январь	МГС «Ялта»	Ялта	124
	Январь — декабрь	СО ГОИН	Севастополь	70
	Апрель — ноябрь	МГС «Одесса», СО ГОИН, ДГМО	Западный район моря	1502

находящиеся под влиянием стока дунайских вод (ст. 1а, 1б), имеют низкие значения хлорности.

Весной (1968, 1969, 1970, 1971) на прибрежных станциях изменение хлорности наблюдалось в пределах 1172—3486,5 мг/л на поверхности и 1720—4394 мг/л в придонных водах. Наименьшее содержание (39 мг/л) наблюдалось на поверхности весной 1970 г., в то время как на мористых станциях хлорность достигала 10 063 мг/л (ст. 6) на поверхности и 11 128 мг/л (ст. 6) в придонных водах.

Летом (1968, 1969, 1970) неравномерность распределения хлорности прослеживается до ст. 4 (1660—8828 мг/л на поверхности и 6057—10 171 мг/л у дна). На ст. 6 и 7 значения хлорности стабилизируются, достигая в среднем 8813,5 мг/л на поверхности и 10 179 мг/л у дна.

Осенью (1968, 1969, 1970, 1971) хлорность по всему разрезу достигала 3542—10 606 мг/л на поверхности и 9964—10 273 мг/л в придонном горизонте. Исключение составляет 1968 г., где на поверхности на прибрежных станциях хлорность была 160—300 мг/л.

Зимой (1967, 1968) средние значения хлорности составляли 5650,5—10 215 мг/л на поверхности и 8087,5—10 267 мг/л у дна.

Гидрокарбонаты. В среднем на поверхности концентрации гидрокарбонат-ионов изменялись в пределах 161,99—193,13 мг/л, достигая максимума на мелководных прибрежных станциях (1а, 1б). Максимум (204 мг/л) наблюдался на ст. 1а. На глубоководных станциях (4, 5, 6) в придонных слоях содержание гидрокарбонатных ионов меньше, чем на поверхности, и составляет примерно 160 мг/л. На промежуточном (5 м) и придонном горизонтах в среднем концентрация гидрокарбонатов 160—165 мг/л.

Весной (1968, 1969, 1970, 1971) среднее содержание гидрокарбонатных ионов на поверхности вдоль разреза изменяется монотонно от 128 до 159 мг/л. Максимум концентраций (185 мг/л) наблюдался на прибрежной станции 1б. На глубоководных станциях (4, 5, 6) в придонных слоях также наблюдалась монотонность увеличения содержания гидрокарбонатов вдоль разреза 165—187 мг/л).

Летом (1970) средняя концентрация гидрокарбонат-ионов на поверхности 135—144 и в придонных слоях — 141—171 мг/л.

Осенью (1968, 1969, 1970, 1971) вдоль разреза также наблюдалось аналогичное распределение гидрокарбонат-ионов: у дна 168—198 мг/л и на поверхности 124—158 мг/л.

Кальций и магний. Изменение содержания кальция зимой вдоль разреза от ст. 2 до ст. 7 характеризуется средними значениями 217—252 мг/л на поверхности и 235—252 мг/л у дна. Значительные колебания в содержании кальция наблюдались на ст. 1а, 1б (117—217 мг/л). Средние значения концентраций кальция весной на поверхности колебались в пределах 128—238 мг/л по разрезу.

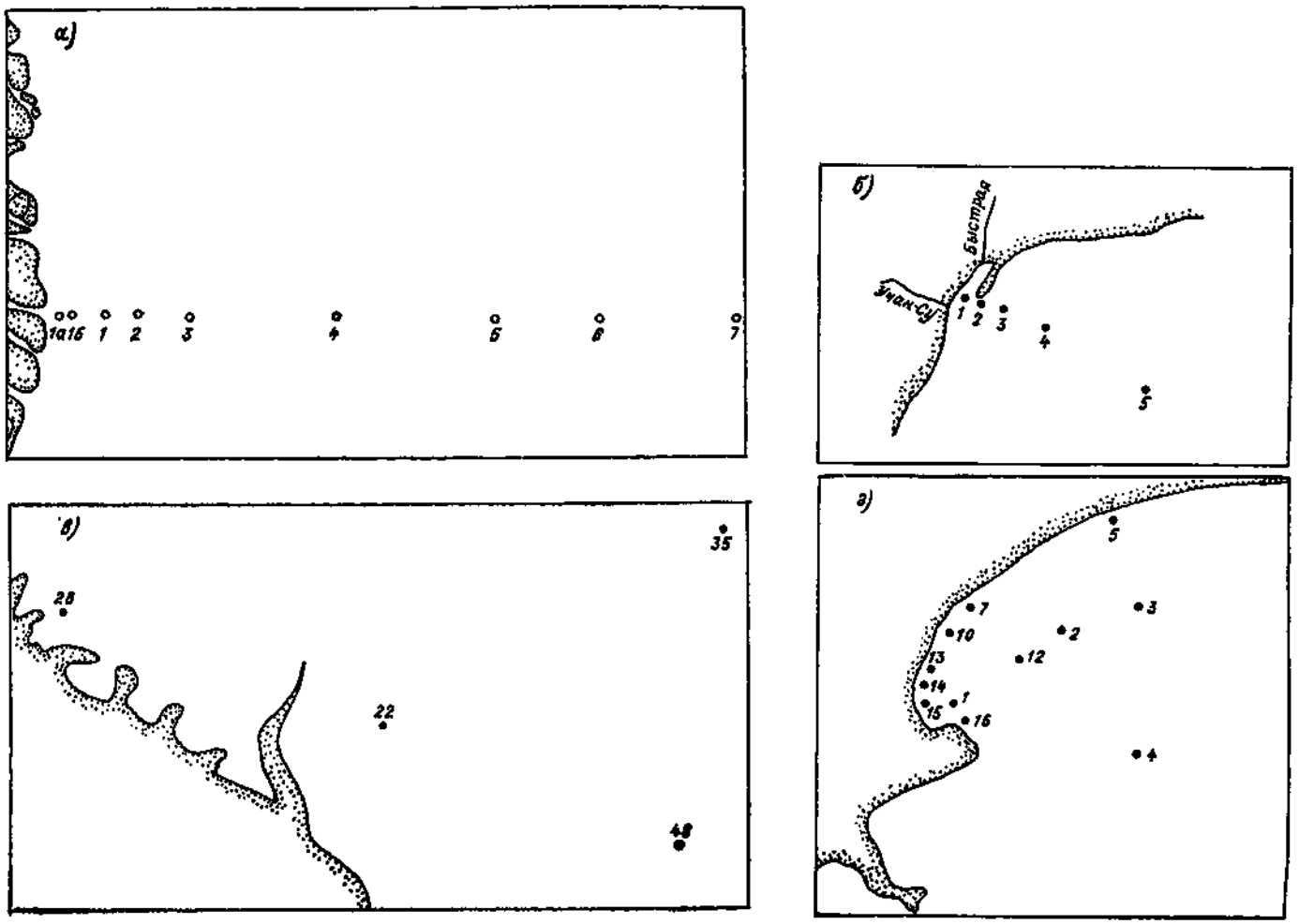

Рис. 2. Схемы расположения и номера станций в прибрежных районах западной части моря.
а — рукав Быстрый — море, *б* — Ялтинский залив, *в* — Одесский, *г* — Феодосийский.

Летом и осенью содержание кальция на прибрежных станциях имело значительную изменчивость: 67—244 мг/л, а в придонном горизонте (осень 1971) достигало 574 мг/л.

Зимой среднее содержание магния на поверхности колебалось в пределах 406—693 мг/л. Минимальные значения его концентрации (156 мг/л) наблюдались на ст. 1а. На промежуточном горизонте (5 м) и у дна содержание магния распределялось монотонно по всем станциям в интервале 571—693 мг/л.

Весной (1969—1971) среднее содержание магния на поверхности было несколько меньше и колебалось в пределах 223—414 мг/л.

Средние значения концентраций магния в летнее время на поверхности колеблются в пределах 300—580 мг/л и в придонных водах 459—615 мг/л. Минимальные значения на поверхности 235—547 мг/л и максимальные — 365—613 мг/л. В придонных водах предел изменения среднего содержания магния 459—615 мг/л.

Осенью (1968—1971) наблюдается меньшее содержание магния на ст. 1а, 1б, достигая минимума 40 мг/л. Постоянство концентраций магния начинается с глубоководных станций 3, 4, 5, 6, 7 как на поверхности, так и у дна, достигая максимума на ст. 7 (699 мг/л).

Сумма ионов натрия и калия. Содержание щелочных металлов варьирует зимой в пределах 3106—6315 мг/л на поверхности и 4950—6346 мг/л в придонном горизонте. Минимальные значения (1180 мг/л) наблюдаются на прибрежных станциях, имеющих приток пресных дунайских вод.

Сульфат-ионы (1968—1971). Низкое содержание сульфат-ионов по средним значениям наблюдается на поверхности до ст. 2. Наиболее высокие концентрации сульфат-ионов наблюдались на ст. 7 (1400—1587 мг/л). На прибрежных станциях содержание сульфат-ионов изменяется в широких пределах (80—450 мг/л).

Весной (1970, 1971) средние концентрации сульфат-ионов составляли: на поверхности 795—1367 мг/л и у дна 865—1427 мг/л по профилю разреза, а в летний период на поверхности от 550 до 1256 мг/л.

Осенью (1968) содержания сульфат-ионов на разрезе изменялись от 80 до 1399 мг/л на поверхности и от 1328 до 1481 мг/л у дна.

2.2.2. Сухой лиман

Хлорность (1967, 1969, 1970). Ее содержание лежало в пределах 7344—8798 мг/л. Низкие значения хлорности (7344—7692 мг/л) наблюдались на поверхности осенью 1969 г.

Кальций и магний. Исследования, проведенные весной 1967 и 1969 гг. и летом 1969 и 1970 гг., показали следующее. Весной средние концентрации кальция на поверхности 216—241 мг/л и у дна 213—245 мг/л. Летом равномерное распределение

кальция как по акватории, так и на станциях открытого моря аналогично весеннему. Поверхностные воды в среднем содержат 214—281 мг/л и придонные — 197—225 мг/л.

Содержание магния весной в среднем изменялось в пределах 481—581 мг/л и летом — 532—553 мг/л на поверхности и 440—547 мг/л у дна.

Сумма ионов натрия и калия. Весной содержание щелочных металлов изменяется в пределах 4981—5578 мг/л на поверхности и 5193—6044 мг/л у дна. Летом среднее содержание щелочных металлов близко к весеннему и составляет 4791—5007 мг/л на поверхности и 4870—6306 мг/л в придонных водах.

Гидрокарбонаты. Весной, летом и осенью их содержание составляло 115—158 мг/л на поверхности и 141—187 мг/л у дна. Сезонные различия незначительны.

Сульфат-ионы. Средние значения содержания сульфат-ионов весной 890—1254 мг/л и 1213—1452 мг/л летом.

2.2.3. Одесский залив (см. рис. 2)

Исследования выполнены в весенне-осенний периоды 1967, 1969 и 1970 гг.

Хлорность. Весной на поверхностные воды оказывает влияние сток пресных вод. Концентрации составляли в поверхностном слое вод 2246—5542 мг/л и 7983—9586 мг/л в придонных слоях. Осенью возрастание хлорности наблюдается на станциях 22, 18, 35 как в поверхностном (8652—9675 мг/л), так и в придонном слоях (8958—9367 мг/л), по данным 1969 г.

Кальций и магний. Средние значения концентрации кальция весной на поверхности 233—275 мг/л и 266—375 мг/л у дна. В летний сезон — 212—223 мг/л на поверхности, 227—235 мг/л у дна. В осенний сезон — 216—248 мг/л на поверхности и 224—261 мг/л у дна.

Для распределения магния свойственны те же особенности, что и для кальция. Минимальное содержание наблюдалось летом на станциях 18, 22, 28, 35 (502—509 мг/л на поверхности и 498—502 мг/л у дна). Весной (1967) отмечено высокое содержание магния (77 мг/л и 103 мгл) на ст. 22 и 35 соответственно. Интервал изменения содержания 379—484 мг/л. Осенью изменения содержания магния по профилю станций 531—580 мг/л.

Сумма ионов натрия и калия. Весной, летом и осенью сумма щелочных катионов распределена по акватории залива в соответствии с хлорностью. Весной (1967) минимальное содержание наблюдалось на поверхности на ст. 22 (1979 мг/л). Интервал изменения содержания щелочных металлов по всем станциям залива во все сезоны года 4900—6248 мг/л.

Гидрокарбонаты. Весной, летом и осенью имеются незначительные сезонные различия в их средних концентрациях, которые колеблются в пределах 133—169 мг/л. Минимальные значения наблюдались на поверхности ст. 35 (101—127 мг/л).

Сульфат-ионы. Их средние концентрации лежат в пределах 1000—1400 мгл. Минимальное содержание — на поверхности ст. 22 и 28 и максимальное (1400 мг/л) — в придонном горизонте весной

2.2.4. Ялтинский залив (1965, 1967) (см. рис. 2)

Хлорность. Содержание хлорид-иона сравнительно постоянно и лежит в пределах 8795—10594 мгл. Речки Учан-су и Быстрая существенного влияния не оказывают.

Гидрокарбонаты. Содержание гидрокарбонатов летом в пределах 198—200 мг/л на поверхности и 199—202 мг/л у дна (1965). Зимой (1965) — 139—155 мг/л на поверхности и 155—159 мг/л у дна.

Кальций и магний. Во все сезоны года содержание кальция отличается сравнительным постоянством в пределах 217—269 мг/л.

Содержание магния в пределах 592—756 мг/л.

Сумма ионов натрия и калия. В среднем концентрация $Na^+ + K^+$ 7040 мг/л. Распределение этих катионов по акватории залива и по сезонам года отличается однородностью.

Сульфат-ионы. Изменения содержания сульфат-ионов от 1295 до 2139 мг/л.

2.2.5. Феодосийский залив (см. рис. 2)

Хлорность. Вследствие расположения большинства станций в прибрежной зоне (станции 1, 15, 14, 13, 10, 7, 8) более низкое содержание хлорид-иона наблюдалось на поверхностном горизонте (8527—9809 мг/л). Этому способствует рельеф местности вокруг залива, который определяет большой материковый сток (весна 1969, 1967 гг.). На глубоководных станциях (4, 3, 2) содержание хлорности в придонных горизонтах выше, чем на поверхности, и лежит в интервале 10129—10181 мг/л во все сезоны года.

Гидрокарбонаты. Концентрации ионов довольно равномерно распределены по акватории залива. Резких различий между сезонами года не наблюдается. Станция 4, удаленная от береговой линии, отличается постоянством содержания гидрокарбонат-ионов. Пределы изменения концентрации гидрокарбонат-ионов на ст. 4 144—162 мг/л. Поверхностные и придонные воды резких различий в содержании этих ионов не имели. Интервал изменений 129—161 мг/л на поверхности, 145—179 мг/л у дна.

Кальций и магний. Интервал изменения содержания кальция 178—260 мг/л. Минимум его концентрации наблюдался весной 1966 г. О содержании в придонных водах дают представление станции 4, 3, 2, 12. Концентрации кальция в придонных водах по данным станций 2, 3, 4, 12 лежали в пределах 247—257 мг/л.

Минимальное содержание магния наблюдалось на поверхности зимой 1965 г. (185—207 мг/л) при среднем содержании 635—738 мг/л. Высокими значениями содержания магния отличаются поверхностные воды осенью 1970 г. (710—732 мг/л). В водах придонного горизонта по данным станций 2, 3, 4, 12 его содержание 715—718 мг/л.

Сумма ионов натрия и калия. На поверхности концентрация суммы этих металлов изменялась в интервале 5887—6066 мг/л, а летом 1965 г. — 5995—6012 мг/л. В другие сезоны года содержание суммы катионов по всей толще воды не превышало 6421 мг/л.

Сульфат-ионы. Сезонные различия в содержании сульфат-ионов незначительны и в основном колебались в пределах 1235—1500 мг/л. Придонные слои характеризовались концентрациями SO_4^{2-} 1375—1450 мг/л (станции 2, 3, 4, 12).

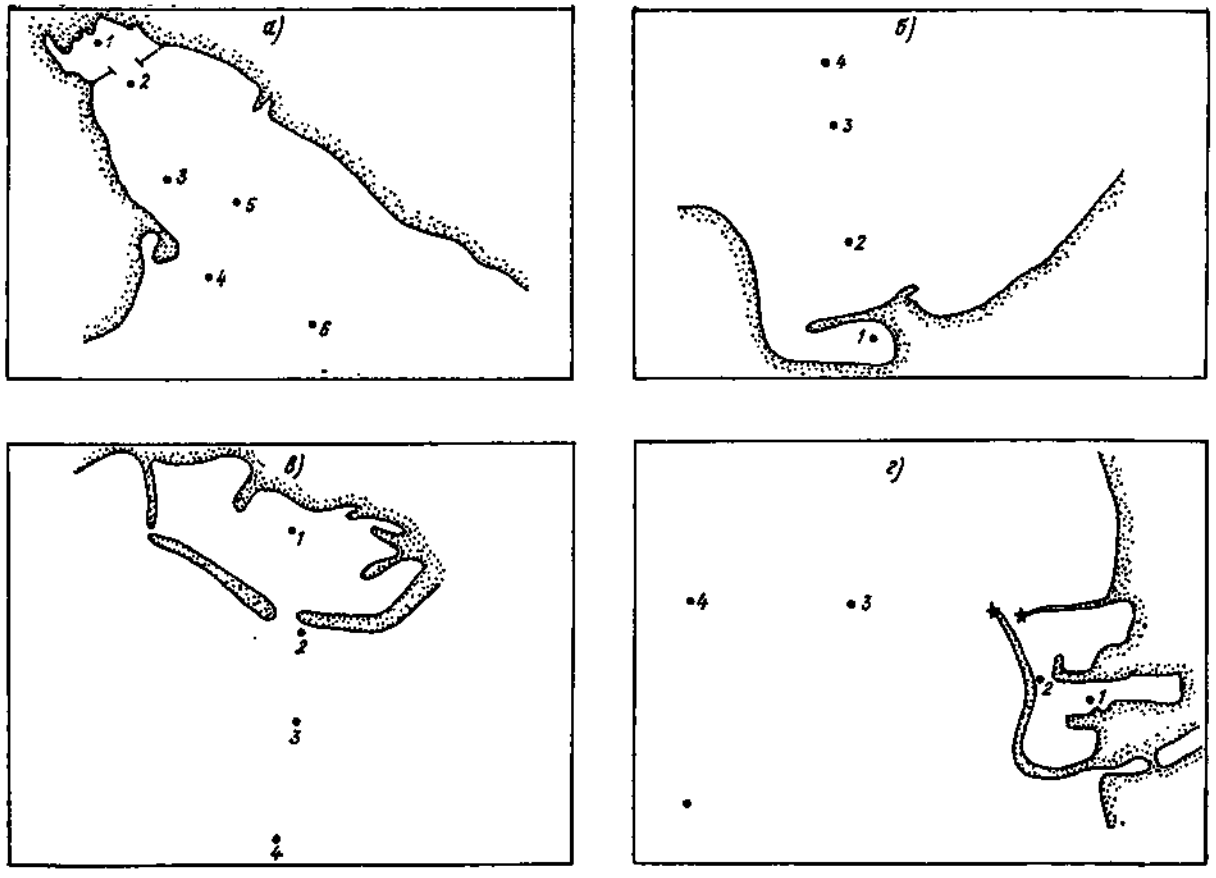

Рис. 3. Схемы расположения и номера станций в прибрежных районах восточной части моря.
а — Новороссийская бухта; *б* — район п. Сухуми; *в* — район п. Туапсе; *г* — район п. Поти.

2.2.6. Новороссийская бухта (рис. 3)

Исследования проведены в 1964—1966 и 1970 гг.

Хлорность. Во все исследованные сезоны содержание хлорности было ниже на поверхности и составляло 9900—10 046 мг/л. Только осенью 1965 г. на станциях 3, 4, 5, 6 хлорность распределялась равномерно по всем горизонтам и лежала в пределах 10 190—10 280 мг/л.

Гидрокарбонаты. Зимой содержание гидрокарбонатных ионов изменялось в пределах 165—180 мг/л на поверхности и 161—176 мг/л в придонных слоях. Весной средние значения изменялись от 146 до 159 мг/л на поверхности и от 147 до 168 мг/л у дна. В летний сезон концентрации 148—150 мг/л на поверхности и 152—162 мг/л в придонном слое, а осенью — 143—153 мг/л на поверхности и 146—163 мг/л в придонном горизонте.

Кальций и магний. Концентрации кальция лежат в пределах 200—330 мг/л на поверхности и 213—409 мг/л у дна. Сезонные изменения незначительны.

Увеличенное содержание магния наблюдалось весной и осенью 1966 г. как в поверхностном, так и придонном горизонтах (818—915 мг/л). Наблюдается неравномерное распределение магния как по сезонам, так и по акватории бухты. Интервал изменения содержания составлял 378—883 мг/л.

2.2.7. Туапсинская бухта (см. рис. 3)

Исследования выполнены в 1965—1966 и 1970 гг.

Хлорность. Весной распределение хлорности на поверхности по акватории бухты было равномерным, и только на ст. 4, расположенной мористее, наблюдалось увеличение хлорности в придонных горизонтах в интервале 9758—10 457 мг/л. Поверхность характеризуется значениями 7752—10 251 мг/л.

Гидрокарбонаты. Зимой, весной и летом концентрации гидрокарбонатов изменялись в пределах 113—164 мг/л. Наименьшее содержание как в поверхностном, так и в придонном слоях наблюдалось зимой (1966) 111—113 мг/л. Постоянство их содержания наблюдалось на ст. 4.

Кальций и магний. Зимой среднее содержание кальция варьирует в пределах 199—275 мг/л на поверхности и 182—319 мг/л у дна, а весной — 241—350 мг/л на поверхности и 253—362 мг/л у дна. Осенью 1966 г. содержание кальция достигало наибольших значений как на поверхности, так и у дна (304—362 мг/л). Лето характеризуется более постоянными средними концентрациями кальция как на поверхности, так и у дна (265—245 мг/л).

Весной на поверхности на ст. 1 содержание магния достигало 1146 мг/л. В летнее время содержание магния достигает значений, свойственных его значениям у дна (722 мг/л). Осенью 1966 г. было повышенное содержание магния по сравнению с летом на поверхности и у дна (739—757 мг/л), и осенью 1969 г. на станциях 3 и 4 содержание магния изменялось в пределах 382—444 мг/л.

2.2.8. Порт Сочи

Хлорность. На поверхности хлорность характеризуется следующими значениями: зимой —

9563—9882, весной — 9204—9420, осенью — 9707—10097 мг/л.

Кальций и магний. Интервал изменения содержания кальция за все сезоны года 176—424 мг/л. Изменение содержания магния имеет те же особенности, что и изменение содержания кальция, и составляет 358—1005 мг/л.

Гидрокарбонаты. Их концентрации распределяются по сезонам года и акватории порта в интервале 110—168 мг/л.

2.2.9. Порт Сухуми (см. рис. 3)

Хлорность. На поверхности и промежуточных горизонтах (10 м) содержание хлорности в 1966 г. весной составляло 4680—6142 мг/л, придонном и промежуточном (5 м) — 8702—10149 мг/л (ст. 1). Изменение содержания хлорности на ст. 2 от 7496 мг/л на поверхности до 11765 мг/л в придонном горизонте.

Высокое содержание хлорности (10015 мг/л) наблюдалось с глубины 30 м. Весной 1966 г. содержание хлорности на поверхности варьировало в пределах 4589—6426 мг/л. Летом (1964) содержание хлорности на поверхности составило 9348—9892 мг/л, у дна — 10036—10046 мг/л. Максимальные значения на поверхности 10097 мг/л и минимальные — 9635 мг/л, а в придонном — 10025 мг/л осенью 1965 г.

Гидрокарбонаты. Гидрокарбонатные ионы содержались в пределах 120—155 мг/л.

Кальций и магний. Содержание кальция исследовалось зимой 1966, 1967 гг., весной 1966, 1967 гг., летом 1967 г. Сезонные различия в его содержании незначительны и только весной 1967 г. наблюдалась разница между поверхностью и дном (199—295 мг/л, 373—377 мг/л).

В распределении содержания магния наблюдались те же особенности, что и у кальция. Например, весной 1967 г. различия в его содержании на поверхности и у дна — 321—579 мг/л (поверхность), 641—703 мг/л (дно). Средние значения концентраций магния в летний сезон: 463—475 мг/л (поверхность), 502—519 мг/л (дно).

2.2.10. Порт Поти (см. рис. 3)

Хлорность. Зимой на поверхности хлорность изменяется в пределах 9226—9933 мг/л и 9748—10025 мг/л у дна. На ст. 1 и 2 хлорность весной (1965) 7068—7231 мг/л, а в придонных водах — 9635—10282 мг/л (станции 2, 3, 4). Осенью среднее значение хлорности на поверхности 7982—9820 мг/л, у дна — 9779—10066 мг/л, летом (1964) 8702—9174 мг/л на поверхности, 9184—9512 мг/л у дна.

Гидрокарбонаты. Концентрация гидрокарбонатионов 132—180 мг/л.

Кальций и магний. Изменение средних концентраций кальция составляло 220—258 мг/л.

Концентрация магния: 670—728 мг/л на поверхности, 704—742 мг/л у дна.

2.2.11. Батумская бухта

Хлорность. Зимой (1964, 1966) хлорность на поверхности 8477—9174 мг/л и у дна 8416—10025 мг/л, а весной (1965, 1966) — 8825—9297 мг/л на поверхности и 9194—10344 мг/л у дна. В летний сезон хлорность равнялась 8293—9163 мг/л на поверхности и 8631—9840 мг/л у дна. Осенью 1965 г. средние значения хлорности составили 9881—10066 мг/л на поверхности и 9953 мг/л у дна.

Гидрокарбонаты. Зимой (1966) содержание гидрокарбонат-ионов ниже как на поверхности, так и у дна (111—118 и 111—119 мг/л соответственно). В остальные сезоны содержание гидрокарбонатионов колебалось в пределах 132—144 мг/л. Осенью средние концентрации 134—145 мг/л на поверхности и 139—147 мг/л у дна.

Кальций и магний. Содержание кальция довольно равномерно распределено по акватории и сезонам года. Только зимой 1967 г. содержание кальция уменьшалось до 166—204 мг/л на поверхности и 176—236 мг/л у дна. Летом средние концентрации кальция 270—292 мг/л на поверхности и 292—314 мг/л у дна.

Содержание магния зимой (1964) изменялось в пределах 338—686 мг/л. В остальные сезоны концентрации магния более равномерно распределяются по сезонам и по акватории. Наиболее ровное распределение наблюдается осенью (1966): 650—750 мг/л на поверхности и 642—701 мг/л у дна.

2.3. Распределение сульфат-ионов в водах открытой акватории

Карта изученности распределения ионов SO_4^{2-} (с 1952 г.) представлена на рис. 4, цифровые данные — в табл. 2, 3.

В слое 0—0,5 м значения SO_4^{2-}/Cl изменялись как по акватории моря, так и во времени на ряде

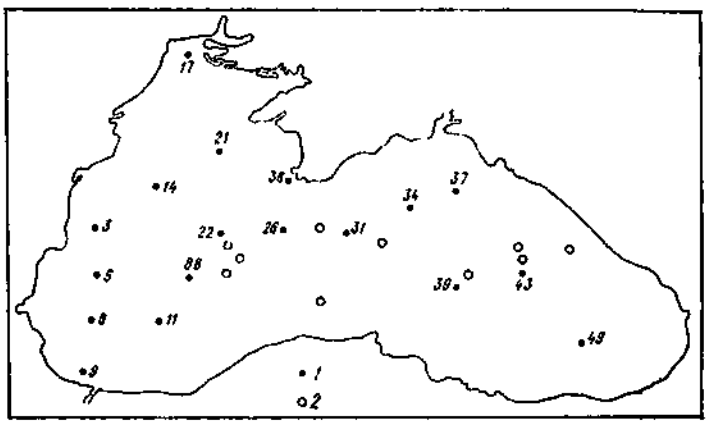

Рис. 4. Карта изученности главных ионов в открытых водах Черного моря и номера станций.

Сульфат-ионы: станции 3в и 8в — январь 1983 г.: 9, 11, 17, 22, 31, 39 и 49 — март 1983 г.; 5, 9, 11, 14, 21, 22, 26, 31, 34, 37, 39, 43 и 49 — июль 1983 г.; 26, 31, 34, 37, 39, 43 и 49 — ноябрь 1983 г.; 3, 5, 9, 11, 17, 21, 22, 26, 37, 39, 43 и 49 — январь — февраль 1985 г. (*1* — станции 1983 г. и позже; *2* — станции до 1983 г).

Ионы магния и кальция: номера станций в табл. 2, 3, 6, 7.

Ионы калия, брома, стронция: номера станций в табл. 8.

станций, в том числе на станциях глубоководных областей (9, 11, 26, 31, 37, 39, 49). Например, отношение SO_4^{2-}/Cl увеличилось на ст. 31 на 0,009 с марта к ноябрю, а на станциях 49, 37 и 26 уменьшилось на 0,004—0,005 с ноября 1983 г. к январю 1985 г., на ст. 11 — на 0,009 с июля 1983 г.

Таблица 2

Значения концентраций SO_4^{2-} и их отношений к хлорности

Номер станции (рис. 4)	Горизонт, м	$[SO_4^{2-}]$ ‰ (по массе)		$[SO_4^{2-}]/Cl$	
		1983 г.	1985 г.	1983 г.	1985 г.
3	0—0,5	1,3576	1,2619	0,1342	0,1323
	100	1,4206	1,3109	0,1318	0,1284
	550	1,5909	—	0,1317	—
5	0—0,5	1,3093	—	0,1296	—
	100	1,4457	—	0,1282	—
	1650	1,5237	—	0,1229	—
8	0—0,5	1,3218	—	0,1349	—
	100	1,4844	—	0,1292	—
	500	1,5662	—	0,1279	—
9	0—0,5	1,3341	1,4107	0,1352	0,1406
	100	1,4862	1,4430	0,1357	0,1290
11	0—0,5	1,3656	1,2962	0,1366	0,1290
	100	1,5242	1,4462	0,1365	0,1306
	2000	1,6182	—	0,1303	—
14	0—0,5	1,3145	—	0,1336	—
	93	1,4580	—	0,1330	—
17	0—0,5	1,1344	1,3315	0,1409	0,1419
	22	1,2199	1,3654	0,1325	0,1378
21	0—0,5	1,1709	1,3322	0,1351	0,1328
	57	1,3832	1,3379	0,1339	0,1331
22	0—0,5	1,3421	1,3239	0,1338	0,1319
	100	1,4797	1,4492	0,1306	0,1294
	1800	1,5774	1,5666	0,1273	0,1292
26	0—0,5	1,3455	1,3336	0,1337	0,1307
	100	1,5024	1,4606	0,1324	0,1305
31	0—0,5	1,3745	—	0,1360	—
	100	1,5358	—	0,1339	—
	1950	1,5891	—	0,1282	—
34	0—0,5	1,3418	—	0,1345	—
	100	1,4666	—	0,1341	—
	1630	1,5969	—	0,1283	—
37	0—0,5	1,3571	1,3280	0,1366	0,1337
	100	1,5293	1,5293	0,1349	0,1301
	1370	1,6182	1,6182	0,1307	0,1282
39	0—0,5	1,3697	1,3736	0,1359	0,1382
	100	1,5189	1,5651	0,1332	0,1391
	2000	1,6104	1,6699	0,1302	0,1353
43	0—0,5	1,3478	1,3113	0,1356	—
	100	1,5147	1,4623	0,1295	—
	2000	1,6087	1,5562	0,1302	—
49	0—0,5	1,3415	1,3079	0,1346	0,1311
	100	1,3967	1,4942	0,1334	0,1331
	2000	1,6107	1,5546	0,1299	0,1259

к январю 1985 г., на мелководной ст. 9 значение SO_4^{2-}/Cl увеличилось с июля 1983 г. к январю 1985 г. на 0,006. Можно отметить тенденцию к повышенным значениям SO_4^{2-}/Cl в поверхностных водах восточной части моря (на станциях 31, 39, 49 среднее значение 0,1345) по сравнению с западной частью (на станциях 3, 11, 22 среднее значение 0,1333). И в то же время содержание SO_4^{2-} в водах западной части моря несколько выше, если судить по тем же станциям (среднее 1,3580 ‰ по массе) по сравнению с восточной частью (1,3528 ‰ по массе).

Горизонт 100 м также характеризовался пространственной и на ряде станций временной изменчивостью SO_4^{2-}/Cl. Так, например, на станциях 31 и 34 наблюдалась максимальная изменчивость отношения SO_4^{2-}/Cl в период с июля к ноябрю (увеличение на 0,0147 и 0,0128 соответственно). На ст. 11 это отношение повысилось на 0,004 в период исследований 1983 г. и затем уменьшилось на 0,008 к январю 1985 г. Средние отношения SO_4^{2-}/Cl в западной и восточной частях моря в марте 1983 г., по данным на станциях 3, 11, 22 и 31, 39, 49, на глубине 100 м были одинаковы (0,1340 и 0,1336 соответственно). В этот период времени воды восточной части моря имели уже более высокое среднее содержание SO_4^{2-} по сравнению с водами западной части (1,4970 и 1,4807 ‰ по массе соответственно), по данным тех же станций.

На семи станциях в глубинных водах (ниже 1600 м) отношение SO_4^{2-}/Cl изменялось во времени на станциях 22, 37, 39, 43, 49. Тенденция к более высоким значениям SO_4^{2-}/Cl в водах восточной части моря (станции 31, 39, 49) по сравнению с западной частью (станции 3, 11, 22) наблюдалась на глубинах 550—2000 м в период исследований в марте 1983 г. Однако, как и в поверхностном слое воды, содержание SO_4^{2-} было более высоким в глубинных водах западной части моря (1,6016 ‰ по массе) по сравнению с водами во-

Таблица 3

Содержание ионов магния, кальция и сульфатов в июне 1987 г., ‰ (по массе)

Номер станции (рис. 4)	$[Mg^{2+}]$	$[Ca^{2+}]$	$[SO_4^{2-}]$	$[Mg^{2+}]$	$[Ca^{2+}]$	$[SO_4^{2-}]$	$[Mg^{2+}]$	$[Ca^{2+}]$	$[SO_4^{2-}]$	z м
	0—0,5 м			100 м			Придонный слой			
32	0,6995	0,2513	1,429	0,7687	0,2741	1,737	0,9072	0,3084	1,790	600
45	0,6891	0,2569	1,310	0,7410	0,2628	1,461	0,7895	0,2970	1,630	1400
4	0,6579	0,2399	1,274	—	—	—	0,7341	0,2627	1,450	75
9	0,7202	0,2627	1,507	—	—	—	0,7618	0,2742	1,711	100
10	0,7341	0,2627	1,474	0,8034	0,2856	1,578	—	—	—	—
19	0,6822	0,2970	1,472	—	—	—	0,7272	0,2627	1,543	30
21	0,7376	0,2856	1,509	—	—	—	0,7480	0,2856	1,659	50
20	0,7618	0,2627	1,565	—	—	—	0,7618	0,2741	1,611	20
16	0,4918	0,1884	1,006	—	—	—	0,6821	0,2513	1,440	15
57	—	—	—	0,7826	0,2741	1,632	0,7064	0,2627	1,747	1500
51	0,7341	0,2741	1,489	0,7549	0,2741	1,795	0,9072	0,2970	1,936	1500
47	0,7064	0,2627	1,477	0,7202	0,2741	1,475	0,8241	0,2856	1,817	1500
31	0,7687	0,2741	1,552	0,8518	0,3084	1,711	0,9211	0,3084	1,765	2000
61	0,7410	0,2741	1,524	0,7687	0,2856	1,505	0,9280	0,3084	1,779	50
60	0,7341	0,2627	1,464	0,7757	0,2856	1,733	0,8934	0,2970	1,798	250
69	0,8449	0,2856	1,543	—	0,2856	1,558	0,9003	0,2970	1,675	2000

Примечание. Анализы выполнены Л. В. Савиной.

сточной его части (1,5983‰ по массе). Различия в концентрациях ионов SO_4^{2-}, в том числе в глубинных водах западной части моря (станции 5, 11, 22), выявляются также по их средним значениям. Эти различия обусловливаются значительной изменчивостью концентраций SO_4^{2-} на фоне практически постоянных значений хлорности (12,38—12,41‰). Таким образом, пространственно-временная изменчивость отношения SO_4^{2-}/Cl по акватории моря на различных горизонтах, выявленная как по данным экспедиционных работ в 1983 и 1985 гг., так и по данным более ранних исследований [150], является характерной гидрохимической особенностью Черного моря. Различие в отношениях SO_4^{2-}/Cl между поверхностным горизонтом и глубинными водами (1650—2000 м) составляло на ряде станций 0,005—0,006 (станции 11, 49). Отношение SO_4^{2-}/Cl в слое 0—100 м уменьшалось с глубиной (на 0,001—0,008) на всех станциях за исключением станций 9, 11, 14 и 34. При этом следовые концентрации H_2S (<0,10 мг/л) наблюдались на горизонте 100 м только на станциях 5, 11, 26, 31, 37, 39 в отдельные периоды исследований. Очевидно, такая закономерность формируется не процессами сульфат-редукции, отсутствующими в слое 0—100 м аэробных вод. Нельзя также объяснить уменьшение отношения SO_4^{2-}/Cl с глубиной в сероводородной зоне моря только наличием процессов сульфат-редукции, так как количество H_2S в глубинных водах не эквивалентно относительному уменьшению концентраций SO_4^{2-} по вертикали, если принять, что весь H_2S в глубинных водах образуется из SO_4^{2-} [56].

Наличие относительного дефицита ионов SO_4^{2-} в глубинных водах по сравнению с поверхностными водами, если принимать отношение SO_4^{2-}/Cl постоянным, отмечалось ранее [151] независимо от причин возникновения H_2S. Объяснение этого факта существует в форме гипотез и предположений [151], поэтому требуются дальнейшие исследования, тем более, что источником поступления ионов SO_4^{2-} в глубинные воды моря является средиземноморская вода с высоким значением SO_4^{2-}/Cl (0,1396) через прол. Босфор. Можно, например, предположить, в частности, наличие в глубоководных районах источников субмаринной разгрузки вод, содержащих низкие значения SO_4^{2-}/Cl. Такая разгрузка должна составлять объем вод не менее 130 км³ в год при условии, что эта вода практически не содержит ионов SO_4^{2-}, а с нижнебосфорским течением поступает средиземноморская вода в количестве 186 км³/год (СО ГОИН, Э. Н. Альтман), разбавляющаяся до значения

$$[SO_4^{2-} + SO_{4\,H_2S}^{2-}]/Cl = 0{,}1318.$$

На значительные возможности источников субмаринной разгрузки вод указывают исследования К. К. Зеленова, например работа [88]. Возможное существование субмаринных вод с низкими значениями SO_4^{2-}/Cl видно из работ по исследованию иловых вод Черного моря [178].

Эти данные позволяют сделать другие важные выводы, которые подтверждают и выводы Б. А. Скопинцева [151, 157]. Например, поступление ионов SO_4^{2-} в глубинные воды со средиземноморскими водами близко к их оттоку из моря с верхнебосфорским течением (поступает примерно $52 \cdot 10^7$ т, если концентрация ионов составляет 2,78 г/л, и выносится примерно $51 \cdot 10^7$ т при расходе воды 357 км³/год). Если учесть поступление ионов SO_4^{2-} с речным стоком и с атмосферными осадками в поверхностные воды моря (по нашим расчетам соответственно $1{,}9 \cdot 10^7$ т и $0{,}14 \cdot 10^7$ т для речного стока рек Дуная, Днепра и Южного Бугра 248,5 км³/год и атмосферных осадков 233 км³/год), то для поддержания постоянной средней концентрации ионов SO_4^{2-} в поверхностном слое воды необходим приток ионов SO_4^{2-} из глубинных вод в количестве примерно $49 \cdot 10^7$ т. Поэтому среднее время пребывания сульфат-ионов в водах моря составляет примерно 1600 лет при содержании их в море в количестве примерно $7{,}9 \cdot 10^{11}$ т. Рассчитанная по этим данным средняя скорость подъема сульфат-ионов с глубин примерно 2000 м до поверхности по осредненной площади моря составляет 1,2 м/год. Представленные значения среднего времени пребывания сульфат-ионов в море и скорости их подъема в толще воды с 2000 до 0 м примерно сопоставимы с данными Свердрупа, Джонсона, Флеминга (цит. по Б. А. Скопинцеву [151]) по средним значениям времени полного обновления воды в Черном море (примерно 2500 лет) и по средней скорости подъема глубинных вод (1—1,5 м/год), а данные Б. А. Скопинцева [149] по среднему времени пребывания сульфат-ионов в море (примерно 1730 лет) и наши данные близки. Отмечаемые различия в данных, по-видимому, определяются не только различной погрешностью расчетов, но и временной изменчивостью природных явлений, влияющих на водообмен в море (например, приток речных и средиземноморских вод, атмосферных осадков, геофизических процессов). Естественно, что скорость подъема глубинных вод и тем самым сульфат-ионов различна в отдельных областях моря. Например, в халистатических областях, по данным работы [151], эти скорости составляют около 130 лет. Если подъем сульфатов из глубинных вод происходит одновременно с H_2S при сохранении постоянства отношения SO_4^{2-}/H_2S в глубинных водах, равного примерно 150 [56], то количество H_2S, ежегодно поступающее к поверхностным водам, составляет примерно $3{,}0 \cdot 10^7$ т. О сравнительно высоком постоянстве соотношений компонентов (SO_4^{2-} и H_2S) свидетельствует то, что значения $\Delta SO_4^{2-}/Cl$ [56] имеют временную динамику в основном в результате изменчивости хлорности в поверхностном слое. Следует отметить, что по независимым расчетам К. К. Зеленова поступление H_2S в воды моря также $3 \cdot 10^7$ т [88].

Кроме того, существованием горизонтальной пространственно-временной динамики сульфат-хлорного отношения можно объяснить кажущееся, на первый взгляд, противоречивым несовпадение средних значений этих отношений, рассчитанных по отдельным массивам наблюдений, проведенным в различные периоды времени (табл. 4). Следовательно, непостоянство ионного состава вод моря всей его толщи по оценкам степени изменчивости значений SO_4^{2-}/Cl, которе выявлено

Таблица 4

Среднее значение $[SO_4^{2-}]/Cl$

Горизонт, м	[96]		[57]		[153]		[113]		[144]		Настоящая работа	
	n	$[SO_4^{2-}]/Cl$	n	$[SO_4^{2-}]/Cl$	n	$[SO_4^{2-}]/Cl$	n	$[SO_4^{2-}]/Cl$	n	$[SO_4^{2-}]/Cl$	n	$[SO_4^{2-}]/Cl$
0	—	—	6	0,1333	10	0,1414	4	0,1409	1	0,1415	29	0,1349
100	1	0,1367	6	0,1341	10	0,1404	5	0,1402	1	0,1422	26	0,1330
2000	1	0,1367	6	0,1295	1	0,1361	1	0,1228	1	0,1340	21	0,1297

Примечание. n — число наблюдений.

Таблица 5

Хлорность и значения отношения концентраций сульфат-ионов к хлорности, по данным работы [187]

Глубина, м	Cl ‰	$[SO_4^{2-}]/Cl$
0	9,94	0,1415
25	10,106	0,1419
50	10,166	0,1417
75	10,314	0,1417
100	10,563	0,1422
150	11,287	0,1413
200	11,676	0,1404
250	11,861	0,1390
300	11,965	0,1387
500	12,168	0,1372
750	12,270	0,1363
1000	12,308	0,1363
1250	12,344	0,1349
1500	12,344	0,1346
1750	12,343	0,1353
2000	12,345	0,1340
Океанская вода	19,374	0,1400

Б. А. Скопинцевым [150], С. В. Бруевичем [28] и позднее [187] (табл. 5),характерно и для состояния вод моря.

2.4. Распределение кальция и магния в водах открытой акватории

Наиболее полная обобщенная характеристика современного распределения ионов кальция и магния в толще вод моря представлена в табл. 3, 6 по материалам исследований в летний период 1986 и 1987 гг. Согласно этим исследованиям, средние концентрации ионов и средние квадратические отклонения изменяются по глубине не монотонно. Закономерности распределения этих компонентов по горизонтали рассмотрены ниже на примере экспедиционных исследований, проведенных в 1983 и 1985 гг. (табл. 7 и 8). Результаты этих исследований свидетельствуют о непостоянстве значений $[Mg^{2+}]/Cl$ и $[Ca^{2+}]/Cl$. Эти характеристики изменялись соответственно в периоды исследований в пределах 0,060—0,079 и 0,025—0,039 (в 1983 г.) и 0,057—0,081 и 0,022—0,029 (в 1985 г.), что превышает ошибки анализа ($\pm 0{,}0005$). Максимальные значения [Э]/Cl, где [Э] — концентрация катиона, по отношению к минимальным составляют 132 % для кальция и 142 % для магния. Эта изменчивость свойственна в большей мере поверхностным водам, что становится особенно заметным при сравнении данных различных

Таблица 6

Среднее содержание кальция и магния в открытой части моря в летний период 1986 г., г/л

Горизонт, м	Число наблюдений	Концентрация кальция				Концентрация магния			
		максимальная	минимальная	средняя	среднее квадратическое отклонение	максимальная	минимальная	средняя	среднее квадратическое отклонение
0	10	0,286	0,228	0,261	0,017	0,765	0,648	0,716	0,033
10	9	0,291	0,240	0,262	0,012	0,762	0,720	0,735	0,014
20	9	0,314	0,251	0,277	0,019	0,845	0,720	0,770	0,039
50	9	0,314	0,261	0,282	0,015	0,838	0,734	0,787	0,030
100	7	0,314	0,286	0,299	0,010	0,880	0,803	0,840	0,117
200	5	0,320	0,286	0,306	0,011	0,956	0,859	0,903	0,033
300	5	0,320	0,297	0,313	0,014	0,949	0,866	0,902	0,027
400	2	0,308	0,297	0,302	—	0,949	0,914	0,931	—
500	3	0,331	0,297	0,312	—	0,976	0,893	0,940	—
600	2	0,308	0,308	0,308	—	0,907	0,852	0,880	—
800	5	0,325	0,286	0,307	0,014	0,942	0,824	0,902	0,041
1000	6	0,325	0,308	0,315	0,007	0,949	0,880	0,906	0,021
1200	5	0,325	0,297	0,307	0,010	0,914	0,866	0,894	0,158
1300	1	—	—	0,297	—	—	—	0,928	—
1400	1	—	—	0,297	—	—	—	0,921	—
1500	4	0,314	0,297	0,307	0,006	0,907	0,873	0,892	0,012
1700	3	0,320	0,297	0,312	—	0,942	0,838	0,900	—
1800	3	0,331	0,297	0,312	—	0,935	0,900	0,919	—
1900	2	0,308	0,297	0,302	—	0,928	0,900	0,914	—
2000	3	0,308	0,297	0,302	—	0,866	0,859	0,862	—

Примечание. Анализы выполнены Л. В. Савиной.

Таблица 7

Значения гидрохимических параметров вод моря по исследованиям в 1985 г.

Номер станции (рис. 4)	Дата отбора пробы	Горизонт, м	Cl ‰	$[Ca^{2+}]/Cl$	$[Mg^{2+}]/Cl$	S_n ‰	$S_n - S_x$ ‰	S_n/Cl
26	27 I	0	10,14	0,027	0,060	18,36	0,04	1,8103
		100	11,19	0,022	0,069	20,18	—0,04	1,8033
		2050	12,36	0,024	0,066	22,32	—0,01	1,8057
39	28 I	0	9,94	0,025	0,071	18,03	0,07	1,8135
		100	11,25	0,025	0,068	20,38	0,06	1,8117
		2130	12,34	0,023	0,069	22,25	—0,04	1,8032
43	29 I	0	10,10	0,027	0,081	—	—	—
		100	11,22	0,024	0,068	—	—	—
		2100	12,41	0,022	0,057	—	—	—
49	30 I	0	9,98	0,027	0,067	17,94	—0,09	1,7978
		100	11,33	0,026	0,066	20,53	0,06	1,8119
		1960	12,35	0,023	0,069	22,22	—0,09	1,7994
37	3 II	0	10,01	0,025	0,068	17,95	—0,15	1,7931
		100	11,34	0,025	0,067	20,51	0,02	1,8089
		1750	12,33	0,022	0,068	22,28	0,01	1,8069
17	6 II	0	9,50	0,026	0,073	17,12	—0,04	1,8025
		22	9,92	0,024	0,068	17,93	0,01	1,8078
21	8 II	0	10,04	0,023	0,063	18,12	—0,02	1,8044
		75	10,09	0,027	0,064	18,26	0,03	1,8091
3	9 II	0	9,58	0,024	0,067	17,37	0,06	1,8136
		60	10,21	0,024	0,065	18,27	—0,17	1,7894
5	9 II	0	10,02	0,025	0,067	18,17	0,07	1,8139
		100	11,13	0,024	0,068	20,16	0,05	1,8111
		1520	11,79	0,024	0,069	21,30	0,00	1,8064
9	10 II	0	10,03	0,028	0,068	18,11	—0,01	1,8053
		118	11,19	0,023	0,075	20,18	—0,04	1,8031
11	10 II	0	10,12	0,026	0,067	18,32	0,04	1,8101
		100	11,08	0,029	0,067	20,00	—0,02	1,8048
22	11 II	0	10,04	0,025	0,067	18,21	0,07	1,8141
		100	11,21	0,023	0,068	20,27	0,02	1,8078
		1880	12,23	0,022	0,067	22,07	—0,02	1,8044

Таблица 8

Значения гидрохимических параметров вод моря по исследованиям 1983 и 1985 гг.

Номер станции (рис. 4)	Горизонт, м	Cl ‰	$([Ca^{2+}]/Cl)_1$	$([Ca^{2+}]/Cl) - ([Ca^{2+}]/Cl)_2$	$([Ca^{2+}]/Cl)_1 - ([Ca^{2+}]/Cl)_3$	$([Mg^{2+}]/Cl)_1$	$([Mg^{2+}]/Cl)_1 - ([Mg^{2+}]/Cl)_2$	$([Mg^{2+}]/Cl) - ([Mg^{2+}]/Cl)_3$
5	0	10,10	0,026	—	0,001	0,064	—	—0,003
	100	11,28	0,026	—	0,002	0,063	—	—0,005
	1650	12,39	0,026	—	0,002	0,061	—	—0,008
9	0	9,96	0,028	—	0,000	0,070	—	0,002
	100	10,95	0,027	—	0,004	0,064	—	—0,011
11	0	9,99	0,029	—	0,003	0,069	—	0,002
	100	11,16	0,029	—	0,000	0,066	—	—0,001
	2000	12,41	0,028	—	—	0,066	—	—
14	0	9,84	0,027	—	—	0,069	—	—
	93	10,96	0,025	—	—	0,065	—	—
17	0	8,05	0,039	—	0,013	0,079	—	0,006
	22	9,21	0,035	—	0,011	0,075	—	0,007
21	0	8,67	0,029	—	—	0,069	—	0,006
22	0	10,02	0,029	—	0,004	0,073	—	0,006
	100	11,38	0,027	—	0,004	0,064	—	—0,004
	1800	12,38	0,025	—	0,003	0,067	—	0,000
26	0	10,06	0,026	0,001	—0,001	0,065	—0,005	—0,004
	100	11,35	0,026	0,002	0,004	0,063	—0,002	—0,006
31	0	10,10	0,028	0,001	—	0,064	—0,005	—
	100	11,48	0,027	0,000	—	0,062	—0,007	—
34	0	9,98	0,027	0,001	—	0,065	—0,004	—
	100	10,94	0,026	0,002	—	0,063	—0,008	—
	1630	12,45	0,025	—0,001	—	0,064	0,000	—
37	0	9,93	0,028	0,000	0,003	0,064	—0,005	—0,004
	100	11,34	0,025	0,000	0,000	0,065	0,001	—0,002
	1370	12,38	0,026	0,000	0,004	0,064	0,000	—0,004
39	0	10,08	0,028	0,001	0,003	0,065	—0,004	—0,006
	100	11,40	0,026	0,002	0,001	0,065	0,001	—0,003
	2000	12,37	0,026	0,000	0,003	0,064	0,000	—0,005
43	0	9,93	0,028	—0,001	0,001	0,065	—0,005	—0,016
	100	11,69	0,025	0,001	0,001	0,061	—0,006	—0,007
	2000	12,36	0,026	0,000	0,004	0,068	0,006	0,011
49	0	9,96	0,026	—0,001	—0,001	0,065	—0,006	—0,002
	100	10,48	0,028	—0,001	0,002	0,069	—0,001	0,003
	2000	12,40	0,026	0,000	0,003	0,065	0,000	—0,004

Примечания: $([Ca^{2+}]/Cl)_1$ и $([Mg^{2+}]/Cl)_1$ — июль 1983 г.; $([Ca^{2+}]/Cl)_2$ и $([Mg^{2+}]/Cl)_2$ — ноябрь 1983 г.; $([Ca^{2+}/Cl)_3$ и $([Mg^{2+}]/Cl)_3$ — январь — февраль 1985 г.

экспедиций (табл. 8). Средние значения $[Mg^{2+}]/Cl$ и $[Ca^{2+}]/Cl$ для всей акватории моря по горизонтам составили соответственно 0,069 и 0,026 в поверхностном слое; 0,066 и 0,023 — в слое 22—118 м; 0,065 и 0,023 — в глубинных водах, причем средние значения одинаковы для мелководных и глубоководных районов. Из этих данных видно, что среднее распределение значений $[Mg^{2+}]/Cl$ и $[Ca^{2+}]/Cl$ имеет общую тенденцию к убыванию с глубиной. Данная особенность распределения по глубине значений $[Mg^{2+}]/Cl$ ранее в литературе не отмечалась. Средние значения $[Mg^{2+}]/Cl$ и $[Ca^{2+}]/Cl$ по всему объему вод Черного моря соответственно 0,0675 и 0,0258, что совпадает с данными Б. А. Скопинцева и А. В. Рождественского [150]. Очевидно, недостаточный ряд наблюдений был основной причиной, по которой средние значения принимались постоянными для всей акватории Черного моря. Из представленных данных, таким образом, следует, что толща вод Черного моря является весьма неоднородной по своему относительному составу по ионам кальция и магния.

Концентрации ионов кальция и магния и их отношения к хлорности переменны не только в пространстве, но и во времени (табл. 8). Более подробно рассмотрим временную динамику абсолютных и относительных (к хлорности) значений содержания обоих ионов на примере исследований гидрохимии иона магния в 1983 и 1985 гг. на станциях, представленных на рис. 4, как более консервативного катиона по сравнению с катионом кальция.

Среднее содержание Mg^{2+} в поверхностном горизонте менялось в различные периоды экспедиционных исследований. Например, средняя концентрация в период летней экспедиции 1983 г. 0,6455 г/кг, а в период осенней экспедиции — 0,6995 г/кг. При этом средние значения отношений $[Mg^{2+}]/Cl$ соответственно равнялись 0,0647 и 0,0698. На ряде станций изменчивость отношения $[Mg^{2+}]/Cl$ достигала между обоими периодами исследований 0,0039—0,0061 (максимальная погрешность расчета отношений $[Mg^{2+}]/Cl$ $\pm 0{,}0003$, минимальная — 0,0001). Следовательно, как абсолютные значения концентраций $[Mg^{2+}]$, так и относительные заметно менялись в поверхностном слое по акватории моря, и эта закономерность была свойственна гидрохимической обстановке в море во все периоды экспедиционных исследований СО ГОИНа.

На горизонте 100 м средние концентрации магния по сравнению с концентрациями в поверхностном слое выше: 0,7144 и 0,7488 г/кг (‰ по массе) соответственно в периоды летней и осенней экспедиций 1983 г. Относительные же значения средних концентраций на этом горизонте меньше, чем в поверхностном (0,0638 и 0,0673 соответственно в летний и осенний периоды исследований). На ряде станций изменчивость отношения $[Mg^{2+}]/Cl$ в указанном временном интервале достигала в 1983 г. 0,0078—0,0082 (станции 31 и 34). В то же время на ряде других станций изменчивость $[Mg^{2+}]/Cl$ была мала (0,0006—0,0014 на станциях 37, 39 49).

В глубинных водах (примерно 2000 м) среднее значение отношения $[Mg^{2+}]/Cl$ 0,0635, а его временная изменчивость не превышала 0,0008. В то же время средние концентрации Mg^{2+} были значительно выше, чем в верхних горизонтах, но различались во времени (например, 0,8121 ‰ по массе в период экспедиционных исследований летом 1983 г. и 0,7824 ‰ в период исследований осенью 1983 г.).

Анализ данных показывает, что для вод моря характерно заметное различие не только в содержании Mg^{2+}, но и в его отношениях к хлорности ($[Mg^{2+}]/Cl$). При этом степень различия отношения $[Mg^{2+}]/Cl$ меняется во времени. Например, в марте 1983 г. средние значения $[Mg^{2+}]/Cl$ в западной части моря были больше, чем в восточной части моря в поверхностных водах, а в январе—феврале 1985 г. значения этого отношения в западной части моря были уже больше значений его в восточной части моря, хотя в последний период исследований оба средних значения отношения $[Mg^{2+}]/Cl$ уменьшились по сравнению с соответствующими значениями в 1983 г.

Таким образом, для ионов Mg^{2+} характерна пространственно-временная изменчивость, не коррелируемая с пространственно-временной изменчивостью хлорности во всей толще вод Черного моря.

2.5. Распределение калия, брома и стронция в водах открытой акватории

Результаты наблюдений приведены в табл. 9.

Калий. Его содержание варьировало в пределах 0,144—0,296 г/кг (‰ по массе), которому соответствуют ранее опубликованные по работе [150]

Таблица 9

Калий, бром и стронций в водах моря в 1985 г.

Номер станции (рис. 4)	Дата	Горизонт, м	Концентрация, ‰				
			$[Cl^-]$	$[K^+]$	$[Br^-]$	$[Sr^{2+}]$	S
26	27 I	0—0,5	10,11	0,202	0,0349	0,0025	18,36
		100	11,15	0,205	0,0372	0,0027	20,18
		2050	12,32	0,253	0,0434	0,0026	22,32
39	28 I	0—0,5	9,91	0,191	0,0339	0,0026	18,03
		100	11,22	0,296	0,0310	0,0015	20,38
		2130	12,30	0,248	0,0437	0,0040	22,25
43	29 I	0—0,5	10,06	0,222	0,0379	0,0037	—
		100	11,18	0,230	0,0376	0,0039	—
		2100	12,37	0,249	0,0405	0,0022	—
49	30 I	0—0,5	9,95	0,162	0,0338	0,0029	17,94
		100	11,30	0,231	0,0347	0,0031	20,53
		1960	12,31	0,212	0,0383	0,0036	22,22
37	3 II	0—0,5	9,98	0,172	0,0314	0,0030	17,95
		100	11,30	0,181	0,0375	0,0034	20,51
		1750	12,29	0,259	0,0434	0,0041	22,28
17	6 II	0—0,5	9,47	0,231	0,0344	0,0032	17,12
		22	9,81	0,154	0,0305	0,0024	17,93
21	8 II	0—0,5	10,00	0,144	0,0337	0,0037	18,12
		75	10,06	0,154	0,0325	0,0029	18,26
3	9 II	0—0,5	9,55	0,220	0,0327	0,0029	17,37
		60	10,18	0,168	0,0337	0,0027	18,27
5	9 II	0—0,5	9,99	0,185	0,0327	0,0027	18,17
		100	11,09	0,180	0,0367	0,0035	20,16
		1520	11,75	0,218	0,0373	0,0038	21,30
9	10 II	0—0,5	10,00	0,219	0,0261	0,0030	18,11
		118	11,15	0,190	0,0389	0,0031	20,18
11	10 II	0—0,5	10,09	0,204	0,0335	0,0033	18,32
		100	11,04	0,181	0,0357	0,0028	20,00
22	11 II	0—0,5	10,01	0,178	0,0303	0,0025	18,21
		100	11,20	0,206	0,0361	0,0022	20,27
		1880	12,19	0,208	0,0393	0,0035	22,07

весьма немногочисленные наблюдения (0,211—0,256 ‰). Среднее содержание K^+ по данным 1985 г. на горизонтах 0—0,5 м, 22—118 м и глубинном соответственно (‰): 0,194; 0,196 и 0,235.

Сравнение качества вод западной и восточной частей моря по данному показателю на группах глубоководных станций (соответственно 26, 5, 11, 22 и 39, 43, 49, 37) дало следующие результаты. В западной части моря отношение концентраций K^+/Cl и K^+/Sr^{2+} меньше (кроме поверхностного горизонта) по сравнению с водами восточной части моря, что видно из нижеприводимых расчетных данных:

Горизонт, м	$10^3[K^+]/Cl^-$		$10^3[K^+]/[Sr^{2+}]$	
	Запад	Восток	Запад	Восток
0—0,5	19,1	18,7	10,5	10,4
100	17,3	20,8	9,6	11,4
Глубинный	18,3	19,6	10,3	10,9

Стронций. Его содержание варьировало в пределах 0,0015—0,0041 ‰ (1,5—4,1 мг/кг), что ниже данных, приведенных в работе [150] (4,6—5,2 мг/кг) для трех глубоководных станций. Среднее содержание Sr^{2+} по данным 1985 г. (‰): 0,0030 для горизонта 0—0,5 м; 0,028 для слоя 22—118 м; 0,0034 для глубинных вод. Как видно из приведенных ниже расчетов средних концентраций Sr^{2+} и их отношений к концентрации Cl^- (Sr^{2+}/Cl^-) и к солености (Sr^{2+}/S) для западной и восточной частей моря (соответственно глубоководные станции 26, 5, 11, 22 и 39, 43, 49, 37):

Горизонт, м	$10^4[Sr^{2+}]/Cl$		$10^2[Sr^{2+}]/S$		$[Sr^{2+}]$ ‰	
	Запад	Восток	Запад	Восток	Запад	Восток
0—0,5	2,7	3,0	1,5	1,7	0,0027	0,0030
100	2,5	2,7	1,4	1,5	0,0028	0,0030
Глубинный	2,7	3,5	1,5	1,6	0,0033	0,0035

Для вод западной части свойственны более низкие концентрации Sr^{2+} и рассчитанных отношений. На глубине 100 м оба отношения несколько меньше, чем в поверхностном слое и глубинных водах.

Хлорид-ионы. Их распределение описывается закономерностями распределения хлорности. По данным средних концентраций Cl^- на станциях 26, 5, 11, 22 (с одной стороны) и на станциях 39, 43, 49, 37 (с другой стороны) воды западной и восточной частей моря практически не различаются, а по солености наблюдаются некоторые различия:

Горизонт, м	Cl^- ‰		S‰	
	Запад	Восток	Запад	Восток
0—0,5	10,05	9,97	18,26	17,97
100	11,12	11,25	20,15	20,47
Глубинный	12,32	12,31	21,90	22,25
Среднее	11,16	11,18	20,10	20,23

Бромид-ионы. Их содержание варьировало в пределах 26,1—43,7 мг/кг, в которые укладывались и более ранние наблюдения [150] (33—46,0 мг/кг). Среднее содержание Br^- по данным 1985 г. (‰): 0,0329 для горизонта 0—0,5 м, 0,0352 — для слоя 22—118 м, 0,0408 — для глубинных вод. Сравнение качества вод по содержанию бромид-иона между западной и восточной частями моря аналогично другим вышеуказанным ионам и показывает, что:

Горизонт, м	$[Br^-]$ ‰		$10^1[Br^-]/Cl^-$		$10^4[Br^-]/S$	
	Запад	Восток	Запад	Восток	Запад	Восток
0—0,5	0,0328	0,0342	32,7	34,3	18,0	19,0
100	0,0364	0,0352	32,7	31,3	18,1	17,2
Глубинный	0,0400	0,0415	32,5	33,7	18,3	18,6

Из этих данных следует, что воды обеих частей моря различаются по содержанию бромид-иона, причем в западной части среднее содержание практически одинаково по вертикали.

Имеются также заметные различия в относительном содержании K^+ и Sr^2 внутри слоя вод 0—100 м западной части моря, прослеживаемые по средним значениям отношений $Э/Cl^-$ и $Э/S$, где Э — концентрация (‰) указанных ионов в районах станций, располагаемых в прибрежных водах (станции 17, 3, 9) и в центре (глубинные станции 26, 22, 11). Результаты, представляемые ниже, свидетельствуют, что значения $Э/Cl^-$ и $Э/S$ выше в прибрежных водах (в районе 1 — станции 17, 3, 9), а в поверхностном слое эти значения выше, чем в слое 22—118 м в обоих районах (район 2 — станции 26, 22, 11).

$10^3Э/Cl^-$

Горизонт, м	$[K^+]$ (1)	$[K^+]$ (2)	$[Sr^{2+}]$ (1)	$[Sr^{2+}]$ (2)
0—0,5	23,1	19,4	0,31	0,28
22—118	21,5	17,7	0,26	0,24

$10^3Э/S$

	$[Br^-]$ (1)	$[Br^-]$ (2)	$[K^+]$ (1)	$[K^+]$ (2)
0—0,5	3,2	3,3	12,7	10,7
22—118	3,3	3,3	11,7	9,8

	$[Sr^{2+}]$		$[Br^-]$		$[Cl^-]$	
	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
0—0,5	0,17	0,15	1,8	1,8	550	550
22—118	0,14	0,13	1,8	1,8	550	550

Такое непостоянство относительного содержания катионов проявляется, по-видимому, благодаря влиянию стока рек вследствие сравнительно низких концентраций этих катионов.

Таблица 10

Отношение концентраций ионов в пробах различного происхождения и относительные стандартные отклонения (в скобках), ‰

Место отбора пробы	$[K^+]/[Cl^-]$	$[Sr^{2+}]/[Cl^-]$	$[Br^-]/[Cl^-]$	Количество параллельных анализов
Черное море	0,0190 (0,13)	0,000304 (0,14)	0,00309 (0,08)	6
Днепро-Бугский лиман	0,0322 (0,06)	0,000618 (0,04)	0,00366 (0,03)	5

Эти выводы находят непосредственное подтверждение данными табл. 10.

2.6. Карбонатная щелочность

Карта изученности щелочности за период 1929—1982 гг. представлена на рис. 5, а осредненные данные по элементам карбонатной системы, в том числе и по pH, — в табл. 11.

Прямая зависимость между изменением щелочности и парциального давления углекислоты, а также ее концентрацией характерна для всех изученных районов моря и сезонов года.

В открытых районах западной части моря зимой на всех горизонтах понижены значения парциального давления и концентрации углекислоты в сравнении с летним сезоном. Например, максимальные значения парциального давления и концентрации CO_2 в глубинном слое зимой составляли 118,8 Па и $60{,}62 \cdot 10^{-6}$ моль/л соответственно, летом в этом же слое наблюдались значения 178,6 Па и $90{,}89 \cdot 10^{-6}$ моль/л. Щелочность при

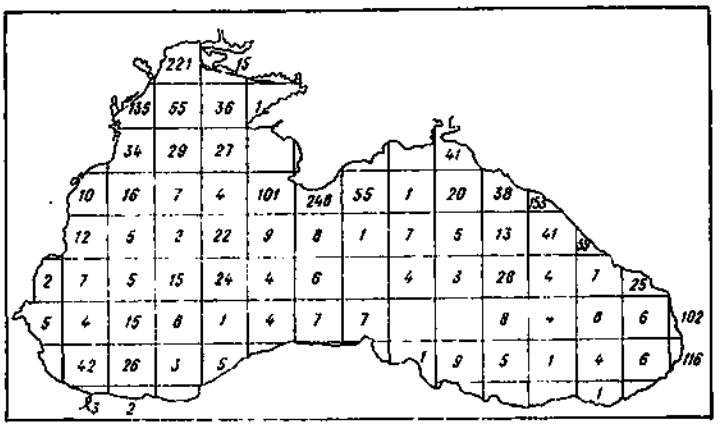

Рис. 5. Карта изученности карбонатной щелочности в поверхностном горизонте моря в период 1929—1982 гг.
Цифры в квадратах — количество анализов.

этом не имеет сезонного хода и равномерно увеличивалась ко дну.

В восточной части моря летом значения щелочности несколько выше зимних и, естественно, увеличены также значения парциального давления CO_2.

Увеличение значений концентрации CO_2 с глубиной отчетливо выявляется с горизонта 50 м. По этому же показателю заметна разница между содержанием CO_2 в водах восточной и западной частей моря. Если в первой содержание CO_2 зимой на горизонте 50 м $18{,}77 \cdot 10^{-6}$ моль/л, то во второй — $13{,}82 \cdot 10^{-6}$ моль/л.

В летний период средние значения парциального давления CO_2 в водах западной части моря были выше, чем в водах восточной. Такое отличие, видимо, обусловлено большей активностью фитопланктона в восточной части моря. Может оказывать также влияние в западной части поступление вод Мраморного моря в конце летнего сезона на горизонты 75—200 м Черного моря. При смешении этих вод в результате окисления сероводорода могут образовываться кислые продукты, которые нейтрализуют щелочные компоненты воды с образованием свободной углекислоты.

В водах прибрежных районов моря значения щелочности и парциального давления CO_2 в летний сезон были несколько ниже, чем в водах центральной части вследствие более низкого содержания растворенного кислорода в последней. Приблизительно та же ситуация имеет место и в зимний сезон.

Рассмотрим наиболее характерные поля горизонтального распределения щелочности. Летом на поверхности (рис. 6) увеличение щелочности происходит от периферийных районов к центральной части моря. Но у Крымского побережья, в юго-западной его части, существует зона повышенных значений щелочности, причиной чему, видимо, является вертикальное перемешивание вод. В западной части моря наблюдается замкнутая зона повышенных значений щелочности, возможно, создаваемая подъемом вод. В восточной части моря

Таблица 11

Средние значения щелочности, концентраций CO_2 и pH за период 1929—1982 гг.

Сезон	Горизонт, м	Щелочность, ммоль/л	Парциальное давление CO_2, 10^4 атм.	Концентрация CO_2, 10^6 моль/л	pH
Западная часть открытой акватории					
Зима	0	202	2,53	13,32	8,46
	50	205	2,85	13,82	8,44
	100	208	4,91	25,83	8,23
	300	215	7,33	37,93	8,04
	500	232	10,48	54,08	7,96
	1000	250	12,49	64,52	7,94
	1500	264	10,48	54,05	7,99
	2000	267	11,73	60,62	7,96
Лето	0	202	3,82	13,27	8,36
	50	250	3,21	15,83	8,40
	100	206	5,41	28,53	8,20
	500	224	9,75	51,25	7,95
	1000	251	14,29	76,33	7,86
	1500	240	14,09	72,69	7,85
	2000	267	17,62	90,89	7,82
Восточная часть открытой акватории					
Зима	0	201	2,98	15,66	8,41
	50	203	3,57	18,77	8,34
	100	207	6,31	33,95	8,14
	500	228	12,30	62,70	7,87
	1000	245	15,80	81,56	7,81
	1500	261	17,43	89,99	7,79
	2000	273	20,78	107,22	7,74
Лето	0	202	3,31	11,19	8,40
	50	205	3,11	16,41	8,43
	100	206	4,89	25,74	8,25
	500	222	12,35	63,74	7,88
	1000	258	14,39	74,29	7,87
	2000	238	16,40	84,66	7,79
Бухта юго-западного побережья Крыма					
Зима	0	206	3,04	14,66	8,37
	Дно	207	3,40	16,31	8,32
Лето	0	196	3,84	12,56	8,35
	Дно	201	4,29	14,60	8,30
Ялтинский залив					
Зима	0	192	2,59	13,27	8,41
	Дно	195	2,92	14,98	8,34
Лето	0	201	3,81	12,82	8,34
	Дно	202	3,52	13,40	8,36
Феодосийский залив					
Зима	0	191	3,06	16,64	8,36
	Дно	199	3,46	19,23	8,32
Лето	0	195	3,51	12,44	8,35
	Дно	198	3,10	12,69	8,40

Примечание. 1 атм = $1{,}01325 \cdot 10^6$ Па

наблюдается замкнутая зона повышенных значений щелочности, возможно, создаваемая подъемом вод. В восточной части моря наблюдается та же закономерность: щелочность у берега ниже, чем в центральных районах.

Осенью на поверхности (рис. 6) отмечена та же ситуация, но в юго-восточной части моря значения щелочности заметно выше, чем в западной части моря. Приблизительно та же обстановка прослеживается и в зимне-весенний сезоны, т. е. щелоч-

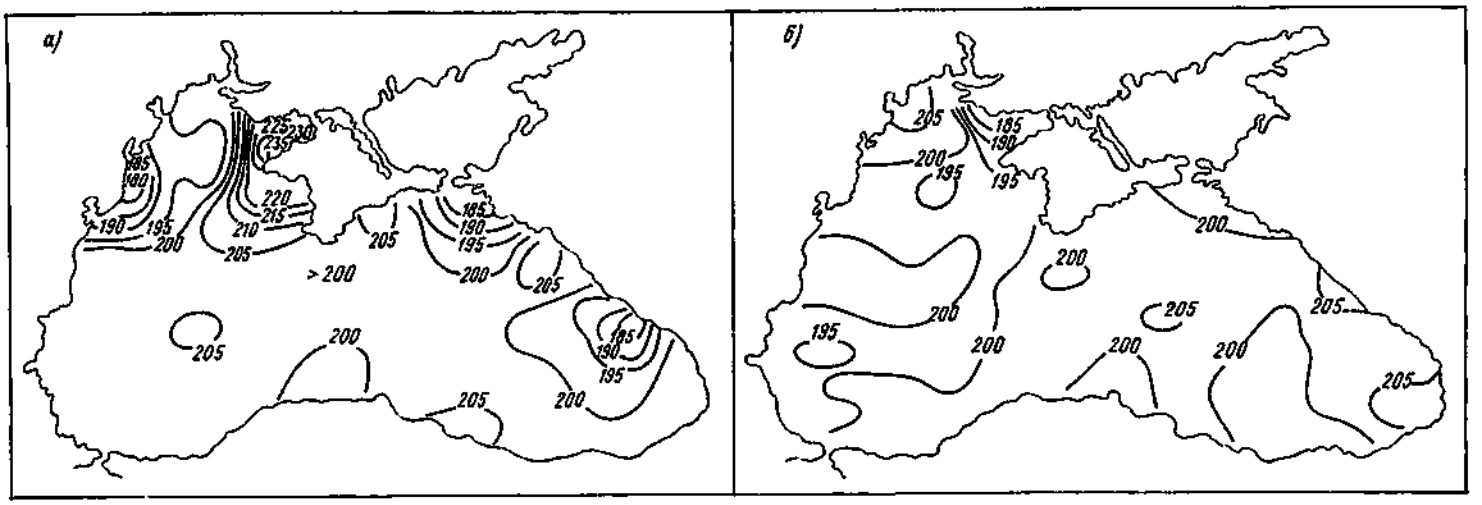

Рис. 6. Распределение щелочности в поверхностном горизонте в период 1929—1982 гг., ммоль/л.
а — лето; *б* — зима.

ность в поверхностном слое не претерпевает заметных сезонных изменений.

Пространственное распределение концентраций щелочности на горизонте 100 м представлено на рис. 7. В водах этого горизонта процессы нейтрализации щелочных компонентов упомянутыми выше кислыми продуктами могут в определенной степени нивелировать влияние динамики вод. Как и на поверхности, независимо от сезона, восточная часть моря характеризуется более высокими концентрациями щелочности; особенно заметно ее увеличение в прибрежных районах моря.

Осенью и летом (рис. 7) область увеличенных значений щелочности располагается у Кавказского побережья. Здесь же (см. табл. 11) наблюдается высокое парциальное давление углекислоты в этот период в сравнении с остальными районами моря. Пониженные значения щелочности в западной части формируются поступлением сюда мраморноморских вод, так как, например, осенью в районе прол. Босфор отмечена зона минимальных ее значений.

Зимой (см. рис. 7) замкнутая область минимальных значений щелочности отмечена в центре циклонического круговорота в западной части моря.

Характер вертикального распределения щелочности для короткого промежутка времени рассмотрен на примере профиля распределения по разрезу Херсонес—Босфор для августа 1964 г. (рис. 8). В этот период наблюдений наименьшие значения щелочности зарегистрированы на поверхностном горизонте у Крымского полуострова. Как видно из хода изолиний (рис. 8), щелочность распределялась в водном пространстве неравномерно и немонотонно, хотя по осредненным данным ее значения увеличиваются ко дну. Немонотонность, в частности, прослеживается по всему профилю разреза. Например, на глубине 100 м у Крыма щелочность резко уменьшается на фоне высоких ее значений в более глубоких слоях (200—600 м). На этой глубине в этом же районе концентрация растворенного кислорода была невелика (0,97 мг/л) по сравнению с другими районами. Этим водам были свойственны также пониженные значения pH. В слое вод 150—200 м в период исследований существовала зона пониженных

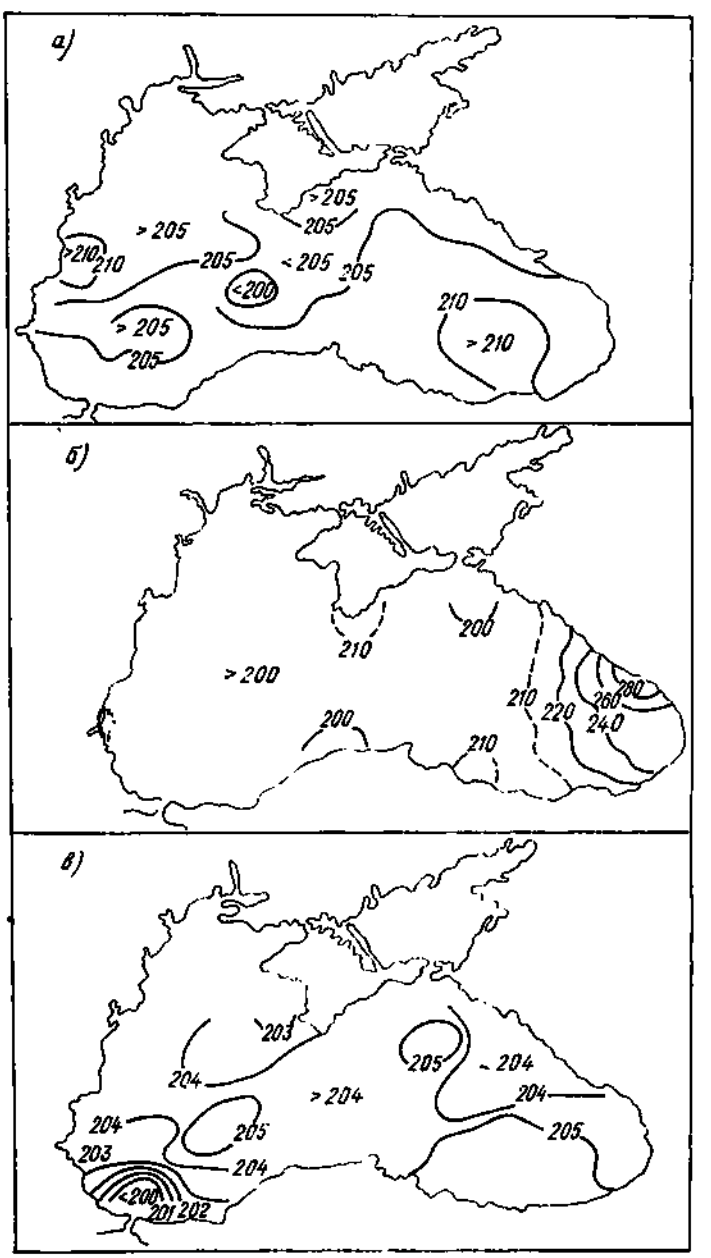

Рис. 7. Распределение щелочности на горизонте 100 м в период 1929—1982 гг., ммоль/л.
а — зима; *б* — осень; *в* — лето.

значений щелочности, ограниченная изолинией 200 ммоль/л. Ниже 150 м повышены значения щелочности в водах прибосфорского района, а значения pH здесь соответственно понижены. Заметное увеличение значений щелочности наряду с немонотонностью ее распределения прослеживается в более глубоких слоях (300—800 м).

Данными рис. 8 можно демонстрировать характер динамики вод в период исследований. Так,

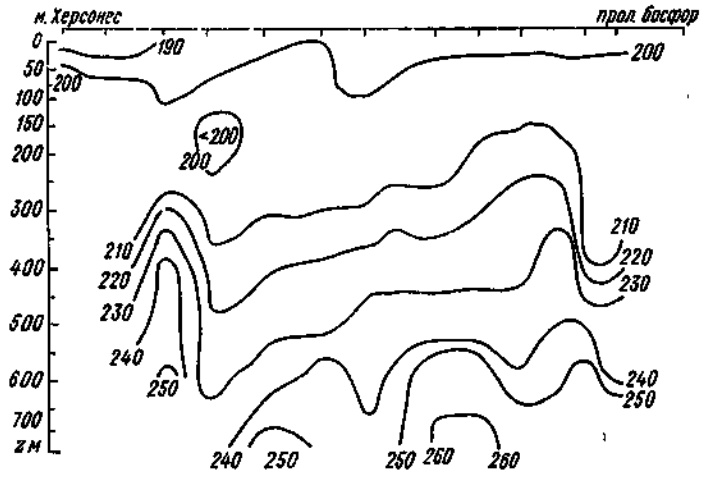

Рис. 8. Распределение щелочности на разрезе м. Херсонес — прол. Босфор в августе 1964 г., ммоль/л.

даже в центральной части моря щелочность изменялась неравномерно; это, вероятно, свидетельствует о неоднородности динамических процессов массопереноса в циклоническом круговороте этой зоны. На периферии круговорота происходят еще более сложные процессы динамики вод, связанные, в частности, как с подъемом вод, так и с их опусканием.

Если по представленным выше осредненным материалам наблюдений для всей акватории моря сезонный ход щелочности отчетливо не выявляется, то в отдельных районах моря по натурным

Таблица 12

Щелочность вод Ялтинского залива в 1969 г., ммоль/л

Горизонт, м	Количество наблюдений	Зима	Весна	Лето	Осень
Поверхностный	18	201	214	212	206
50	18	202	218	214	206
100	15	207	217	214	205
1000	12	262	272	273	256

наблюдениям можно проследить наличие такого хода. Например, для района, примыкающего к Ялте, по данным наблюдений за 1969 г. (табл. 12), достаточно четко выявляется сезонный ход щелочности на разных горизонтах.

Щелочность увеличивается с глубиной независимо от сезонных особенностей, а на горизонтах наблюдаются определенные характерные особенности ее распределения. Зимой значения щелочности на поверхности понижены и к началу весеннего сезона в основном достигают минимума. В более глубоких слоях ее распределение аналогично распределению в поверхностном слое.

Весной и летом поверхностные воды характеризуются повышенными значениями щелочности, которые формируются в этот период под влиянием повышения солености вследствие незначительности атмосферных осадков и интенсивности процессов испарения вод с поверхности, а также в результате повышения парциального давления CO_2. По-видимому, ослабление влияния этих факторов в осенний сезон наряду с изменением гидрологического режима данного района моря приводит к снижению щелочности вод.

В глубинных водах ход щелочности определяется как сезонной динамикой, так и изменением концентраций карбонатов кальция, увеличение которых приводит к увеличению концентраций растворенного $CaCO_3$ и, следовательно, щелочности.

Для гидролого-гидрохимически активных районов моря, таких, например, как северо-западный район, свойственна мелкомасштабная временная динамика значений щелочности (табл. 13). Из данных табл. 13 не прослеживается четкого суточного хода щелочности. Однако временная изменчивость не только щелочности, но и ее отношения к хлорности весьма существенна. Вероятно, наиболее значительное влияние на мелкомасштабную временную динамику щелочности и ее отношения к хлорности здесь оказывает динамика водных масс. Кроме того, уменьшение отношения щелочности к хлорности с глубиной в слое 0—10 м определяется тем, что щелочность в этом слое с глубиной изменяется незначительно, а хлорность заметно увеличивается.

Можно отметить, что северо-западный район по сравнению с остальной частью моря характеризуется пониженными значениями щелочности и высоким щелочно-хлорным коэффициентом, но с глубиной и по мере удаления от берегов эти значения приближаются к значениям, характерным для открытых областей моря.

Аналогичные многочасовые наблюдения, проведенные в августе 1977 г. в районе Туапсе (квадрат 29), подтверждают, что степень мелкомасштабной временной динамики отношений щелочности к хлорности различна для различных физико-географических районов моря. Данные табл. 14 свидетельствуют о значительно меньшей динамике отношений щелочности к хлорности (солености) в районе Туапсе по сравнению с Одесским заливом. Как видно, имеется определенный суточный ход: в предутренние часы (3—4 ч утра) щелочность и соленость снижаются в связи с прохождением холодного фронта (23—27 °С), а максимумы щелочности приходятся на дневное время, причиной чему может являться увеличение вертикальной конвекции.

Корреляционный анализ обсуждаемых данных позволил выявить характерные особенности соотношений щелочности и солености в достаточно изученных районах моря. В частности, результаты такого анализа показали следующее для периода 1963—1969 гг. Коэффициенты корреляции между щелочностью и соленостью в водах прибосфорского и прикрымского районов моря гораздо ниже, чем в водах центрального района западной части моря. Невысок этот коэффициент и для вод на разрезе м. Херсонес — прол. Босфор.

В водах поверхностного горизонта в осенний сезон справедливо уравнение регрессии с коэффициентом корреляции $r = 0{,}54$: $S = 23{,}30$—

Таблица 13

Динамика значений щелочности и щелочно-хлорного отношения K в Одесском заливе в 1982 г.

Время последовательного отбора проб, ч	Горизонт, м											
	0		5		10		0		5		10	
	Alk	K	Alk	K	Alk	K	Alk	K	Alk	K	Alk	K
	Май						Июль					
6	168	20,68	164	19,71	165	18,61	181	34,60	181	27,03	180	18,98
12	152	20,75	167	20,26	170	19,04	176	31,91	173	24,90	175	18,24
18	171	21,05	168	20,50	170	18,98	176	31,73	186	25,75	175	18,24
24	167	20,44	167	20,20	168	19,34	176	30,75	180	21,78	174	18,00
6	164	20,32	167	20,50	168	19,59	178	31,67	181	22,15	180	18,49
12	160	19,83	160	19,77	162	19,83	175	30,39	178	23,49	186	19,83
18	160	20,08	160	19,83	162	19,71	190	32,10	195	22,76	200	20,87
24	160	23,13	160	20,68	160	19,65	193	29,41	206	28,37	213	22,27
6	159	23,68	161	23,25	162	19,71	193	32,10	199	24,28	200	20,38
12	167	24,28	165	23,68	170	21,23	190	27,21	192	19,28	193	19,40
18	162	23,25	164	23,37	159	21,48	173	23,25	188	23,19	188	19,34
24	160	22,64	162	21,84	164	20,81	162	21,91	184	20,44	188	20,01
6	167	23,37	163	22,58	164	19,71	217	29,90	175	19,89	162	17,15

Примечание. K = Alk:Cl; Alk — щелочность, ммоль/л; Cl — хлорность, ‰.

— 1,60Alk, где S и Alk — концентрации соответственно солености и щелочности. В этом же сезоне высок коэффициент корреляции и в придонном слое ($r = 0{,}63$), в котором уравнение регрессии имеет вид

$$\lg[S] = 1{,}29 + 0{,}1 \lg[\mathrm{Alk}].$$

Зимний и особенно весенне-летний сезоны характеризуются низкой корреляционной зависимостью или ее отсутствием ($r = 0{,}01$; $r = 0{,}06$).

На горизонте 100 м низший коэффициент корреляции наблюдается в течение всего года и имеет отрицательное значение. Следовательно, для вод Черного моря свойственна фактическая независимость в распределении солености и щелочности для всего периода исследования последних. Поэтому были рассчитаны тренды для оценки изменчивости щелочности в квадратах моря, имеющих достаточный ряд наблюдений. Результаты расчета (табл. 15) позволяют выявить районы устойчивого систематического изменения щелочности во времени. Так, к примеру, в районе Поти (квадрат 71) летом и весной в слое 0—20 м наблюдалась тенденция к возрастанию щелочности. Тенденция к снижению щелочности в зимний период обнаруживается на поверхностном горизонте в районе Туапсе (квадрат 42). Район Батуми весной характеризуется увеличением щелочности в слое 0—20 м. Снижение щелочности характерно для слоя 0—10 м осенью и весной в квадратах 28 и 29, расположенных у Кавказского побережья. В летний же сезон здесь, на поверхности, значения щелочности в исследуемый период возрастали.

В целом по району Кавказского побережья можно утверждать о существовании тенденции к возрастанию щелочности в весенне-летний и

Таблица 14

Мелкомасштабное распределение щелочности (ммоль/л) и солености (‰) в августе 1977 г. в районе Туапсе (квадрат 29)

Номер последовательно отобранной пробы	Горизонт, м									
	0		10		20		30		40	
	Alk	S	Alk	S	Alk	S	Alk	S	Alk	S
1	200	17,51	202	17,52	203	17,81	205	18,16	205	18,41
2	201	17,43	202	17,49	203	17,88	204	18,23	206	18,39
3	200	17,45	202	17,47	203	17,85	205	18,19	206	18,34
4	200	17,49	202	17,56	203	17,83	204	18,17	205	18,35
5	201	17,45	201	17,49	203	17,72	204	18,21	206	18,43
6	201	17,29	202	17,51	203	17,81	205	18,14	206	18,41
7	201	17,42	203	17,52	205	17,79	207	18,75	208	15,37
8	200	17,49	203	17,51	205	17,85	207	18,16	208	18,41
9	200	17,47	203	17,51	205	17,85	205	18,10	206	18,34
10	201	17,52	203	17,65	204	17,79	205	18,16	206	18,34
11	201	17,51	203	17,52	204	17,83	205	18,10	206	18,30
12	201	17,49	203	17,52	204	17,96	205	18,07	206	18,34
13	204	17,56	204	17,58	204	17,74	205	18,12	206	18,30
14	201	17,49	204	17,61	205	17,78	206	18,10	206	18,28
15	203	17,52	203	17,67	204	17,88	206	18,10	207	18,32
16	203	17,51	204	17,52	205	17,74	206	18,14	207	18,32
17	203	17,56	204	17,58	205	17,61	206	18,12	207	18,34
18	203	17,58	204	17,63	205	17,94	206	18,25	207	18,32
19	202	17,58	204	17,67	204	17,88	206	18,14	207	18,34

Примечание. Дискретность измерений — 4 ч.

снижению ее в осенне-зимний сезоны. Тренд в поверхностном слое вод квадрата 24, расположенного у берегов Крыма, свидетельствует о снижении щелочности в зимний период.

В северо-западном районе моря в целом наблюдалось слабое возрастание щелочности за 1979—1982 гг. В отдельных же квадратах этого

Таблица 15

Тренды щелочности в период 1979—1982 гг., ммоль/л

Номер квадрата	Горизонт, м	Количество наблюдений	Коэффициент тренда	Критерий Фишера	Значимость тренда, %
		Зима			
42	0	11	—0,305	5,5	95
2	20	26	—0,488	11,7	99
1	20	11	1,831	7,0	95
24	0	25	—0,366	7,2	95
		Весна			
71	0	46	2,441	141	99
	10	29	3,661	46	99
	20	19	5,797	28	99
28	0	21	—0,183	6,2	95
86	0	41	2,014	28	99
	10	28	3,661	38	99
	20	7	1,594	6,2	95
1	0	52	0,976	53	99
	10	42	1,159	33	99
		Лето			
71	0	23	3,051	22	99
	10	15	4,271	16	99
	20	7	10,984	9	95
28	0	15	0,976	21	99
1	0	42	0,610	5,2	95
	10	37			
		Осень			
29	0	25	—0,549	6,7	95
	10	7	—2,441	23	99
4	10	51	0,183	8,9	99
10	0	26	—0,549	23	99
Северо-западный район	Вся толща вод	430	0,061	47	99

района существовала тенденция, аналогичная районам Крымского и Кавказского побережий, т. е. зимой и осенью щелочность постепенно уменьшалась, а весной и летом увеличивалась. Щелочность в этом районе изучалась также М. А. Добржанской [65].

Фактическая независимость распределения щелочности от солености и наличие устойчивых закономерностей ее распределения в море в определенной мере объясняются многочисленными работами, выполненными в более ранние периоды исследований. Так, Ю. Н. Сорокин [161] полагает, что между щелочностью и соленостью существует прямая зависимость, но изменение соотношения между ними по вертикали является следствием активных биохимических процессов, протекающих в толще вод, таких как деструкция органического вещества, восстановление сульфатов, окисление сероводорода.

Согласно работам [81, 83], в районе Кавказского побережья поверхностный слой во все сезоны года заметно пересыщен углекислотой. По-видимому, в результате интенсивного вертикального обмена на поверхности оказываются обогащенные CO_2 подповерхностные воды. С другой стороны, интенсивный прогрев вод на поверхности вызывает, особенно в летний период, выделение CO_2 из воды в атмосферу из-за понижения растворимости углекислоты и, несмотря на интенсивный фотосинтез, значение парциального давления CO_2 в воде на поверхности выше атмосферного. Таким же образом распределяется щелочность в этом районе, так как между парциальным давлением углекислоты и щелочностью существует прямая зависимость [81, 83]. В общем случае [27] щелочность обусловлена процессами, влияющими на изменение состава морской воды, в частности, поступлением материковых вод со своеобразным, отличным от морского, соотношением основных ионов, удалением или разложением карбоната кальция, процессами жизнедеятельности.

На распределение щелочности в толще вод черноморской котловины наибольшее влияние оказывает циркуляция вод в море. Она характеризуется наличием общего циклонического движения трофических вод и общего антициклонического движения вод во всей глубинной области моря, существованием многих встречных горизонтально направленных винтообразных движений вод в промежуточной зоне и наличием в различных частях моря локальных районов с квазистационарными нисходящими и восходящими перемещениями вод как в трофической, так и в глубинной областях моря [26].

Горизонтальное распределение щелочности в толще воды до 500 м более или менее согласуется с характером течений. В слое 0—200 м в зонах конвергенций наблюдаются повышенные значения щелочности, в зонах дивергенции — пониженные. На глубинах 100—1000 м распределение щелочности имеет обратный ход: в зонах конвергенций она понижается, а в зонах дивергенций повышается [44]. Поскольку в Черном море щелочность определяется главным образом карбонатными и бикарбонатными анионами, то на поверхности с интенсификацией фотосинтетических процессов увеличивается количество CO_3^{2-} вследствие уменьшения CO_2, то же происходит с повышением температуры воды, т. е. в летнее время увеличивается содержание CO_3^{2-} и уменьшается содержание HCO_3^-. По вертикали это явление наблюдается до 25 м, ниже постепенно доминируют процессы дыхания, и в глубинных водах равновесие смещается в сторону бикарбонатов. Вследствие влияния мощного речного стока щелочность в верхнем слое моря превышает щелочность океанских вод и составляет в среднем 201,4 ммоль/л [106]. На нижних горизонтах щелочность превышает 244 ммоль/л. По вертикали от поверхности ко дну щелочность уменьшается до минимума в слое 75—125 м [106]. Минимальные значения щелочности в этом слое обусловлены одновременным присутствием кислорода и сероводорода. В результате их взаимодействия сероводород окисляется до тиосульфатов, сульфатов и сульфитов, что приводит к увеличению кислотности среды и уменьшению, следовательно, значения щелочности.

На глубине ниже 200 м значения щелочности нарастают в результате того, что в глубинных водах моря протекают процессы сульфат-редукции с образованием сероводорода и бикарбонатов.

Имеющиеся в придонном слое бикарбонаты и гидросульфиды как соли слабых кислот гидролизуются со щелочной реакцией. Росту щелочности в глубинных водах способствует наличие взвешенных карбонатных частиц, переходящих под воздействием CO_2 в растворимые бикарбонаты. Карбонатные взвеси образуются в поверхностных слоях моря при физико-химических и биохимических процессах, поступают с речным стоком, эоловыми осадками, разносятся течениями от разрушающихся берегов и от мелководья, где волны перетирают ракушу [50].

По мнению ряда исследователей [25], причинами колебаний в распределении гидрохимических элементов являются периодичность солнечной активности и изменение общей циркуляции атмосферы. С усилением солнечной активности увеличивается фотосинтетическая активность фитопланктона, усиливается сульфат-редукция, увеличивается количество органического вещества, поставляемого в сероводородную зону. Все эти факторы, как упоминалось ранее, оказывают влияние на щелочность.

Какая-либо корреляционная зависимость между значениями щелочности и речным стоком в водах Кавказского побережья в период 1958—1982 гг. не прослежена ($r = 0{,}1$). В то же время в северо-западном районе $r = 0{,}4$ между этими же показателями ($Alk = 57{,}97 + 117{,}77[x]$, где Alk и x — соответственно значения щелочности и речного стока).

2.7. Содержание и распределение бора

Схема расположения станций представлена на рис. 9. По данным работы [136] концентрация неорганического растворенного бора и отношение $B \cdot 10^4/Cl$ были переменны в период исследований. На большинстве станций отношение $B \cdot 10^4/Cl$ было больше 2,30, а концентрация неорганического растворенного бора составляла более 2,10 мг/л (интервал концентраций 2,15—3,09 мг/л, а отношение $B \cdot 10^4/Cl$ 2,30—3,13). Средние значения этих величин составляли соответственно 2,36 и 2,37 мг/л.

В водах с относительно низким отношением B/Cl ($B \cdot 10^4/Cl < 2{,}30$) концентрация растворенного неорганического бора менялась в интервале 1,83—2,10 мг/л при среднем значении 2,04 мг/л, а $B \cdot 10^4/Cl = 1{,}84 \ldots 2{,}30$ при среднем значении 2,18. Воды с данными характеристиками прослежены у западного побережья моря и у побережья Крыма. Низкие значения отношения B/Cl и концентрации бора более характерны для поверхностных вод.

На станции у побережья Румынии в пробах воды были найдены сравнительно низкие концентрации бора и высокие отношения B/Cl. На поверхности в воде содержалось 2,00 мг/л растворенного неорганического бора при $B \cdot 10^4/Cl = 2{,}40$, а на глубине 10 м — 2,16 мг/л бора и $B \cdot 10^4/Cl = 2{,}70$.

Максимальной концентрации бора (3,09 мг/л) на одной из станций района в поверхностном слое отвечало максимальное отношение B/Cl ($B \cdot 10^4/Cl = 3{,}10$).

В ранее выполненных работах по распределению общего бора [43] также находили высокие значения B/Cl ($B \cdot 10^5/Cl = 29$ при колебаниях в основном в пределах 25,5—28,5). Но эти данные характеризовали обширную акваторию Черного моря.

При анализе 61 пробы взвешенного вещества на ядерных фильтрах в 6 пробах было обнаружено 0,01 мг/л бора, в 33 пробах — следы бора (0,001—0,007 мг/л) и в 22 пробах бор не был обнаружен.

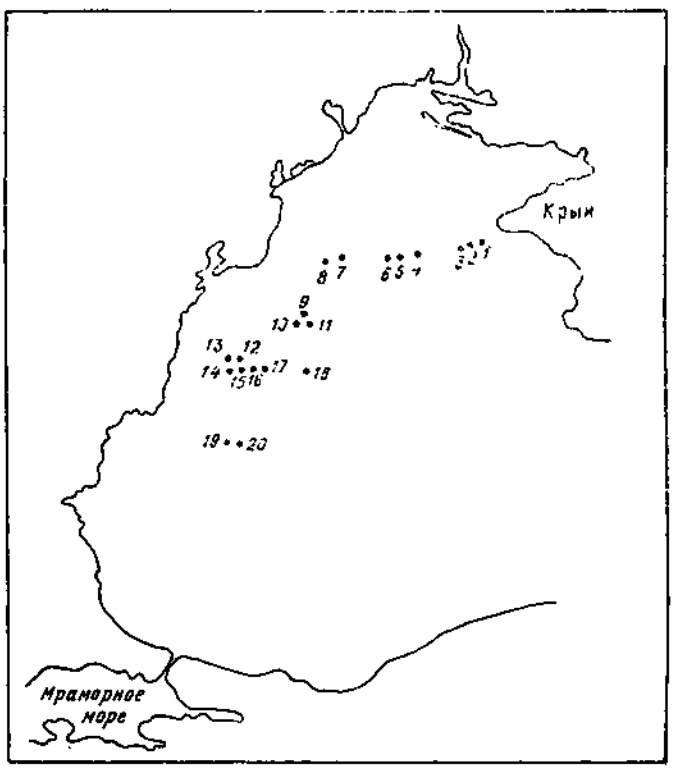

Рис. 9. Схема расположения и номера станций при исследовании распределения бора.

Взвешенная форма бора была найдена в пробах поверхностной воды на станциях, прилегающих к берегам.

В органическом веществе бор был определен только в 3 пробах из 61 в количестве 0,01 мг/л. В остальных пробах бор отсутствовал. Следовательно, в северо-западном районе Черного моря, имеющем относительно высокую продуктивность, преобладает растворенная неорганическая форма бора.

2.8. Вопросы о точности определения солености

Соленость определяется из данных по хлорности с использованием соотношения $S‰ = 1{,}80655Cl$ [26], где Cl — хлорность (‰). Это соотношение постулирует постоянство относительного макросолевого состава вод Черного моря и, таким образом, позволяет представлять значения солености с высокой степенью точности. Однако с этим выводом не согласуется вывод исследований по распределению в водах моря величин $[Ca^{2+}]/Cl$, $[Mg^{2+}]/Cl$, $[SO_4^{2-}]/Cl$ (в скобках — концентрация ионов), показывающих, что отношения концентраций ряда главных ионов к хлорности не постоянны в пределах, превышающих ошибки аналитических методик, например, работы [28, 150, 187]. Степень

точности отношения S/Cl и влияние степени изменчивости, например, отношений $[Ca^{2+}]/Cl$ и $[Mg^{2+}]/Cl$ в толще вод моря на значения солености, определяемой из данных по хлорности, в современный период не оценивались. Частично такие задачи решались ранее Бруевичем в работе [28], в которой анализировались данные различных авторов о значениях отношений макроионов и хлорности к солености, и получены выводы о качественном различии в относительном солевом составе между поверхностными (0—100 м) и глубинными (100—2000 м) водами.

Из данных табл. 7 следует, что в 17 пробах воды из 28 исследованных разность $S_n - S_x$ превышает ошибку анализа и составляет 0,04 ‰ и более, где S_n — соленость, определенная гравиметрическим методом, и S_x — соленость по работе [125]. Характерно, что различия между S_n и S_x были свойственны всем горизонтам по акватории моря и достигали 0,17 ‰ (видимо, этот предел не максимален). Однако выделяются районы глубоководных станций 39, 49 и мелководной станции 3, воды которых по показателю $S_n - S_x$ существенно отличаются от других исследованных районов, а именно: здесь наблюдались постоянно высокие значения $S_n - S_x$. Из 11 проб воды, в которых значения S_n и S_x практически совпадают, только две пробы относятся к поверхностному слою воды (0—0,5 м). Таким образом, заметные различия между S_n и S_x свойственны в большей мере поверхностным, а не глубинным водам. Однако и для глубинных, и придонных вод на станциях 5, 39, 49 (горизонты 60, 100, 1960 и 2130 м) имелись существенные отклонения значений S_x от S_n. Из анализа разности $S_n - S_x$ следует, что использование данных по S_x и S_n для расчетов, например, степени насыщенности вод растворенным кислородом ведет к определенным расхождениям, достигающим 0,2—0,4 % при значении $S_n - S_x = 0{,}2$ ‰. Расхождение будет существенно возрастать при уменьшении степени насыщенности вод растворенным кислородом. Расхождения в расчетах условной плотности σ_t при том же значении S_n достигают 1—1,5 %. Таким образом, поскольку S_n является истинной в пределах точности анализа соленостью, следует признать, что существующий метод определения солености S_x требует корректировки. Вместе с тем этот метод дает возможность правильно отражать закономерности распределения солености в Черном море, так как аналитические расхождения ($S_n - S_x$) не превосходят естественных градиентов солености в море.

Причины, порождающие появление $S_n - S_x$, выявляются при рассмотрении распределения отношения S_n/Cl (табл. 7). Как видно, отношение S_n/Cl не является постоянной величиной и колеблется в пределах 1,7931—1,8141. По-видимому, этот предел нельзя принимать за максимальный вследствие ограниченности ряда наблюдений. Однако среднее значение S_n/Cl для моря в целом, рассчитанное по нашим данным, близко к принятому в работе [119] и составляет 1,8062. При этом максимальные и минимальные значения S_n/Cl были присущи пробам поверхностных вод (станции 37 и 22), но и в глубинных водах (станции 39 и 49) значения этого отношения существенно отличались от среднего. Из данных табл. 7 видно, что изменчивость отношения S_n/Cl свойственна водам всех исследованных районов моря. Вместе с тем при получении большего числа наблюдений значение 1,8062 может измениться в ту или другую сторону даже в третьем знаке, поэтому в настоящее время достоверным следует считать значение S_n/Cl, равное 1,80, и при использовании для изучения полей солености метода ее расчета по хлорности целесообразно применять именно эту цифру. Для решения

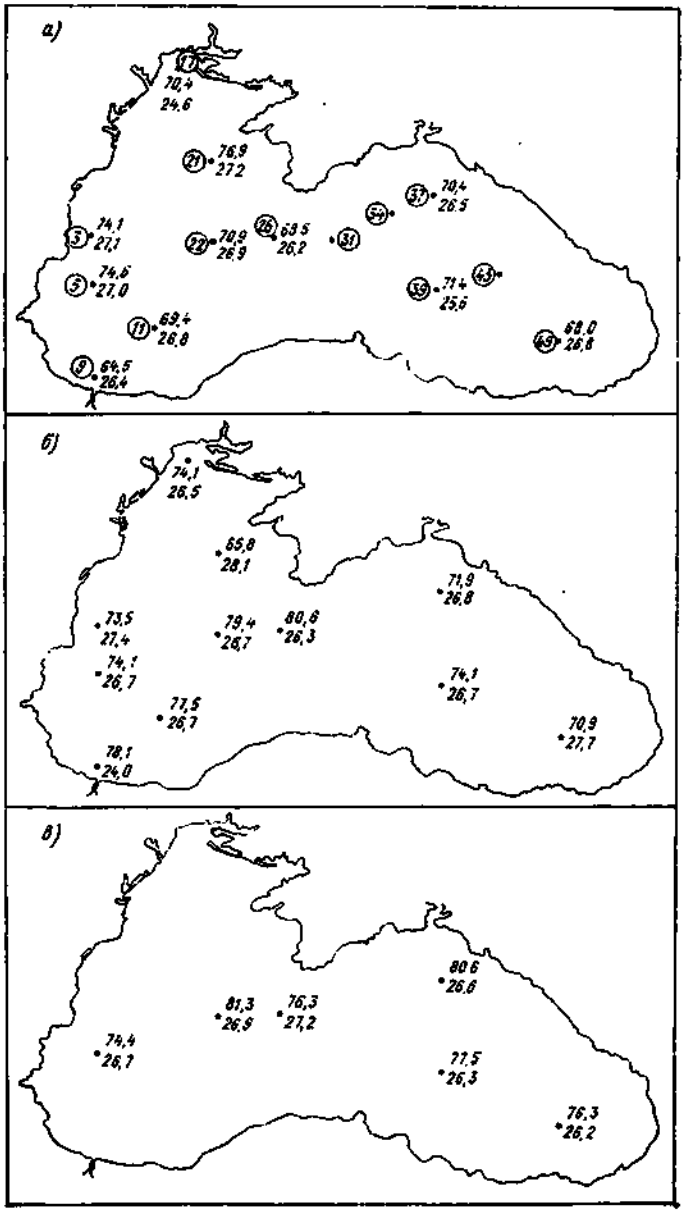

Рис. 10. Схема расположения станций и распределение значений $S_n/[Ca^{2+}]$ и $S_n/[Mg^{2+}]$.

а — поверхностный слой; *б* — 100 м, *в* — глубинный горизонт, в кружках — номера станций; первая строка — $S_n/[Ca^{2+}]$; вторая строка — $S_n/[Mg^{2+}]$.

океанографических задач в Черном море, требующих данных по солености с более высокой точностью, необходимо пользоваться гравиметрическим методом. Таким образом, изменчивость отношения S_n/Cl непосредственно свидетельствует о непостоянстве химического состава по главным ионам солевой массы, растворенной в водах Черного моря.

Количественная характеристика изменчивости относительного ионного состава солевой массы вод Черного моря, оцененная значениями коэффициентов корреляции между отношениями $[Э]/Cl$ и ΔS

([Э] — концентрация ионов Mg^{2+}, Ca^{2+}) и значениями коэффициентов корреляции между Cl и Sr, не дает возможности выявить приоритета какого-либо иона во влиянии на величину ΔS. Так, например, коэффициенты корреляции между $[Mg^{2+}]/Cl$ и ΔS составляют 0,04, между $[Ca^{2+}]/Cl$ и ΔS — 0,13. Следовательно, значения ΔS определяются алгебраическими суммами изменчивостей относительных концентраций главных ионов.

Эти выводы обосновываются и представленными на рис. 10 данными по распределению значений $Sr/[Ca^{2+}]$ и $Sr/[Mg^{2+}]$, которые свидетельствуют о существенной пространственной изменчивости обоих отношений по акватории моря и по глубине аналогично изменчивости отношения Sr/Cl. Пространственная изменчивость обоих отношений, оцениваемая превышением максимального значения над минимальным (в процентах), составляет в поверхностном слое соответственно 10,5 и 20, в слое 22—100 м — соответственно 16 и 21, в глубинном слое — 4 и 10. Из этого видно, что в период исследований изменчивость солености относительно $[Mg^{2+}]$ более значительна по сравнению с ее изменчивостью относительно $[Ca^{2+}]$. Корреляция между обоими отношениями практически отсутствует. Например, в поверхностном слое высокие значения $Sr/[Ca^{2+}]$ наблюдались в пробах воды, содержащих низкие значения $Sr/[Mg^{2+}]$ (станции 17, 39), а в пробе воды (ст. 9) были низкие значения $Sr/[Ca^{2+}]$ и высокие значения $Sr/[Mg^{2+}]$. Вместе с тем в пробах воды (станции 3, 5, 21) наблюдались высокие значения обоих отношений. Кроме изменчивости пространственного распределения этих отношений существует также их динамика во времени (см. табл. 7), которая ранее не изучалась.

Можно полагать, что существует несколько причин, формирующих пространственно-временную динамику химического состава солевой массы черноморских вод по хлорности, кальцию, магнию и также борат-ионам. Изменчивость химического состава солевой массы по перечисленным компонентам, свойственная водам поверхностного слоя моря, формируется, по-видимому, под воздействием изменяющегося речного и атмосферного стока и водообмена с сопредельными морями. Так, по данным работы [24], уровень моря растет на 10—15 см/100 лет. Несмотря на зарегулирование и изъятие на хозяйственные цели части стока рек, впадающих в Черное море, в многолетнем ходе речного стока отмечен положительный тренд [5] с угловым коэффициентом 0,55 км³/год. Аналогичная тенденция характерна и для количества атмосферных осадков, хотя в многолетнем ходе объема осадков тренд количественно не выявлен. В ходе объема испарения отмечен [5] отрицательный тренд с угловым коэффициентом 0,71 км³/год. Эти факторы определили направление процесса распреснения поверхностных вод Черного моря в слое 0—50 м. Оно составило до 0,5‰ за период с 1960 по 1980 г. в северо-западной части при межгодовых колебаниях от 15 до 18‰ [6]. Динамика же химического состава солевой массы, растворенной в глубинных водах, наблюдавшаяся, например, на станциях 9, 21, 39, 49, вероятно, определяется влиянием как водообмена с сопредельными морями, так и субмаринной разгрузкой вод и биогеохимическими процессами обмена веществ на границе вода—дно, вода—живое вещество.

В последние 20 лет наблюдалось увеличение солености вод Черного моря в области постоянного галоклина и непосредственно под ним [6] при среднем притоке вод из Мраморного моря за этот же период времени (181 км³/год) [5]. Положительная тенденция в многолетних изменениях солености вод северо-западной части моря, расположенных под верхним галоклином, явилась неизбежным следствием тенденции распреснения вышележащих вод, увеличением плотностной стратификации, затормаживанием вертикального обмена солями.

3. ВОДОРОДНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ

Введение

Факторы формирования водородного показателя. В то время как абсолютное содержание иона водорода по сравнению с другими ионами ничтожно (10^{-7} — 10^{-8} моль), он играет очень важную роль во многих химико-биологических процессах, протекающих в морской воде. Концентрация ионов водорода занимает чуть ли не последнее место, уступая многим редко встречающимся в воде микроэлементам. Роль ионов водорода определяется прежде всего тем, что образовавшиеся протоны при диссоциации в водных растворах многих кислот и их производных связаны с ними в единую систему. Это позволяет по концентрации ионов водорода рассчитать концентрации других компонентов. Так, протон определяет поведение анионов слабых кислот, таких как SO_3^{2-}, CO_3^{2-}, PO_4^{3-}, S^{2-}, SiO_4^{2-}, BO_3^{3-} [173].

Ион водорода всегда присутствует в природной воде, поскольку сама вода является слабым электролитом, диссоциирующим с образованием протона и иона гидроксила.

Концентрация протонов в водном растворе, независимо от их происхождения, всегда определяется ионным произведением воды, которое показывает, что произведение концентрации ионов водорода (в молярной форме) и гидроксильных ионов (в молярной форме) всегда равняется постоянной величине — константе диссоциации воды при постоянной температуре. Согласно работе [172], эта константа увеличивается примерно в 85 раз при изменении температуры воды от 0 до 60 °С.

Принятыми методами определяют не истинную концентрацию ионов водорода в водных растворах, а их термодинамическую активность (aH). Чем выше концентрация прочих ионов в растворе, тем больше расхождение между концентрацией и активностью ионов водорода. Коэффициент активности, связывающий концентрацию и активность, определяется опытным путем или рассчитывается по формулам [3].

Для решения определенных гидрохимических задач нужна именно активность ионов. Поэтому в расчетах по величинам $[H^+]$ и pH подразумевается реально определенная aH^+ и pH.

В природной высокоминерализованной воде концентрация протонов зависит еще и от диссоциации и гидролиза других соединений. Большое значение имеют анионы угольной кислоты, двуокись углерода, а другие слабые кислоты из-за их малых концентраций играют незначительную роль в формировании pH. Углекислый газ растворяется в воде до наступления равновесия с образованием угольной кислоты и диссоциации последней по схеме:

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons H^+ + HCO_3^-;$$

$$HCO_3^- \rightleftharpoons H^+ + CO_3^{2-}.$$

Из рассмотрения уравнений диссоциации, имеющих константы диссоциации K_1 и K_2, следует, что

$$aH^+ = \frac{aH_2CO_3}{aHCO_3^-} K_1 \quad \text{и} \quad aN^+ = \frac{aHCO_3^-}{aCO_3^{2-}} K_2.$$

Поэтому aH^+ прямо пропорционально aH_2CO_3 и обратно пропорционально $aHCO_3^-$, величина же pH, очевидно, прямо пропорциональна $aHCO_3^-$ и обратно пропорциональна aH_2CO_3.

Ионы HCO_3^- в природных водах в основном образуются не за счет диссоциации H_2CO_3, а при диссоциации гидрокарбонатов $Ca(HCO_3)_2$ и $Mg(HCO_3)_2$, которая, увеличивая концентрацию гидрокарбонатного иона, уменьшает концентрацию ионов водорода в соответствии с уравнением гидролиза:

$$HCO_3^- + H_2O \rightleftharpoons H_2CO_3 + OH^-.$$

Следовательно, для поверхностных вод, в которых содержание двуокиси углерода небольшое, характерна слабощелочная реакция. В присутствии уже небольших количеств HCO_3^- значение pH воды повышается и для природной воды, CO_2 которой находится в равновесии с атмосферой, достигает уже 8,3 при содержании HCO_3^- 61,02 мг/л [3].

Другим источником ионов водорода является гидролиз солей тяжелых металлов, который особенно значителен, когда катионы имеют степень окисления >2 [173].

На изменение pH влияют процессы окислительной деструкции органического вещества вследствие происходящего при этом увеличения содержания угольной кислоты. Поэтому значения pH в поверхностных слоях воды зависят и от интенсивности освещенности и температуры.

В фотическом слое на динамику pH влияет процесс фотосинтеза. С 1938 г. известен метод определения интенсивности фотосинтеза по изменению pH среды, однако причины этих изменений и сейчас недостаточно ясны.

Согласно хемосинтетической гипотезе Митчела при фотосинтезе происходит поглощение протонов, а при дыхании — выделение. Вероятно, сдвиг pH происходит по нескольким причинам, в том числе за счет поглощения протонов и углекислоты. Соотношения между процессами фотосинтеза и дыхания отражены в суточных изменениях значений pH в поверхностных водах моря. Так, в сентябре 1964 г. в прибосфорском районе (квадрат 73) были выполнены шестисуточные наблюдения за водородным показателем на семи горизонтах от 0 до 100 м (рис. 11). Наряду с ожидаемым увеличением pH в дневное время суток в двух случаях из шести наблюдалось отсутствие существенных изменений pH. Это может быть связано с процессами, влияющими на интенсивность фотосинтеза, например, с наличием сплошной облачности над районом исследования.

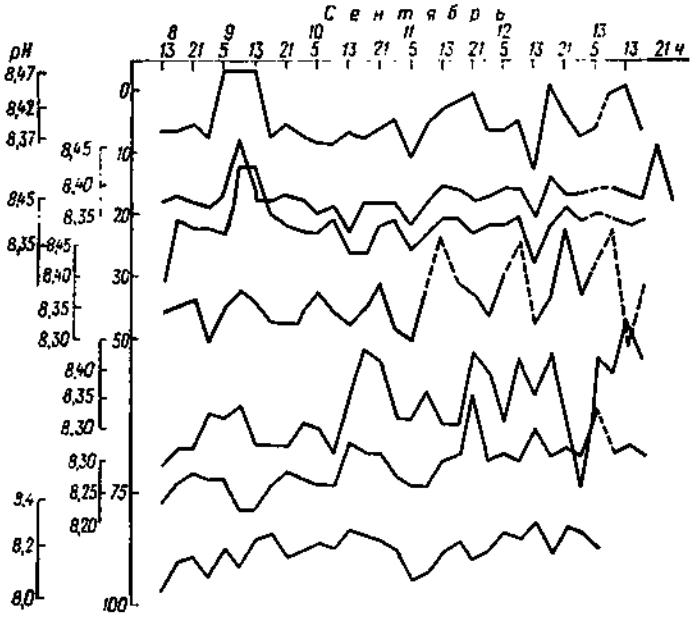

Рис. 11. Изменение значений pH на многосуточной станции в прибосфорском районе в сентябре 1974 г.

Для глубинных вод Черного моря характерна зависимость значений pH от содержания сероводорода, так как источником протонов являются продукты окисления сероводорода кислородом в зоне их сосуществования по реакции

$$H_2S + 2O_2 \longrightarrow 2H^+ + SO_4^{2-}.$$

Одним из факторов, формирующих значение pH, является также окисление аммонийного азота до нитратов по реакции

$$NH_4^+ + 2O_2 \longrightarrow H_2O + 2H^+ + NO_3^-.$$

В фотическом слое на динамику pH влияет процесс фотосинтеза [103] вследствие реакции

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow[\text{хлорофилл}]{\text{свет}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2 - 2821{,}9 \text{ Дж}.$$

Некоторые исследователи [3, 25] отмечают корреляцию pH с изменениями концентрации угольной кислоты (в обратной зависимости), кислорода (в прямой зависимости), с соленостью (в обратной зависимости), и поэтому pH может служить хорошим показателем происходящих в воде окислительных и восстановительных процессов.

Кроме вышеназванных факторов, распределение pH по горизонтали и вертикали зависит от горизонтального и вертикального перемешивания вод. Речной сток, имеющий место в северо-западной, восточной и южной частях моря, повышают pH морской воды в силу повышенных значений концентраций HCO_3^-. Алмазов [4] отмечает, что в

водах Дуная слабо развит фитопланктон, следовательно, интенсивность процессов фотосинтеза в дунайской воде невелика, отсюда повышенные значения концентрации HCO_3^- и повышенные значения pH.

Зависимость химического состояния элементов от pH воды иллюстрируется на примере фосфора по данным Б. А. Скопинцева. Так, основной формой неорганического фосфора в морской воде при pH выше 6,5 является HPO_4^{2-}, что вычислено из значений K_1, K_2, K_3 фосфорной кислоты [150]. По значению pH можно рассчитать соотношение в морской воде ионных форм кремниевой кислоты [134], гидроокисей металлов [160], а также форм содержания в растворе микроэлементов [76, 115, 144].

Историческая справка. Систематическое определение значений водородного показателя началось в 20-е гг. нашего столетия во время рейсов океанографической экспедиции Черного моря Гидрографического управления морского министерства совместно с Севастопольской биологической станцией Академии наук под руководством Ю. М. Шокальского.

Для этого времени, в 90-х гг. прошлого столетия, имели место лишь отдельные определения pH, связанные с установлением причин сероводородного заражения Черного моря. В экспедиции Ю. М. Шокальского ее участниками (П. Т. Данильченко и Н. И. Чигириным) были определены пределы колебаний pH для Черного моря. Значения pH изменялись от 8,38 до 7,48. Чигирин [176] указывал, что на поверхности моря наиболее часто встречаются значения 8,31—8,33. С глубиной pH убывает, достигая на глубине около 60—75 м минимума, равного 7,60—7,70, а затем незначительно увеличивается и на глубинах 125—225 м pH становится почти постоянной — 7,71—7,73. Ниже 225 м pH постепенно убывает, достигая в придонных областях на глубинах 2000 м в среднем 7,60. Однако данные, полученные в экспедиции Шокальского, не давали возможности судить о распределении и режиме гидрохимических компонентов воды Черного моря, в том числе значений pH, о причинах, их обусловливающих. Чигирин [174] отмечал, что значение pH и его распределение в Черном море обусловлены особенностями распределения свободной угольной кислоты и ее солей.

С. В. Бруевич ввел солевые и температурные поправки, приведшие первые результаты определения pH к общепринятой форме выражения [28]. Он же отметил зависимость значений pH от сезона года. По данным Гололобова [45], в восточной половине Черного моря (Ялта — Батуми) значения pH колебались в августе 1948 г. от 8,34 на поверхности до 7,82 у дна на глубине 2000 м.

В западной половине моря (на юго-запад от м. Сарыч) в апреле 1949 г. были получены более низкие значения pH в слое 0—25 м: 8,24—8,28, а на глубине 1500 м — 7,62.

М. А. Добржанская [70] отмечала, что сезонные колебания pH в центральных районах заметны до глубины 50—60 м; в прибрежной полосе, а также на мелководье — несколько глубже. Максимальные значения pH (8,45) наблюдаются в апреле—мае в верхних горизонтах открытого моря, минимальные (8,25) — в конце лета и зимой. Сезонные изменения pH определяются, с одной стороны, интенсивностью перемешивания вод и контактов их с атмосферой, в результате чего содержание угольной кислоты в воде приходит в равновесие с концентрацией CO_2 в воздухе. С другой, pH зависит и от биологических процессов — дыхания и фотосинтеза. Последний фактор четко прослеживается в суточных колебаниях pH, особенно резко выраженных в прибрежной полосе, в участках, защищенных от волнения, в зарослях макрофитов. В этих случаях днем, в период энергичного фотосинтеза, по наблюдениям Тиховской [165], pH повышается до 9,00 и даже выше, ночью падает до 8,20—8,30.

Значения pH и характер распределения по вертикали в Черном море весьма отличаются от таковых в океане. По данным Скопинцева [150], в поверхностных водах Черного моря значения pH выше значений pH в водах Мирового океана на 0,10—0,30. В глубинных же слоях, напротив, pH в черноморских водах на 0,3 ниже pH тихоокеанских вод, что объясняется особенностями карбонатной системы Черного моря.

3.1. Материалы наблюдений. Аналитические методы

Материалы наблюдений представлены в табл. 16.

Аналитические методы. Для определения pH существуют два основных метода: колориметрический и потенциометрический (электрометрический) [125, 126].

До середины 60-х гг. в экспедиционных исследованиях применялся колориметрический метод с визуальным окончанием. Этот метод отличается большой простотой. Так, в экспедиции Ю. М. Шокальского значения pH определялись по Мак-Клендону с применением боратных буферных смесей и индикаторов тимоловым синим, меняющим окраску от 8,20 до 9,20, и крезоловым красным — от 7,60 до 8,20, дробность шкалы — 0,05. Значения pH выражались в единицах Сёренсена. Метод основан на изменении окраски индикатора в зависимости от pH воды. Полученную окраску исследуемой воды сравнивали с цветовой шкалой. Со временем колориметрический метод совершенствовался, шкала готовилась с интервалом 0,02. При большом опыте работы такая шкала позволяет определять интерполяцией значение pH с точностью до 0,01.

Для оценки степени влияния визуальности сравнения окрасок на ошибки при колориметрическом определении pH Богоявленским [23] параллельно были проведены колориметрические определения pH со спектрофотометрическим окончанием. Оказалось, что фотометрическое определение pH безбуферным методом имеет лучшую воспроизводимость, чем визуальное. Однако этот метод является недостаточно точным, требует введения солевых и температурных поправок.

В настоящее время в большинстве морских экспедиций определение pH проводится потенциометрически со стеклянным индикаторным электродом, где за исходные стандарты приняты буферные растворы, pH которых выражено в единицах активности. Такая шкала выражения pH принята

Таблица 16

Материалы наблюдений pH

Год	Месяц	Подразделение	Район наблюдений	Число наблюдений
1950	X	МГС «Туапсе»	Разрезы от п. Туапсе, м. Кодош	21
1951	III	МГС «Туапсе»	Разрезы от п. Туапсе, м. Кодош	32
1954	IX	ГМО ЧАМ	Южное побережье Крыма	34
1957	III—IV, VI—VIII, IX, X—XII	МГС «Туапсе»	Разрезы от п. Туапсе, м. Кодош	312
	II, IX	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма, 30-мильный разрез от п. Ялта	40
1958	X, XII	МГС «Туапсе»	100-мильный разрез от м. Кодош	86
	X	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	85
1959	IV	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	73
	IV—VI	МГС «Одесса»	Северо-западный район	71
	III, VII, IX	ГМО ЧАМ	Разрезы от м. Херсонес, м. Херсонес — прол. Босфор — Синоп, Керченский пролив, м. Херсонес — прол. Босфор	355
1960	II, III, IV, V	ГМО ЧАМ	Северо-западный район, разрез м. Херсонес — прол. Босфор — Синоп — Керченский пролив	902
	VI, VII, IX, X, XII	МГС «Одесса»	Северо-западный район	260
	I, II, IV	МГС «Ялта»	Разрезы Ялта — море, 20 и 50 миль на юго-восток	70
1961	III, V	ГМО ЧАМ	Разрезы Ялта — море — 100 миль на юго-восток м. Херсонес — прол. Босфор — Синоп — Керченский пролив	503
	I	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	50
1962	I, II, X, XI	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	92
	XI—XII	ГМО ЧАМ	Разрез м. Херсонес — 100 миль	83
1963	V, VIII, XI	ГМО ЧАМ	Разрез м. Херсонес — прол. Босфор	229
	XI	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	22
1964	II, V, VIII, IX, XI, XII	ГМО ЧАМ	50-мильный разрез от м. Херсонес, 100-мильный разрез от м. Херсонес на юго-запад, прибосфорский район, разрез м. Херсонес — прол. Босфор, разрез Ялта — море	1281
	I, II, V	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	110
1965	II, VIII, XI	ГМО ЧАМ	Прибосфорский район, разрез м. Херсонес — прол. Босфор, 50-мильный разрез от м. Херсонес	447
	V, VIII	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	129
1966	II	МГС «Туапсе»	100-мильный разрез от м. Кодош	59
	XI	МГС «Ялта»	50-мильный разрез Ялта — море к востоку-юго-востоку	19
	VIII	МГС «Опасное»	Прикерченский район	54
	III, V, VIII, XI	ГМО ЧАМ	Прибосфорский район, разрезы м. Херсонес — прол. Босфор, 100-мильный разрез от м. Херсонес	729
1967	VIII	МГС «Туапсе»	Разрез от м. Кодош	76
	VIII	МГС «Ялта»	Разрез от п. Ялта	59
	V, VIII	ГМО ЧАМ	Разрезы: 100 миль от м. Херсонес, 50 миль от п. Ялта, м. Херсонес — прол. Босфор	456
1968	VIII, XI	ГМО ЧАМ	Разрезы: м. Херсонес — прол. Босфор, Ялта — море	220
	VIII	МГС «Опасное»	Прикерченский район	47
1969	II, V, VII, VIII, XI	ГМО ЧАМ	Разрезы: м. Херсонес — прол. Босфор — м. Унье, м. Херсонес — прол. Босфор, м. Херсонес — 100 миль, м. Кодош — м. Унье, Ялта — море, 50 миль, северо-западный район	1189
	VIII, XI	МГС «Опасное»	Разрез м. Такиль — море	77
	V, VII, VIII, X, XI	Дунайская ГМО	Северо-западный район	597
1970	III, VIII, XI, XII	ГМО ЧАМ	Разрезы Ялта — море 50 миль, м. Херсонес — 100 миль, м. Такиль — 50 миль, м. Кодош — 50 миль	359
	V, VII, IX, XI	Дунайская ГМО	Северо-западный район	359
	VII, VIII, XII	МГС «Одесса»	Северо-западный район	293
	I, III	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	61
1971	II, V, VIII, X, XI	СО ГОИН	Разрезы: Ялта — Синоп — Батуми, западный, северо-западный, Кавказское побережье, м. Херсонес — прол. Босфор, Ялта — море	1269
	V, VIII	МГС «Одесса»	Северо-западный район	143
	VIII	МГС «Жданов»	Разрезы от м. Дооб, п. Пицунда, м. Кодош	310
	V, VIII, IX	МГС «Туапсе»	Разрезы от п. Туапсе, м. Кодош	58
	V, VI, VII—IX, X, XI	Дунайская ГМО	Северо-западный район	805
	XI	МГС «Опасное»	Разрез от м. Такиль	22
1972	II, V—VIII, IX, XI	СО ГОИН	Разрезы от п. Ялта, м. Кодош, м. Херсонес, м. Такиль, м. Херсонес — прол. Босфор, все море	2171
	VI, VII, IX, XI	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	74
	VII, XI	ГМО «Батуми»	Кавказское побережье	78
1973	IV, VI, VIII, IX—XI	ГМС «Одесса»	Северо-западный район	455
	II, V	ГМО «Батуми»	Кавказское побережье	66
	III, V, VI, X, XI	Дунайская ГМО	Северо-западный район	468
	V, VIII, X—XI	СО ГОИН	Разрезы от п. Ялта, м. Херсонес — прол. Босфор, вся акватория	1254
	III, IV	МГИ АН УССР	Вся акватория	750

Продолжение табл. 16

Год	Месяц	Подразделение	Район наблюдений	Число наблюдений
1974	I, IV, VI	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	67
	VI, VIII, IX	СО ГОИН	Западный	334
	II, VI, VIII, X	Дунайская ГМО	Северо-западный район	652
	V, VI, VIII, IX, X	МГС «Одесса»	Северо-западный район	285
	V, VIII	МГС «Туапсе»	Разрез от м. Кодош	22
1975	III, XII	СО ГОИН	Южное побережье Крыма, восточный	325
	I, V, VIII	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	36
	II, VIII	МГС «Туапсе»	Разрез от м. Кодош	42
	I, VI, VIII, X	Дунайская ГМО	Северо-западный район	608
	VI—VIII	МГС «Одесса»	Северо-западный район	71
1976	VI, IX	СО ГОИН	Северо-западный, центральный районы	1361
	I, V, VIII, IX, XI	Дунайская ГМО	Северо-западный район	328
	V—XII	МГС «Одесса»	Кавказское побережье	1277
	II, XI	МГС «Батуми»	Грузинское побережье	134
1977	I, II, III	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	423
	I, IX, XI	Дунайская ГМО	Северо-западный район	228
	V, VIII, IX	МГС «Одесса»	Северо-западный район	245
	XII	ГМО «Батуми»	Восточный	119
1978	I, III, IV, V	МГС «Туапсе»	Кавказское побережье	245
1979	XI, XII	СО и ОдО ГОИН	Вся акватория	834
	IV, V, VI, VII, IX—XII	МГС «Одесса»	Северо-западный район	686
1980	X	СО и ОдО ГОИН	Вся акватория	200
	I, II	ГМО «Батуми»	Грузинское побережье	185
	V	Николаевская ГМО	Северо-западный район	37
	X	МГС «Одесса»	Северо-западный район	19
1981	II, V, VI, XI, XII	СО и ОдО ГОИН	Вся акватория, северо-западный район	1081
1982	II, III, V, VI, IX—XI	СО и ОдО ГОИН	Вся акватория, западный район	754
	III, IV, V, VII, VIII, IX, X	Дунайская ГМО	Северо-западный	584
	I—XII	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	668
1983	I, VI, VII, XI	СО и ОдО ГОИН	Вся акватория, м. Херсонес — прол. Босфор, центральный, восточный районы	451
	III, IV, VII, VIII, IX, XI	МГС «Одесса»	Северо-западный район	387
	I—IX	МГС «Ялта»	Южное побережье Крыма	447
1984	VIII, IX—XI	ОдО и СО ГОИН	Западный, вся акватория, юго-западный район	618
	IV—X	МГС «Одесса»	Северо-западный район	220
	I—VIII	Аджарская ГМО	Кавказское побережье	339
1985	I, II, III, IV—VI, X, XI	СО и ОдО ГОИН	Вся акватория, м. Херсонес — прол. Босфор	940

и стандартизирована во многих странах (Международная практическая шкала, ГОСТ 10110-63). Сопоставление результатов современных и предшествующих исследований при различных температурах и в различных растворах показало, что разница в определениях по этим двум шкалам лежит в пределах 0,02—0,05 ед. Учитывая точность определений, можно принять, что значение pH определенное по современной шкале, будет на 0,03 ед. выше, чем по шкале Сёренсена [30].

Главным преимуществом электрометрического метода является большая объективность, исключение солевой поправки, возможность проведения определений в мутных и окрашенных водах. Вместе с этим для получения надежных результатов при потенциометрических определениях требуется соблюдение ряда условий и введение некоторых поправок. Сущность метода состоит в измерении потенциала элемента, состоящего из двух электродов: индикаторного (стеклянного) и сравнительного (хлорсеребряного или каломельного). Метод является сравнительным из-за непостоянства потенциала стеклянного электрода. Однако этот потенциал линейно зависит от концентрации ионов водорода в растворе в диапазоне значений pH 1—10. На pH большое влияние оказывают температура и давление, а поскольку температура и давление in situ отличаются от условий, при которых проводят измерение pH, то полученные значения являются не корректными без учета поправок [126]. Обычно вводят только температурную поправку, так как гидростатическое давление оказывает существенное влияние на pH на глубинах более 2500 м, какие в Черном море не встречаются. Удобным является способ измерения pH при постоянной и контролируемой температуре, для чего пробу термостатируют. Температура пробы и буферных растворов не должна отличаться более чем на 2 °C. В этом случае вводят температурную поправку [109]. Эта методика справедлива для всех пределов солености и температуры.

3.2. Распределение водородного показателя

Хорошо изученными районами являются воды восточного побережья моря, Южного берега Крыма, северо-западного района [рис. 12]. Общее число определений pH в море на поверхности за период 1950—1985 гг. составляет 3143. На поверхности моря средние значения колеблются в интервале 8,35—8,46, на придонном горизонте — 7,72—7,91 (табл. 17). Б. А. Скопинцев отмечал пределы колебания в воде Черного моря от 8,38 на поверхности до 7,48 в глубинных водах [150].

Из данных табл. 17 следует, что средние значения pH в воде моря различаются по сезонам и по географическому положению района.

Минимальные из средних значений pH по морю и по отдельным районам за период 1950—1985 гг. наблюдаются во время весеннего сезона. Максимальные значения — летом.

Повышенные значения pH на поверхности весной (рис. 13) относительно среднего по полю отмечаются в северо-западном и восточном районах моря. В северо-западной части изолиния pH 8,40 отделяет область значений $pH > 8,40$ от Одессы до Вилково. В этой области моря отмечена повышенная биологическая продуктивность [84] и именно весной первый максимум развития фитопланктона. Здесь значения pH выше среднего по полю на 0,03—0,04. Большое значение на повышение pH в северо-западном районе моря имеет речной сток, с которым в море поступает большое количество гидрокарбонатов. Алмазов [4] отмечал, что в ионном стоке Дуная основная доля принадлежит гидрокарбонатам (в средний по водности год 35,6 млн. т или 60 %). Мощный речной сток весной, видимо, играет важную роль в повышении pH в северо-западном районе.

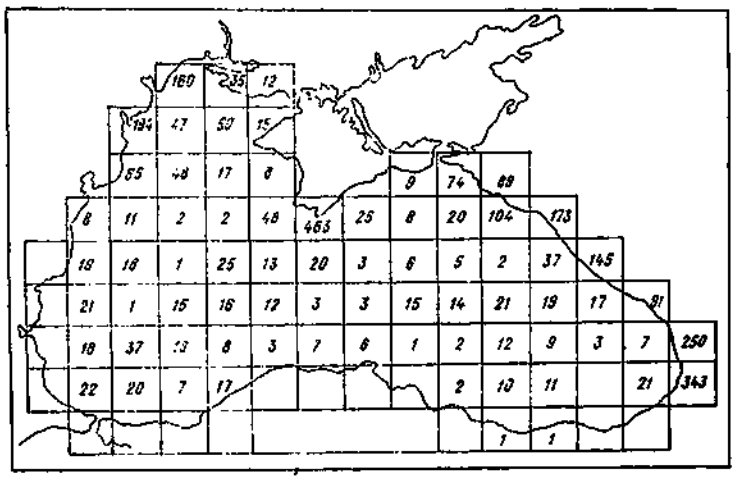

Рис. 12. Карта изученности pH в поверхностном слое за 1950—1985 гг.

В восточном районе изолиния 8,40 простирается от м. Пицунда до Батуми, ограничивая область с $pH > 8,40$. Здесь также наблюдается большое количество фитопланктона [57], и, согласно работе [161], тут же имеют место повышенные градиенты скоростей течения, что способствует поднятию глубинных вод и, в свою очередь, способствует усилению процессов фотосинтеза. Непосредственно возле Кавказского побережья изолиния 8,40 отделяет район пониженных значений pH, а согласно работе [84] в этом районе поверхностный слой воды в течение всей весны пересыщен углекислым газом. По-видимому, в результате интенсивного обмена вод здесь на поверхностный слой оказывают влияние обогащенные CO_2 подповерхностные воды.

Переход от весеннего к летнему сезону характеризуется повышением среднего по полю значения pH до 8,42 (весной — 8,37). Летом поверхностные воды интенсивно прогреваются, это вызывает выделение CO_2 из воды в атмосферу из-за понижения растворимости двуокиси углерода. В летний период начинается второй максимум развития фитопланктона и, следовательно, усиливается их фотосинтезирующая деятельность. Такой рас-

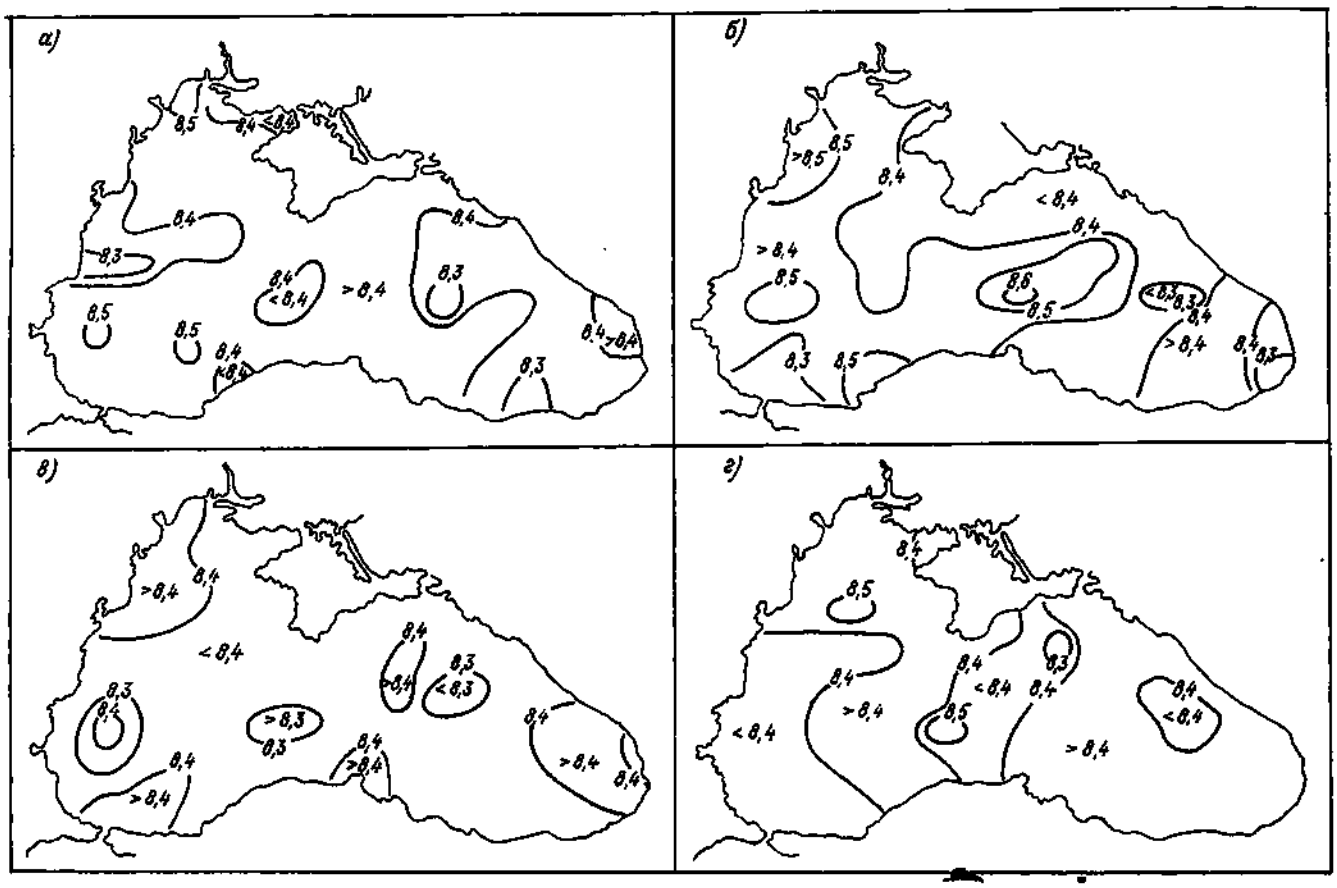

Рис. 13. Распределение pH в поверхностном слое в период 1950—1985 гг.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

Средние значения pH за 1950—1985 гг.

Горизонт, м	Район						
	все море	северо-западный (квадраты 1–13, 21, 22, 23)	западный (квадраты 19, 20, 31–35, 43–48, 57–62)	прибосфорский (квадраты 72–76, 87, 90)	прикерченский квадраты 16, 17, 24–27)	центральный (квадраты 36–39, 49–52, 63–66)	восточный
Весна							
0	8,37	8,39	8,35	8,42	8,35	8,36	8,38
10	8,38	8,37	8,38	8,39	8,38	8,37	8,40
20	8,36	8,37	8,37	8,39	8,39	8,37	8,40
30	8,38	8,36	8,40	8,40	8,41	8,37	8,34
50	8,32	8,32	8,28	8,40	8,32	8,25	8,36
75	8,23	—	8,19	8,27	8,27	8,22	8,22
100	8,04	—	7,88	8,11	8,08	7,91	8,11
150	8,07	—	8,08	8,08	—	8,05	8,07
200	7,97	—	7,98	7,98	—	7,97	7,97
500	7,97	—	7,83	7,88	—	7,94	7,97
1000	7,82	—	7,79	—	—	7,84	7,84
1500	7,77	—	7,77	—	—	7,77	7,84
2000	7,76	—	7,72	—	—	7,88	—
Лето							
0	8,42	8,46	8,43	8,45	—	8,45	8,36
10	8,40	8,38	8,41	8,40	8,40	8,39	8,40
20	8,41	8,37	8,44	8,39	8,40	8,47	8,41
30	8,42	8,31	8,43	8,38	8,44	8,48	8,41
50	8,37	8,36	8,32	8,35	8,42	8,39	8,40
75	8,29	—	8,28	8,28	8,31	8,22	8,34
100	8,12	—	8,13	8,13	8,16	8,07	8,13
150	8,06	—	8,06	—	—	8,01	8,08
200	8,04	—	8,05	8,06	—	7,39	8,06
500	7,96	—	7,97	8,00	—	7,96	7,90
1000	7,88	—	7,90	—	—	7,87	7,85
1500	7,79	—	7,80	—	—	7,86	7,76
2000	7,83	—	7,85	—	—	7,87	7,78
Осень							
0	8,41	8,43	8,39	—	8,39	8,40	8,41
10	8,43	8,41	8,43	—	8,43	8,44	8,42
20	8,41	8,38	8,42	8,39	8,41	8,43	8,41
30	—	—	—	—	—	—	—
50	8,32	8,37	8,31	8,28	8,33	8,28	8,32
75	8,21	—	8,20	8,21	—	8,19	8,23
100	8,06	—	8,04	8,15	—	7,98	8,06
150	7,93	—	7,94	8,02	—	7,88	7,98
200	7,92	—	7,96	7,92	—	7,90	7,91
500	7,88	—	7,87	7,87	—	7,87	7,89
1000	7,84	—	7,85	—	—	7,84	7,84
1500	7,83	—	7,86	—	—	7,83	7,80
2000	7,82	—	7,79	—	—	7,91	7,79
Зима							
0	8,41	8,42	8,42	8,43	8,41	8,41	8,40
10	8,42	8,43	8,43	8,44	8,42	8,44	8,40
20	8,43	8,41	8,43	8,45	8,44	8,43	8,40
30	8,43	—	8,42	8,44	—	8,43	8,42
50	8,37	8,38	8,38	8,40	8,36	8,37	8,36
75	8,28	—	8,27	8,33	—	8,27	8,24
100	8,10	—	8,13	8,19	8,03	8,10	8,07
150	8,04	—	8,05	8,14	—	8,08	7,92
200	8,01	—	8,03	8,00	—	8,05	7,94
500	7,93	—	7,95	8,00	—	7,90	7,87
1000	7,85	—	7,88	—	—	7,85	7,82
1500	7,83	—	7,87	—	—	7,82	7,81
2000	7,86	—	7,90	—	—	7,83	7,86

ход CO_2 приводит к повышению pH особенно значительно в северо-западном районе моря. Здесь изолиния 8,50 отделяет район моря с pH $>8{,}50$ от м. Сфынтул-Георге до Одессы.

Район повышенных значений pH наблюдается в западной части моря. Здесь изолиния 8,50 отделяет район значений pH $> 8{,}50$ от 29°00′ до 30°30′ в. д. (квадраты 44, 45). В центральном районе небольшая область с pH $> 8{,}60$ окружена водами со значениями pH $> 8{,}50$ от 34°30′ до 38° в. д. и от 42°40′ до 43°40′ с. ш. Восточная часть моря характеризуется пониженными значениями pH. В районе против Батуми наблюдается область с pH $< 8{,}30$. Более низкие значения водородного показателя восточной части моря формируются под влиянием интенсивного турбулентного обмена в зоне постоянного сильного течения над континентальным склоном, что приводит к перемешиванию поверхностных вод с глубинными водами, имеющими пониженные значения pH. Таким образом, значения pH в летний сезон на поверхности уменьшаются с северо-запада на юго-восток.

Поскольку pH воды моря зависит от содержания CO_2, рассмотрим некоторые особенности распределения CO_2 в летнем сезоне. По работам [85, 155] минимальные значения парциального давления CO_2 отмечались в центрах западной и восточной зон моря [85]. Сравнивая с картой распределения pH в летний сезон на поверхности, можно заметить, что минимум парциального давления CO_2 соответствует максимальным значениям pH в этих зонах. На стыке основных циклонических течений и в прибрежных районах были выявлены повышенные значения парциального давления CO_2. В районах моря, где отмечены минимальные значения CO_2 и максимальные значения pH, первичная продуктивность и окисляемость были максимальными. Эта особенность характерна для районов циклонического движения вод, и в них зоны галоклина и термоклина расположены близко к поверхности, а поэтому слой активного фотосинтеза также сдвинут ближе к поверхности. В результате в центральных районах моря летом свободная углекислота расходовалась на фотосинтез, а количество органического вещества и масса кислорода увеличились [85].

При переходе от летнего к осеннему сезону среднее значение pH по полю практически остается постоянным. Но интенсивность фотосинтеза снижается и начинается осенне-зимняя конвекция вод, вызывающая выравнивание значений pH по полю. На карте распределения pH в осенний сезон (см. рис. 13) выделяются три района пониженных относительно среднего значений pH (среднее 8,41); на западе — по линии от Констанцы до Эрегли, в центральной части в районе между 34°30′ и 36°30′ в. д. и в центре восточной части (квадраты 53, 54). Северо-западный район отличается несколько повышенными значениями pH не только в весенний, но и в летний сезоны. А восточный район летом, как и весной, характеризуется пониженными значениями pH.

В зимний сезон (среднее по полю 8,41) можно отметить еще большую однородность значений pH по полю. Значения pH восточной области остаются более низкими по сравнению с остальным морем (среднее по району 8,40). Здесь (см. рис. 13) изолиния 8,40 отделяет район моря с pH $< 8{,}40$ от Геленджика до м. Чам. Видимо, зимняя конвекция вод ведет к перемешиванию поверхностных вод с подповерхностными, что несколько понижает и выравнивает значения pH по полю. На карте распределений pH зимой есть еще две области пониженных значений pH в центральной части моря: замкнутый район с pH $< 8{,}40$ (квадраты 48, 49) и район с pH $< 8{,}30$ (квадраты 31, 32), окруженный районом с pH $< 8{,}40$ (квадраты 19, 32, 21, 22).

Таким образом, значения pH поверхностного горизонта Черного моря отличаются сезонной и пространственной изменчивостью. Повышенные значения pH наблюдаются летом, при переходе к осенне-зимнему сезону pH поверхностных вод снижается и минимальные значения достигаются весной. Такая сезонная динамика pH согласуется с сезонными изменениями факторов формирования pH. Кроме этого, pH района зависит от его географического положения. Так, водородный показатель поверхностных вод северо-западного района выше остальных районов Черного моря во все гидрологические сезоны. Замечено также, что pH на поверхности летом уменьшается с северо-запада на юго-восток.

Характер вертикального распределения pH от поверхности до дна в современный период был изучен подробно в 1985—1986 гг. [98]. Исключая северо-западную мелководную часть, исследованиями была охвачена вся акватория моря и все гидрологические сезоны. На основании полученных данных был показан сложный характер вертикального распределения pH в водной толще моря. Выявлены не описанные в литературе аномалии вертикального распределения pH. Кроме того, было проведено численное моделирование вертикального распределения водородного показателя в слое сосуществования O_2 и H_2S, которое дало возможность определить основные факторы формирования pH в этом слое.

Во всех экспедициях названного периода в поверхностном слое воды (0—0,5 м) значения pH находились в пределах 8,04—8,52, а на глубинах 1500—2000 м — в пределах 7,36—8,34 [98]. Таким образом, определенные интервалы пространственной изменчивости значений pH как в поверхностных, так и в глубинных водах превышали аналогичные интервалы, определенные ранее [150]. Слой воды 10—50 м характеризуется наличием максимума pH, который достигает 0,1—0,2 (рис. 14).

Положение и значение этого максимума имеют временной (сезонный) ход. Например, в октябре 1985 г. максимум pH располагался в слое воды мощностью в несколько десятков метров, а в декабре 1985 г. (переход к зимнему гидрологическому сезону) мощность слоя с максимумом pH стала значительно меньше.

В марте 1986 г. максимум pH в фотическом слое отсутствовал, и значения pH по глубине в этом слое были постоянны или монотонно убывали (см. рис. 14). В июне — июле 1986 г. в слое вод 20—50 м вновь наблюдался максимум pH до 0,1. Природа этого максимума связана с фотосинтетическими процессами, в результате которых расходуется CO_2 вследствие фотосинтеза, поэтому исчезновение максимумов pH при переходе от летнего сезона к зимнему объясняется ослаблением

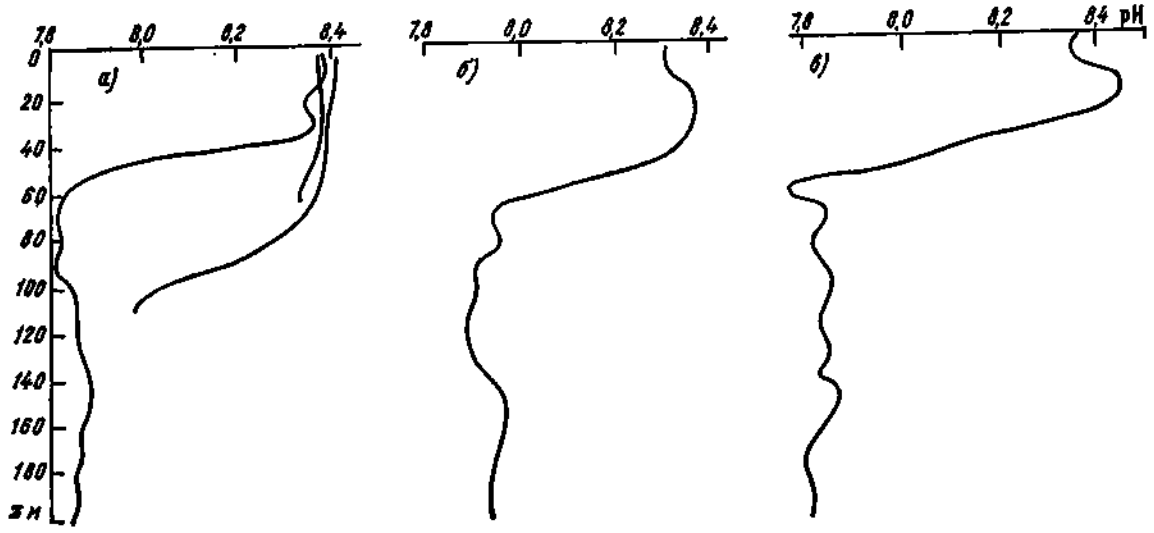

Рис. 14. Вертикальное распределение pH, 1986 г.
а — март, северо-западный район; *б* — июнь, западный район; *в* — июль, восточный район.

интенсивности процесса фотосинтеза и, следовательно, уменьшением количества легко окисляемого органического вещества в этом слое вод и усилением динамики вод в зимний период года.

Характер вертикального распределения pH в слое 75—200 м определяется в известной мере характером вертикального распределения H_2S в этом слое. Здесь практически на всех изученных станциях и во все сезоны наблюдался локальный минимум pH (табл. 18). Эту особенность отмечал еще Бруевич [106], связывая положение минимума с нижней границей слоя вертикальной циркуляции (глубины 60—75 м). Сопоставление кривых вертикального распределения pH, концентраций растворенного O_2 и H_2S указывает на то, что минимум pH располагается на глубинах появления H_2S и в слое сосуществования его с растворенным кислородом. На этих глубинах протекает процесс окисления H_2S, который является источником ионов водорода.

Другим фактором, определяющим наличие минимума pH на горизонте 75—150 м, является повышенное содержание нитратов у нижней границы кислородной зоны и в промежуточной зоне и соответственно пониженное содержание аммонийного азота [161]. При протекании процесса окисления ионов аммония молекулярным кислородом в условиях Черного моря возможно образование ионов водорода в количестве до $6 \cdot 10^{-5}$ г/л. Для случая содержания карбонатов на горизонте 100 м, по Скопинцеву [155], количестве $330 \cdot 10^{-5}$ моль/л (константы диссоциации угольной кислоты — $K_1 = 0{,}79 \cdot 10^{-6}$ и $K_2 = 0{,}53 \cdot 10^{-9}$) и значения pH = = 7,8 достаточно повышения концентрации ионов

Таблица 18

Значения pH, солености, концентраций растворенного кислорода и сероводорода в марте 1986 г.

Горизонт, м	Западная часть моря				Восточная часть моря				Северо-западный район			
	pH	S ‰	O_2 мг/л	H_2S мг/л	pH	S ‰	O_2 мг/л	H_2S мг/л	pH	S ‰	O_2 мг/л	H_2S мг/л
0—0,5	8,31	18,19	8,56	не опр.	8,36	18,09	8,14	не опр.	8,38	18,33	11,03	не опр.
10	8,30	18,28	8,56	не опр.	8,35	18,04	8,40	не опр.	8,39	18,33	11,07	не опр.
20	8,36	18,32	10,92	не опр.	8,45	18,11	8,10	не опр.	8,34	18,32	не опр.	не опр.
30	8,36	18,42	11,19	не опр.	8,41	18,28	не опр.	не опр.	8,37	18,34	10,57	не опр.
40	8,35	18,46	10,74	не опр.	8,16	не опр.	не опр.	не опр.	8,09	19,00	не опр.	не опр.
50	8,23	18,53	9,00	не опр.	8,01	19,52	4,33	не опр.	7,00	19,34	2,89	не опр.
60	8,10	18,59	5,91	не опр.	7,75	не опр.	не опр.	не опр.	7,84	19,96	не опр.	не опр.
70	7,92	18,62	1,83	не опр.	7,83	20,36	0,50	не обн.	7,83	20,37	0,34	не опр.
80	7,95	18,96	0,84	не опр.	7,82	не опр.	не опр.	не обн.	7,83	20,58	не опр.	не обн.
90	7,89	20,08	0,61	не опр.	7,81	не опр.	не опр.	не обн.	7,82	20,80	не опр.	не обн.
100	7,89	20,17	0,51	не опр.	7,85	20,71	0,28	не обн.	7,85	20,94	0,30	0,02
110	7,88	20,23	0,40	0,35	7,84	не опр.	не опр.	0,09	7,87	21,04	не опр.	не опр.
120	7,88	20,28	0,040	не опр.	7,82	не опр.	не опр.	0,18	7,87	21,15	0,06	0,23
130	7,89	20,30	0,20	не опр.	7,85	не опр.	не опр.	0,36	7,88	21,24	не обн.	не опр.
140	7,95	20,82	0,20	не опр.	7,82	не опр.	не опр.	0,53	7,89	21,34	не обн.	не опр.
150	7,96	20,95	0,29	0,8	7,88	21,27	0,14	0,53	7,89	21,41	не обн.	0,73
160	7,95	21,27	не обн.	не опр.	7,85	не опр.	не опр.	0,90	7,87	21,46	не обн.	не опр.
170	7,93	21,38	не обн.	не опр.	7,82	не опр.	не опр.	0,99	7,88	21,52	не обн.	не опр.
180	7,93	21,44	не обн.	не опр.	7,78	не опр.	не опр.	1,15	7,87	21,57	не обн.	не опр.
190	7,93	21,54	не обн.	не опр.	7,80	не опр.	не опр.	1,24	7,87	21,63	не обн.	не опр.
200	7,93	21,65	не обн.	1,40	7,80	не опр.	не опр.	1,34	7,86	21,68	не обн.	1,37

Примечание. не опр.—не определялось; не обн.—не обнаружено.

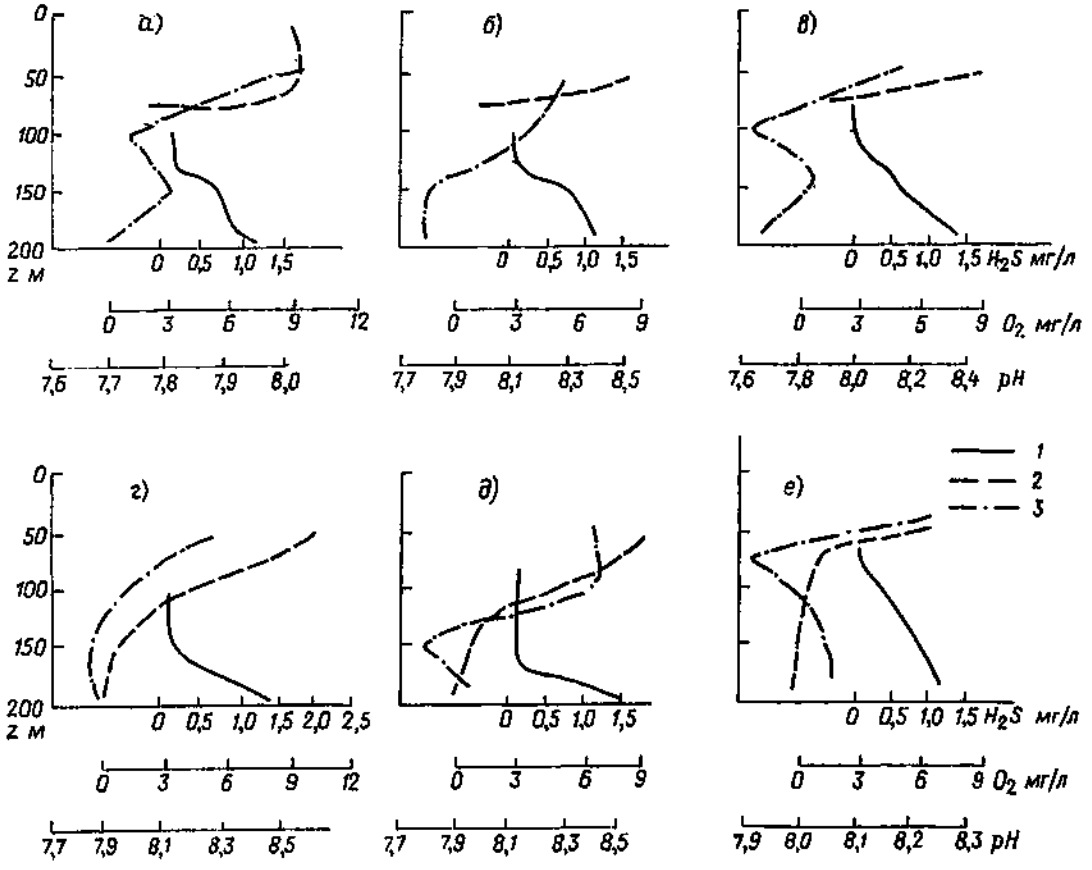

Рис. 15. Вертикальное распределение концентраций сероводорода (*1*), растворенного кислорода (*2*) и pH (*3*).

а, *б* — юг восточной части; *в* — центральная часть; *г*, *д* — на севере восточной части; *е* — юго-западная область.

водорода на $3{,}5 \cdot 10^{-5}$ г/л, чтобы значения pH уменьшились в такой буферной системе на 0,1. Такое значение минимума pH (0,1—0,2) и наблюдается в натурных условиях с горизонта верхней границы появления сероводорода. Проявление этой аномалии минимума pH отмечалось до нижней границы существования растворенного кислорода.

На глубине 150—200 м наблюдается максимум pH (см. рис. 14), который совпадает с глубиной нижней границы существования растворенного кислорода. Последнее и определяет природу максимума pH. Уменьшение содержания H_2S при переходе от более к менее глубоким слоям воды приводит к возрастанию pH. Однако на горизонте появления растворенного кислорода начинает идти процесс окисления H_2S по описанной выше схеме реакции с образованием H^+. Этот процесс усиливается с приближением к верхней границе распределения H_2S. Выше этой границы формирование pH определяется процессами взаимодействия ионов водорода с карбонат-ионами.

Формирование особенностей распределения pH на глубинах 100—200 м рассмотрено С. К. Коноваловым [98] путем построения и численного расчета модели вертикального распределения pH. Система уравнений записана в виде

$$\frac{d}{dz} A_z \frac{dH}{dz} - \frac{dWH}{dz} + \frac{dH^x}{dt} = \frac{dH}{dt};$$

$$\frac{d}{dz} A_z \frac{dS}{dz} - \frac{dWS}{dz} - \frac{dS^x}{dt} = 0;$$

$$dH/dt = 2\,dS^x/dt,$$

где A_z — коэффициент вертикального обмена; W — вертикальная составляющая скорости; H — концентрация ионов водорода; dH^x/dt — скорость изменения концентрации ионов H в результате окисления H_2S; S — концентрация сероводорода; dS^x/dt — скорость окисления H_2S.

При расчетах A_z и W принимались постоянными, а начальное вертикальное распределение pH принималось линейным с уменьшением от 8,3 на горизонте 50 м до 7,7 на горизонте 200 м. Вертикальное распределение сероводорода бралось по данным рис. 15 при константе диссоциации угольной кислоты, представленной выше. Время выхода модели на стационарный режим принималось равным времени подъема вод с горизонта 150 м на поверхность.

Полученные данные представлены в табл. 19. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показывает их хорошее совпадение как по глубине положения аномалий вертикального распределения pH, так и по значению самих экстремумов pH. Полученные расчетным путем данные объясняют не только наличие так называемых особенностей распределения pH в слое сосуществования O_2 и H_2S, но и указывают условия (малые значения A_z и большие W), при которых отмеченная аномалия наблюдаться не будет.

Важно отметить, что хорошее совпадение результатов натурных исследований с рассчетными наблюдается уже на существенно упрощенной модели (принимались постоянными A_z и W), что позволяет говорить о данном механизме формирова-

ния аномалий вертикального распределения pH в слое 50—200 м как об определяющем.

Использование более точной модели позволит не только уточнить особенности вертикального распределения pH, но и сделать ее удобным методом изучения слоя сосуществования растворенного кислорода и сероводорода, поскольку точность определения pH выше таковой для H_2S.

Результаты измерений pH для глубинных вод моря (300—2000 м) показывают, что структура

Таблица 19

Результаты расчетного вертикального распределения pH в слое 50—180 м в сравнении с натурными данными

Горизонт, м	A_z=0,5 см²/с W=−5·10⁻⁵ см/с	A_z=0,1 см²/с W=−5·10⁻⁵ см/с	A_z=0,1 см²/с W=−5·10⁻⁴ см/с	A_z=1 см²/с W=−5·10⁻⁴ см/с	Натурные данные
50	8,11	8,12	8,25	8,13	8,13
65	8,06	8,08	8,12	8,08	7,82
80	8,02	8,03	8,07	8,03	7,64
95	7,97	7,98	8,02	7,98	7,58
100	7,95	7,96	8,00	7,96	7,57
110	7,91	7,92	8,00	7,93	7,60
120	7,96	7,93	7,99	7,93	7,70
130	8,12	7,98	7,96	7,98	7,76
140	8,21	7,96	7,91	7,96	7,80
150	8,01	7,87	7,85	7,87	7,80
160	7,92	7,84	7,81	7,83	7,78
170	7,85	7,79	7,78	7,78	7,76
180	7,79	7,75	7,70	7,72	7,74

вертикального распределения pH значительно сложнее, чем это представлялось ранее. В работах [106, 150] уменьшение pH с глубиной принималось плавным и небольшим до дна, что также следует из средних данных табл. 17. Результаты двух экспедиционных исследований демонстрируют (рис. 16) наличие ряда амоналий вертикального распределения pH, относящихся ко всей акватории глубоководной части Черного моря. Во-первых, часто встречающееся достаточно резкое уменьшение pH (до 0,1) в слое 500—600 м. Во-вторых, наличие максимума на глубине ~1000 м и минимума на глубине ~1200 м. В-третьих, на ряде станций отмечено увеличение pH с глубиной в придонных водах. О таких фактах известно и из работы Иваненкова [90]. Эти факты еще требуют подробного изучения.

Вертикальное распределение pH в центральном районе Черного моря характеризует разрез м. Херсонес — прол. Босфор. На рис. 17 представ-

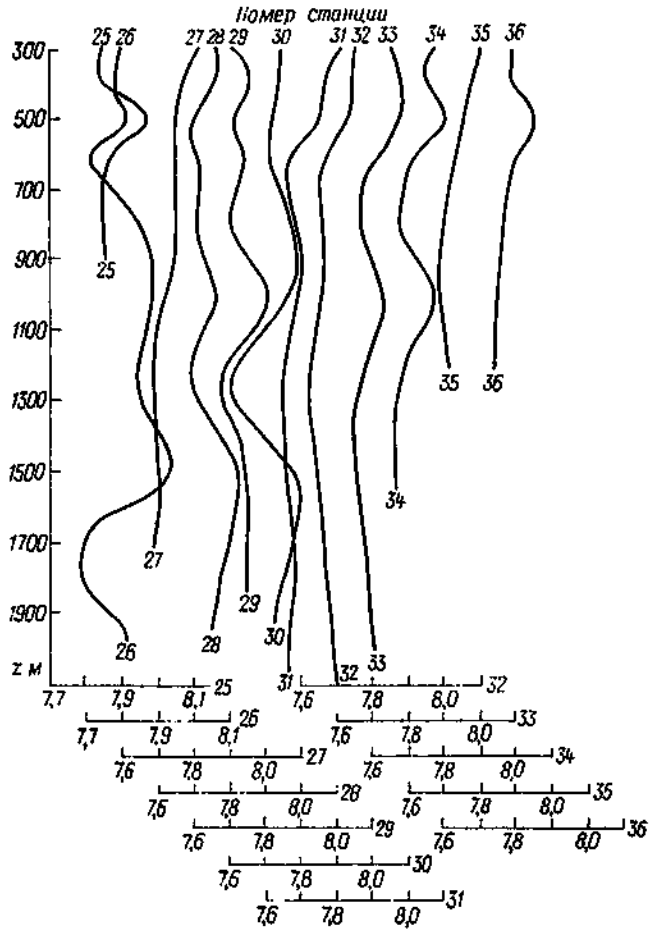

Рис. 16. Вертикальное распределение pH в слое вод 300—2000 м, июль 1986 г.
Номера станций даны условно по работе [98].

лено распределение водородного показателя в плоскости разреза в мае 1966 г. и в ноябре 1985 г. В распределении pH видно сходство в общих чертах структур изолиний.

В 1985 г. в районе между станциями 5—7 отмечена область повышенных значений pH на глубинах 50 м и ниже, чему соответствует опускание изолиний pH. То же самое наблюдалось и в 1966 г. с некоторым смещением к югу. Район станций 7,

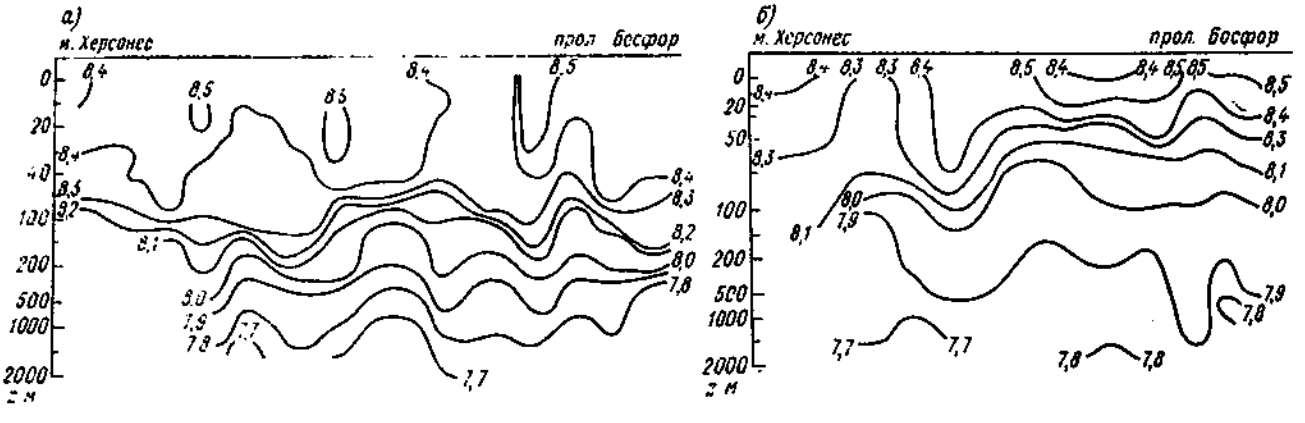

Рис. 17. Распределение pH на разрезе м. Херсонес — прол. Босфор.
а — май 1966 г.; *б* — ноябрь 1985 г.

8, 9 характеризуется понижением значений pH от горизонта 30 м и ниже в 1985 г., в 1966 г. понижение значений pH в этом районе также наблюдается, но с 75 м. Изолинии здесь имеют подъем и это соответствует циклоническим районам движения вод. Опускание изолиний приурочено к стыкам циклонических течений. На обоих графиках в районе станций 11 и 12 изолинии имеют подъем, что, возможно, отвечает понижению значений pH вследствие влияния мраморноморских вод.

Таким образом, анализ распределения pH на разрезе м. Херсонес — прол. Босфор в разные годы и сезоны (весной и осенью) приводит к выводу, что ниже 75 м одно из решающих значений в формировании pH воды имеет динамическая структура вод, при этом центрам циклонических круговоротов соответствуют куполообразные изолинии pH, стыкам течений — прогибы изолиний вниз. Такая картина, по всей видимости, характерна для всех сезонов с некоторыми смещениями центров циклонических течений.

На горизонте 10 м средние значения pH по сравнению с поверхностным горизонтом практически не отличаются: весной и зимой разница составляет 0,01, летом и осенью — 0,02.

В летний сезон, по-видимому, за счет интенсивного прогрева поверхностных вод, сдвига зон термоклина к поверхности, активного фотосинтеза фактор речного стока не главенствует в формировании значений pH морской воды. Весной, осенью и зимой большое влияние на формирование поля pH на поверхности оказывает речной сток.

Минимальные значения pH на горизонте 10 м, как и в поверхностном слое, отмечаются в весенний сезон. Причем в восточной части моря поле распределения pH на этом горизонте аналогично полю на поверхности. В прибрежных водах Кавказа изолиния 8,40 отделяет зону повышенных значений pH ($>8{,}40$) от Сочи до Батуми. В центре восточной части моря (квадраты 54, 67) наблюдается замкнутая область пониженных значений pH ($<8{,}30$). На юге вдоль Анатолийского побережья и в прикрымском районе изолиния 8,40 отделяет область значений $pH > 8{,}40$.

Летом на горизонте 10 м низкие значения pH отмечены в северо-западном районе моря, но средние значения pH ниже среднего значения pH по всей акватории моря только на 0,02. Западный и восточный районы характеризуются несколько повышенными по сравнению с центральным районом значениями pH. Изолинии $pH = 8{,}40$ ограничивают районы моря с $pH < 8{,}40$ по 32 и 35°30′ в. д., а также на юге восточной половины в прибосфорском районе.

Поле распределения pH осенью характеризуется однородностью значений pH по всему морю (среднее $pH = 8{,}43$). Ниже 8,40 водородный показатель на севере северо-западного района, на западном побережье от п. Измаила до м. Шабла, на восточном побережье в районе п. Сухуми и две замкнутые области в западной части (квадраты 59, 60) и восточной части (квадраты 39, 40) моря. Возможно, эти ядра пониженных значений pH на горизонте 10 м соответствуют центрам циклонических водоворотов, для которых характерно поднятие глубинных вод.

Зимой перемешивание вод приводит к выравниванию значений pH по полю в западной части моря. Только в прибрежных водах в районе м. Шабла $pH < 8{,}30$. Воды восточной части моря характеризуются значениями $pH < 8{,}40$, но в прибрежных водах и юго-востоке $pH > 8{,}40$.

На горизонте 20 м на характере распределения pH еще более четко прослеживается циклонический тип течений в Черном море. Весной замкнутые области пониженных значений $pH < 8{,}30$ наблюдаются в центрах западной и восточной частей моря. А районы с $pH > 8{,}40$ — у восточного побережья от п. Геленджик до п. Поти и на юге вдоль Анатолийского побережья. Летом среднее значение pH по полю на этом горизонте «отличается» от среднего его значения на горизонте 10 м на 0,01. В то же время наблюдается немонотонность изменений pH по этому полю. В центре восточной части моря изолинии 8,30 и 8,40 ограничивают районы с пониженными значениями $pH < 8{,}30$ и $pH < 8{,}40$. В западной части моря область $pH < 8{,}40$ несколько смещена из центра циклонического течения на восток (квадраты 47, 48, 61). Наиболее низкими значениями характеризуется северо-западный район, а $pH < 8{,}30$ также наблюдается в прибосфорском районе.

Осенью на глубине 20 м значения $pH < 8{,}40$ отмечены в тех же районах моря, что и на глубине 10 м: в северо-западном и в прибосфорском районах, в квадратах 23, 22, 33. Восточная часть моря характеризуется значениями pH, отличающимися от его значений в водах западного и центрального районов на 0,02—0,01 в меньшую сторону.

Для горизонта 20 м зимой, как и для горизонта 10 м, свойственно однородное распределение pH по полю. Среднее значение зимой 8,43. На поле распределения pH можно выявить три зоны пониженных значений: в центрах восточного и центрального районов моря и в северо-западном районе.

Структура поля pH на горизонте 30 м в зимний сезон аналогична его структуре на горизонте 20 м со значительным смещением к северу областей с пониженными значениями pH при его среднем значении по полю 8,43.

Поля распределения pH весной на горизонте 30 м также аналогичны полям pH на горизонте 20 м: в центрах западной и восточной частях моря области пониженных значений pH находятся в центрах циклонических круговоротов (на востоке $pH < 8{,}30$, на западе $pH < 8{,}40$). Значения pH западной половины моря больше 8,40, восточной — меньше 8,40. В северо-западном районе $pH < 8{,}40$, в прикерченском — $pH > 8{,}40$. Сравнение полей распределения pH весной на горизонтах 20 и 30 м также приводит к выводу о единстве причин, обусловливающих значение pH на этих горизонтах.

Для горизонта 50 м характерно резкое понижение pH. Согласно работе [85], начиная с горизонта 50 м, отчетливо проявляется и увеличение концентрации свободной углекислоты, причем в центре западной части моря парциальное давление CO_2 составляет 70,9 Па, а в центре восточной — 40,5 Па. В отличие от слоя 0—30 м, на горизонте 50 м в прибрежных зонах и на стыке течений значения парциального давления CO_2 ниже, чем в центральных районах. Пониженным же значениям водородного показателя соответствуют повышенные значения парциального давления CO_2. Так, весной (рис. 18) отмечаются три области низких значений pH (8,00) в центрах циклонических те-

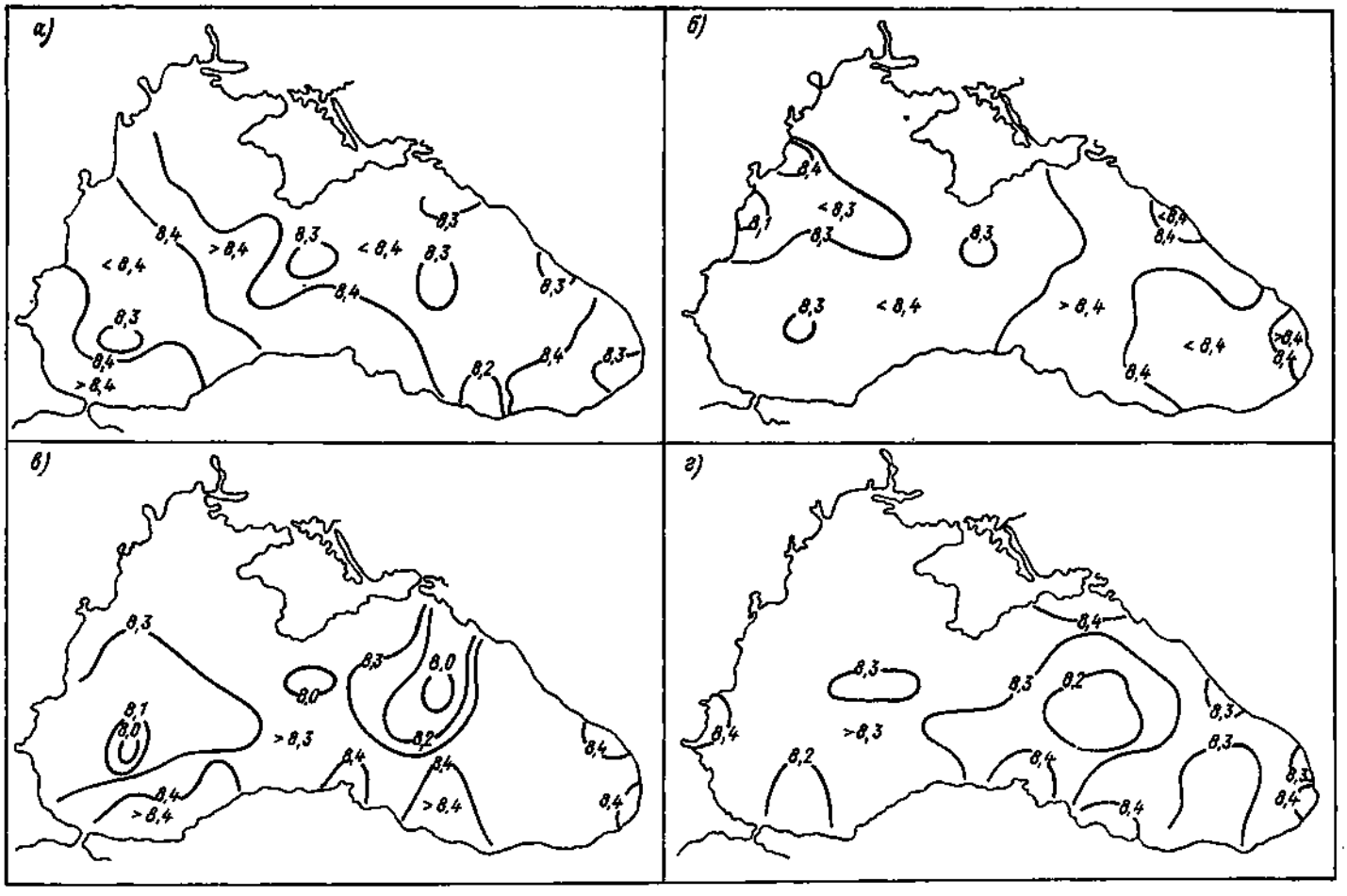

Рис. 18. Распределение pH на горизонте 50 м в период 1950—1985 гг.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

чений, в которых парциальное давление CO_2 повышено. Пониженные средние значения pH проявляются в западной части моря, что соответствует отмеченным в работе [85] закономерностям распределения CO_2. Несколько повышены значения pH весной в районе вод, располагающихся вдоль Анатолийского побережья.

На юго-востоке область повышенных значений pH $>$ 8,40 может соответствовать опусканию поверхностных вод в центре антициклонического круговорота.

Летом (см. рис. 18) среднее значение pH западной части моря на горизонте 50 м ниже на 0,08 среднего значения в водах восточной части моря. Необходимо отметить следующее обстоятельство: если в слое 0—30 м средние значения pH западной части моря превышали средние значения pH в восточной его части, то на горизонте 50 м появляется и на нижележащих горизонтах сохраняется обратное соотношение этих значений. На горизонте 50 м к вышеназванным факторам формирования pH прибавляется влияние мраморноморских вод, поступающих на этот и более нижние горизонты. Вероятно, влиянием этого фактора и объясняется понижение pH вод западной части моря, так как мраморноморские воды характеризуются значениями pH, более низкими, чем воды Черного моря, на 0,10—0,30.

Осенние и зимние карты распределения pH также выявляют динамику вод на горизонте 50 м. Центры круговоротов характеризуются пониженными значениями pH (см. рис. 18).

На горизонте 75 м в 1969 г. впервые был найден сероводород и далее определялся на станциях практически по всей акватории моря [138]. Поэтому несомненное влияние на понижение значений pH на этом горизонте оказывает сероводород, механизм влияния которого рассмотрен выше. Это влияние по сравнению с горизонтом 50 м особенно заметно в центральном районе, в котором на полях распределения pH наблюдается замкнутая область с его пониженными значениями. Также пониженные значения наблюдаются в центрах западного и восточного районов, что соответствует центрам циклонических круговоротов. Такой характер полей распределения pH наблюдается для всех сезонов, а максимальные значения pH наблюдаются летом.

На горизонте 100 м значения pH менялись весьма существенно (6,67—8,44). Поля распределения на этом горизонте характеризуются неоднородностью и немонотонностью распределения pH во все сезоны (рис. 19). Это объясняется неравномерностью распределения концентраций H_2S, который наблюдался на этом горизонте почти повсеместно. Максимальные значения pH на горизонте 100 м наблюдаются летом. Сравнение карт распределения на этом горизонте pH и H_2S, представленных в [138], показывает, что районам с максимальными значениями концентраций H_2S соответствуют области минимальных значений pH, что говорит об обратной зависимости pH и концентраций H_2S. Но корреляционной зависимости между ними на горизонте 100 м, по представленным массивам

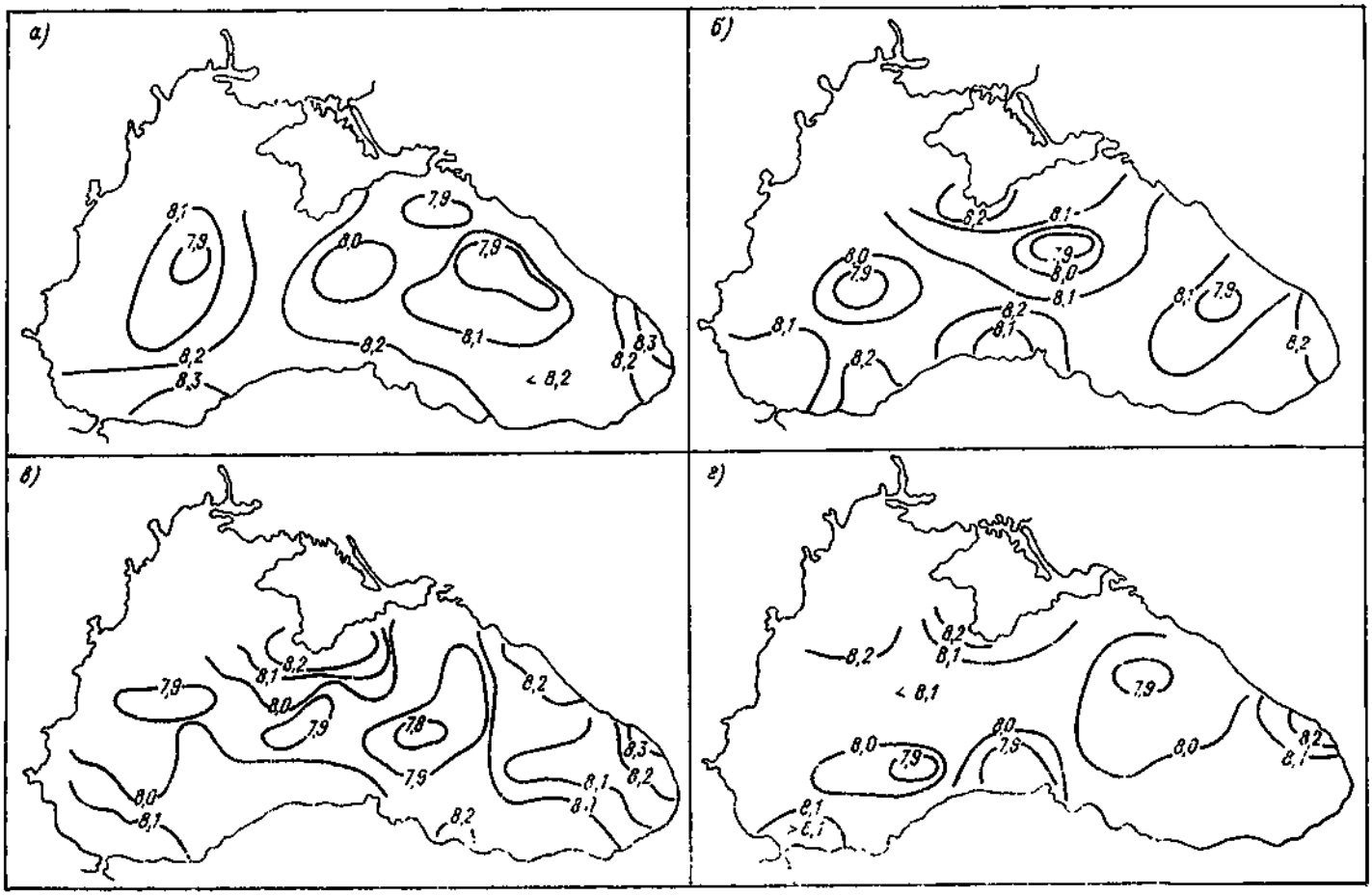

Рис. 19. Распределение pH на горизонте 100 м в период 1950—1985 гг.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

данных в работе [85], найдено не было, так как на этом горизонте значения pH формируются не только за счет наличия сероводорода. Поля распределения pH на этом горизонте в течение всего года характеризуются тремя зонами минимальных значений pH $< 7{,}90$: центральной, восточной и западной. Однако положение этих зон и их размеры различны и меняются от сезона к сезону. Значение pH вод западной части моря существенно ниже pH вод его восточной части. Видимо, в западной части проявляется влияние мраморноморских вод, которые, взаимодействуя с сероводородными водами, способствуют образованию свободной угольной кислоты.

Горизонт 150 м характеризуется несколько более низкими значениями pH, чем 100 м. Однако разница составляет только 0,03—0,08, т. е. она не столь существенна, как разница в pH между горизонтами 75 и 100 м. Это можно объяснить тем, что с увеличением концентрации H_2S на этом горизонте становится значительно меньше кислорода. На горизонте 150 м сезонная изменчивость не так характерна, как для более высоких горизонтов. Поля значений pH на горизонте 150 м менее динамичны, чем такие же поля на горизонте 100 м. Осенью наблюдались несколько более низкие значения pH, чем в остальные сезоны года. Так, в центре западного циклонического круговорота (квадрат 67) наблюдались минимальные значения pH (7,71), а его максимальные значения не превышали 8,10. Весной, летом и зимой средние годовые значения pH практически не различаются на этом горизонте (8,07; 8,06; 8,04), а формы изолиний и области повышенных и пониженных значений повторяются. Положение областей с невысокими средними значениями pH приурочено к центрам циклических круговоротов (западному, восточному, центральному), и внутригодовая динамика их размеров и положения, вероятно, определяются внутригодовой динамикой указанных циклонических круговоротов.

Характер пространственно-временного распределения pH на горизонте 200 м близок к таковому на горизонте 150 м. Среднее значение pH на этом горизонте для всего моря равно 7,98 при максимальном среднем 8,04 в летний сезон. Анализ осредненного за год поля распределения pH показывает, что значения pH на этом горизонте определяются динамикой вод. Три зоны, ограничиваемые изолиниями 7,90, расположены в центральной, западной и восточной частях моря. Они, по-видимому, определяются положениями областей циклических течений. Анализ данных по pH по сезонам показывает, что с горизонта 1000 м значения pH изменяются мало: в летний и зимний сезоны происходит даже некоторое его увеличение на горизонте 2000 м. Представленные данные по слою 500—2000 м показывают, что изменчивость pH проявляется в этом слое меньше, чем в слое вод 0—200 м.

Анализ данных по трендам pH и сопоставление их с трендами ряда других показателей воды [138] позволяет детализировать временную и пространственную динамику полей его распределения.

На горизонте 100 м для значений водородного показателя существует отрицательный тренд в водах центрального (квадраты 37 и 38) и восточного (квадраты 52 и 53) циклонических круговоротов. Здесь же существуют положительные тренды для концентраций сероводорода, солености, температуры. Угловые коэффициенты составляли от —0,015 до —0,018 ед. pH/год, 0,004—0,140 мг/(л·год) для H_2S, 0,024—0,029 ‰/год для солености, 0,015—0,022 °С/год для температуры.

Таким образом, в центрах циклонических круговоротов за исследованный период времени на горизонте 100 м имеет место постоянное уменьшение водородного показателя, нарастание концентрации H_2S, солености, температуры воды, что соответствует условиям непрерывного подъема вод. В водах прикрымского района (квадраты 23—25) наблюдается отрицательный значимый тренд для водородного показателя (критерий Фишера 2,47), а для концентраций H_2S, температуры, солености тренды положительны. В работе [138] делается вывод о происходящем неуклонном подъеме вод на горизонт 100 м, как и в центральных районах моря (квадраты 37, 38, 52). Анализ этих данных позволяет утверждать, что поверхность анаэробной зоны на горизонте 100 м представляет собой совокупность зон, в водах каждой из которых в течение 1960—1985 гг. происходило непрерывное обеднение или обогащение ионами водорода и H_2S, а также повышение или понижение солености, температуры.

Рассчитанные в работе [138] отдельные значения трендов pH для горизонтов 150, 300, 500 м позволяют сопоставить значения их и трендов концентраций H_2S и солености и получить вывод, что отрицательному тренду pH соответствуют положительные тренды H_2S и солености и наоборот. А на горизонте 1000 м в квадрате 41 определен положительный тренд pH, что отвечает опусканию вод в этом квадрате.

Значительный вклад в изучение межгодовой, внутригодовой и синоптической изменчивости pH в северо-западной части моря внес П. Ю. Селин [146]. По этим данным межгодовая изменчивость pH согласуется с изменчивостью содержания растворенного кислорода в том же масштабе времени. Средние многолетние поля pH также коррелируют с распределением растворенного кислорода. Так, в придонном слое областям дефицита кислорода соответствуют низкие значения pH (по данным работы [146] в мае 8,12—8,21, августе 7,95—8,18, в ноябре 8,07—8,22).

4. РАСТВОРЕННЫЙ КИСЛОРОД

Поля растворенного кислорода в водной толще моря рассматриваются отдельно для северо-западного района и открытой акватории моря.

4.1. Северо-западный район

Введение

Изучению гидрохимического режима этого района посвящено большое количество работ [8, 11, 32, 39, 42, 92, 108, 123, 167, 168, 180, 182]. В частности, в работе [39] приведены результаты средних годовых и экстремальных абсолютных и относительных количеств растворенного кислорода на «вековых» станциях и разрезах (Одесса-море; Одесса-порт; Цареградское гирло — море; рукав Быстрый — море; м. Большой Фонтан — м. Тарханкут — о. Змеиный) на горизонтах 0, 10, 20, 30, 50 м за 1968—1977 гг.

За этот период времени содержание растворенного кислорода в отдельные годы снижалось до 2,9—1,4 мг/л (30—15 % полного насыщения). В зимний период вследствие понижения температуры воды и увеличения растворимости газообразного кислорода содержание его повышалось до 12,9—13,3 мг/л в слое 0—10 м [42].

В последние годы в придонном слое северо-западной части моря стали ежегодно отмечаться заморные явления.

Большинство авторов однозначно относятся к оценке влияния стратификации вод на образование дефицита кислорода. По данным работы [39], в поверхностном (0—5 м) слое градиенты плотности варьируют в пределах $(5—100)\cdot10^3$ усл. ед. Глубже, на горизонтах 10—20 м, отмечается слой скачка плотности. Ниже границы слоя скачка плотности градиенты плотности в среднем $(2—3)\cdot10^3$ усл. ед. Отмечается, что при преобладающих ветрах северных направлений и циклонической циркуляции вод лиманная вода струями движется на юг, и в районе смешения с водами северной ветви основного черноморского течения наблюдаются градиенты условной плотности до $200\cdot10^3$ усл. ед. в слое 0—50 м. По данным за 1973—1977 гг. зоны со значительными градиентами плотности располагаются у Тендровской косы, Одесской банки и возможны также вдоль всего западного побережья.

Явления заморов, обусловленные динамическими факторами, многими авторами толкуются не однозначно. Например, в работе [168] рассматриваются в качестве причин факторы, ведущие к изоляции открытой акватории моря от придонных вод на мелководье и банках в Дунайско-Днепровском междуречье в летний период.

Авторы работы [32] считают, что дефицит кислорода вызван медленным продвижением в придонном слое осолоненных вод, поступающих из Каркинитского, Тендровского и Егорлыцкого заливов за счет действия слабых нагонных ветров в летний период и за счет повышения плотности воды при ее охлаждении в осенний период.

По-видимому, заключения, полученные в работе [32], не учитывают многих гидрохимических причин. Причем охлажденные воды повышенной плотности, опускающиеся с поверхности, в большей степени насыщены растворенным кислородом, и дефицит кислорода практически невозможен. Автор работы [123], например, считает, что толщина однородного слоя, образующаяся при конвективном перемешивании, в осенний период

увеличивается неравномерно и сопровождается колебаниями с периодом порядка месяца.

Таким образом, в начале осени практически еще не возможно полное перемешивание водной толщи северо-западного района, что подтверждается и многолетними данными.

В работе [39] причины, вызывающие дефицит кислорода и заморные явления, рассматриваются более объективно и полно с оценкой многих факторов. Приведенные данные показывают, что суммарный речной сток практически не изменился, а сток Днепра и Днестра испытывает антропогенное воздействие, выраженное в изменении и уменьшении их водности во внутригодовом распределении. При этом гидрологические условия и стратификация вод в северо-западной части за последние 10 лет, по данным работы [39], мало изменились, а заморные явления участились и увеличились площади заморных областей, что объясняется усилением эвтрофирования вод северо-западной части моря.

Наряду с этими исследованиями, свидетельствующими о фоновом состоянии гипоксийных явлений, Ю. П. Зайцев и Д. М. Талмазин, А. С. Остроги́н, А. П. Кудрень, А. И. Балашов, З. Т. Буланная описали (цит. по [146]) обнаруженную ими на больших площадях гипоксию и массовый замор в Дунайско-Днестровском междуречье в 1973—1975 гг. По данным работы [167] заморы начинались в районах влияния дунайских вод и не распространялись на глубины более 10—15 м. Эти явления в столь больших масштабах с наибольшей повторяемостью в междуречье Дуная и Днестра наблюдались по 1984 г. включительно [146]. Считается, что зоны гипоксии, в которых проявляется сероводородное заражение, не связаны с глубинной анаэробной зоной моря. Первые количественные наблюдения за содержанием сероводорода, выполненные с применением иодометрического метода, проведены с июля 1983 г. на устьевом взморье Днестра Ю. П. Зайцевым с сотрудниками (цит. по [146]). Сероводородный слой воды с концентрациями до 1,5 мг/л достигал мощности 2—8 м и площади 5300 км². В сентябре 1984 г. [146] в этом же районе содержание H_2S достигало 2,7 мг/л, а площадь района составляла 1300 км². По данным Ю. П. Селина [146] в летние периоды 1985 и 1986 гг. гипоксия отсутствовала. Только на малых по площади прибрежных участках взморья Дуная, Днестровского и Днепро-Бугского лиманов имели место локальные зоны гипоксии с содержанием кислорода не выше 4,0 мг/л. На устьевом взморье Дуная (1986 г.) также обнаружилась зона гипоксии (площадь примерно 2 км²) с присутствием сероводорода до ~0,15 мг/л. Отсутствие гипоксии летом 1985 г. Ю. П. Селин объясняет аномальностью гидрометеорологического режима этого года, который характеризовался суровой зимой и холодной весной, повышенной повторяемостью в весенне-летний период штормовых и сильных ветров, усиливающих аэрацию вод [146]. Поле концентраций кислорода подробно изучено Ю. П. Селиным с использованием банка данных за периоды 1925—1929, 1934, 1955—1957 и 1960—1985 гг., включающем примерно 12 000 станций, и методов анализа неэквидистантных временных рядов. Межгодовая изменчивость изучена Ю. П. Селиным путем сгруппирования результатов наблюдений по месяцам и полградусным сферическим трапециям. Сезонная и суточносиноптическая изменчивость выявлялась Ю. П. Селиным методом квантильного анализа с использованием пакета программ (BDVERX) обработки малых выборок и рядов с нерегулярной временной структурой. В результате Ю. П. Селин выявил, что межгодовой изменчивости средних годовых концентраций кислорода свойственны квазипериодические колебания с цикличностью 3—5(6) лет и что содержание кислорода за последние 25 лет увеличивается в поверхностном и уменьшается в придонном слоях. При этом были выявлены области гипоксии, ранее не описанные в литературе: в 1965 г. в междуречье Днепра и Днестра в августе (3,7 мг/л) и в октябре (0,74 мг/л), а в 1970 г.— с начала июля до середины сентября (1,86—2,57 мг/л). Положительные тренды для поверхностного слоя западной части района моря по данным Ю. П. Селина 0,06—0,07 мг/(л·год) (на остальной акватории северо-западного района тренды были незначимы). В придонном слое значения отрицательных трендов составили —0,1... ...—0,6 мг/(л·год). По данным Ю. П. Селина среднее месячное содержание кислорода колебалось в толще воды северо-западного района в интервале 5,00—7,14 мг/л (максимум в феврале 12,4—13,6 мг/л, минимум в июле — августе 7—8 мг/л).

Динамика сероводородного заражения гипоксийных районов с учетом химических и биохимических процессов в северо-западном районе моря подробно изучена, результаты которого изложены в работах [147, 148]. Здесь сделан особенно важный вывод, что для сероводородных зон характерна значительная изменчивость скорости окисления сероводорода и зависимость времени существования их от гидрометеорологических условий.

4.1.1. Материалы наблюдений. Аналитические методы

Некоторые характеристики материалов наблюдений представлены в табл. 20. Анализ проб воды на содержание растворенного кислорода выполнялся в соответствии с работами [125, 126].

4.1.2. Распределение растворенного кислорода

В весенний сезон (рис. 20, 21) в поверхностном горизонте в период 1963—1985 гг. наблюдения за растворенным кислородом проводились в каждом квадрате. Его среднее содержание по квадратам находилось в пределах 10,60—15,26 мг/л. Максимальное содержание (20,0 мг/л или 166 % насыщения) обнаружено в апреле 1985 г. в квадрате 1, минимальное (8,07 мг/л или 96 % насыщения)— в квадрате 4 в мае 1981 г. Если не учитывать результаты наблюдений в весенний сезон 1985 г., которые показали максимальное содержание кислорода (рис. 22) в расчетах средних многолетних его значений, то поле растворенного кислорода отличается от такового в предыдущий период (1939—1962) незначительно. На поверхностном горизонте в весенний период 1939—1962 гг. максимальное содержание растворенного кислорода приходилось на воды в квадратах 1 и 2 и составляло соответственно 13,33 и 13,46 мг/л (132 % насыщения). минимальное содержание кислорода (7,74 мг/л) отмечалось в квадрате 18 в мае 1954 г. Среднее

Таблица 20

Материалы наблюдений за содержанием растворенного кислорода в северо-западном районе моря

Период наблюдений		Подразделения Госгидромета СССР	Район наблюдений	Количество проб
год	месяц			
1939, 1948, 1950, 1955, 1958, 1959	IX	МГС «Одесса», БГМО ЧАМ	Сухой лиман, взморье Дуная, северо-западная часть	86
1940,—1957, 1959, 1961	VIII	МГС «Одесса», БГМО ЧАМ	Северо-западная часть	48
1948	VIII — IX	МГС «Одесса»	Северо-западная часть	54
1949, 1955, 1956, 1959, 1961	III	БГМО ЧАМ	Северо-западная часть	52
1950, 1953, 1955—1957, 1959	VI, VII	Дунайская ГМО, МГС «Одесса», БГМО ЧАМ	Северо-западная часть, Сухой лиман, взморье Дуная	77
1950, 1957—1959	XII	БГМО ЧАМ, МГС «Одесса»	Северо-западная часть	13
1951—1960	II	МГС «Одесса», БГМО ЧАМ	Северо-западная часть	145
1951—1962	V	МГС «Одесса», Дунайская ГМО, БГМО ЧАМ	Сухой лиман, взморье Дуная, северо-западная часть	188
1952, 1956, 1959, 1960	IV	Дунайская ГМО, БГМО ЧАМ, МГС «Одесса»	Северо-западная часть	64
1954, 1955 1957, 1960	X, XI	Дунайская ГМО, БГМО ЧАМ, МГС «Одесса»	Северо-западная часть	129
1954—1959	II, V, VI, VIII, X, XI	БГМО ЧАМ, МГС «Одесса»	Днепро-Бугский лиман, взморье Одесского залива, северо-западная часть	75
1956—1957	IV, V, VIII, X, XI, XII	БГМО ЧАМ	Северо-западная часть, Одесский залив, Каламитский залив	314
1957, 1958	V	АзЧерНИРО, ГМО ЧФ	Северо-западная часть	47
1959	V	АзЧерНИРО	Северо-западная часть	12
1960	IV, V, VI, VII, VIII, IX, X	МГС «Одесса»	Днепро-Бугский лиман	548
	II, III, IV, VI, VII, VIII, IX, X	БГМО ЧАМ	Северо-западная часть	810
1961	VIII	АзЧерНИРО	Северо-западная часть	9
1962	I, III	МГС «Одесса», Дунайская ГМО	Сухой лиман, разрез р. Быстрый — море	448
	IV, V, VI, VII, VIII, IX, XI, XII	МГС «Одесса»	Сухой лиман, Одесский залив	1499
1963	I, IV, V, VI, IX, X	МГС «Одесса»	Северо-западная часть, Одесский залив, Сухой лиман	671
	III, VII, VIII	МГС «Одесса», БГМО ЧАМ	Северо-западная часть, Сухой лиман	334
1964	III	Дунайская ГМО, БГМО ЧАМ	Разрез от рук. Быстрый по курсу 90°, взморье г. Одессы	123
	IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI	МГС «Одесса», БГМО ЧАМ	Одесский залив, взморье г. Одессы	736
1965	V	БГМО ЧАМ	Взморье Дуная	194
	VII, VIII, X, XI	МГС «Одесса»	Одесский залив, северо-западная часть, Сухой лиман	629
1966	V, VIII, XI	МГС «Одесса»	Северо-западная часть	164
1967	IV, V, VI, VIII, XI	МГС «Одесса», Дунайская ГМО	Северо-западная часть, Сухой лиман	379
1968	II, V, VIII, XI	Дунайская ГМО	Северо-западная часть, вековые разрезы, взморье рук. Быстрого	125
1965	V, VI, VIII, XI	БГМО ЧАМ, Дунайская ГМО	Устье р. Дуная, северо-западная часть, вековые разрезы	419

Период наблюдений		Подразделения Госгидромета СССР	Район наблюдений	Количество проб
год	месяц			
1970	V, VII, IX	Дунайская ГМО	Северо-западная часть	466
	VIII, XI	МГС «Одесса»	100-мильный разрез, северо-западная часть	118
	X	БГМО ЧАМ, Дунайская ГМО, МГС «Одесса»	Каркинитский залив, взморье рук. Быстрый, Сухой лиман	384
1971	VIII, IX, X	МГС «Одесса»	Северо-западная часть	1384
	VI, XI	МГС «Одесса», Дунайская ГМО	Сухой лиман, северо-западная часть, разрезы от гирла Быстрого до гирла Цареградского	622
1972	V, VII, X, XI	МГС «Одесса», Дунайская ГМО	Северо-западная часть, Каркинитский залив	842
	VIII, IX	МГС «Одесса»	Северо-западная часть, Днепро-Бугская устьевая область	274
1973	III, X	Дунайская ГМО	Северо-западная часть, Каркинитский залив, разрезы	408
	IV, VIII, IX	МГС «Одесса»	Одесский залив и северо-западная часть, вековой разрез	372
	V, VII	Дунайская ГМО, МГС «Одесса»	Разрезы: Цареградское гирло — море, рук. Быстрый — море, северо-западная часть	335
	XI	Дунайская ГМО	Приднестровский и придунайский районы, разрезы: Цареградское гирло — море, рук. Быстрый — море	85
1974	VIII, IX, X	СО ГОИН	Северо-западная часть, Каркинитский залив	83
1975	I, VI, XI	Дунайская ГМО	Цареградское гирло — море, рук. Быстрый — море	347
	III, IV	СО ГОИН	Северо-западная часть	50
	VII, IX, X	МГС «Одесса»	Северо-западная часть, вековые разрезы	162
	VIII	Дунайская ГМО, МГС «Одесса»	Цареградское гирло, рук. Быстрый — море, северо-западная часть, вековые разрезы	270
1976	I	Дунайская ГМО	Разрезы, Цареградское гирло — море, рук. Быстрый — море	65
	V, VIII, XI	МГС «Одесса», Дунайская ГМО	Разрезы: Цареградское гирло — море, рук. Быстрый — море, море — м. Тарханкут, Григорьевка — море, м. Тарханкут — Тендра, северо-западная часть	455
	VI, IX, X	МГС «Одесса»	Сухой лиман, Одесский залив	137
	VII	МГС «Одесса», СО ГОИН	Сухой лиман, Одесский залив, северо-западная часть	238
	XII	СО ГОИН	Разрез м. Сфынтул-Георге — м. Херсонес	90
1977	I, II, IV, VII, V, VIII, IX, XI	Дунайская ГМО, ОдО ГОИН, СО ГОИН, МГС «Одесса»	Северо-западная часть, разрез м. Ланжерон — море, северо-западная часть	1932
	VI	Николаевская ГМО	Северо-западная часть, Одесский залив	142
	X	МГС «Одесса»	Сухой лиман, Одесский залив	28
1978	II, III, V, VII, VIII, IX, X	СО ГОИН, Дунайская ГМО, МГС «Одесса»	Северо-западная часть, вековые разрезы, разрез рук. Быстрый — море	848
1979	II	СО ГОИН, ОдО ГОИН, Дунайская ГМО	Северо-западная часть, разрез р. Быстрый — море	44
	IV, V, VI, VII, VIII, IX, X	МГС «Одесса», Дунайская ГМО	Одесский залив, вековые разрезы, северо-западная часть	1290
1980	III, IV, V, VI, VII, IX, XI	Дунайская ГМО	Северо-западная часть, вековые разрезы	818
1981	I, III, V, VI, VII, XI, XII	Дунайская ГМО, СО ГОИН, МГС «Одесса»	Северо-западная часть, вековые разрезы	2773
1982	III, IV, VII, VIII, X	Дунайская ГМО	Северо-западная часть	2145
1982	I, II	СО ГОИН	Северо-западная часть	166
1983	I, III, IV, VI, VII, VIII, X	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	1838
	IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI	МГС «Одесса»	Северо-западная часть	2558

Период наблюдений		Подразделения Госгидромета СССР	Район наблюдений	Количество проб
год	месяц			
1983	VI, VII	СО ГОИН	Северо-западная часть	56
1984	VI, X	СО ГОИН	Северо-западная часть	298
	V, VI, VII, VIII, IX	МГС «Одесса»	Северо-западная часть, Одесский и Каркинитский заливы	2676
	V, VIII, X	Николаевская ГМО	Северо-западная часть	305
1985	I, II, III, IV, X, XI	ОдО ГОИН, СО ГОИН	Северо-западная часть	216
	VI, VII	ОдО ГОИН	Северо-западная часть	52
	IV, VI, VIII, XI, XII	МГС «Одесса»	Северо-западная часть, Одесский залив	311
	V, VI, VII, VIII, IX, X	Дунайская ГМО	Одесский залив, северо-западная часть, взморье Дуная	1103

содержание растворенного кислорода варьировало в диапазоне 9,77—11,23 мг/л.

На горизонте 50 м в весенний сезон в период 1939—1962 гг. среднее содержание растворенного кислорода находилось в пределах 9,11—10,39 мг/л, при максимальном разовом содержании 11,87 мг/л (квадрат 8) в мае 1956 г., а минимальное содержание его — 7,89 мг/л (апрель 1960 г.).

За весенний период 1963—1985 гг. на горизонте 50 м среднее содержание растворенного кислорода изменялось от 9,59 мг/л (квадрат 11) до 12,12 мг/л (квадрат 10). Большие его средние значения

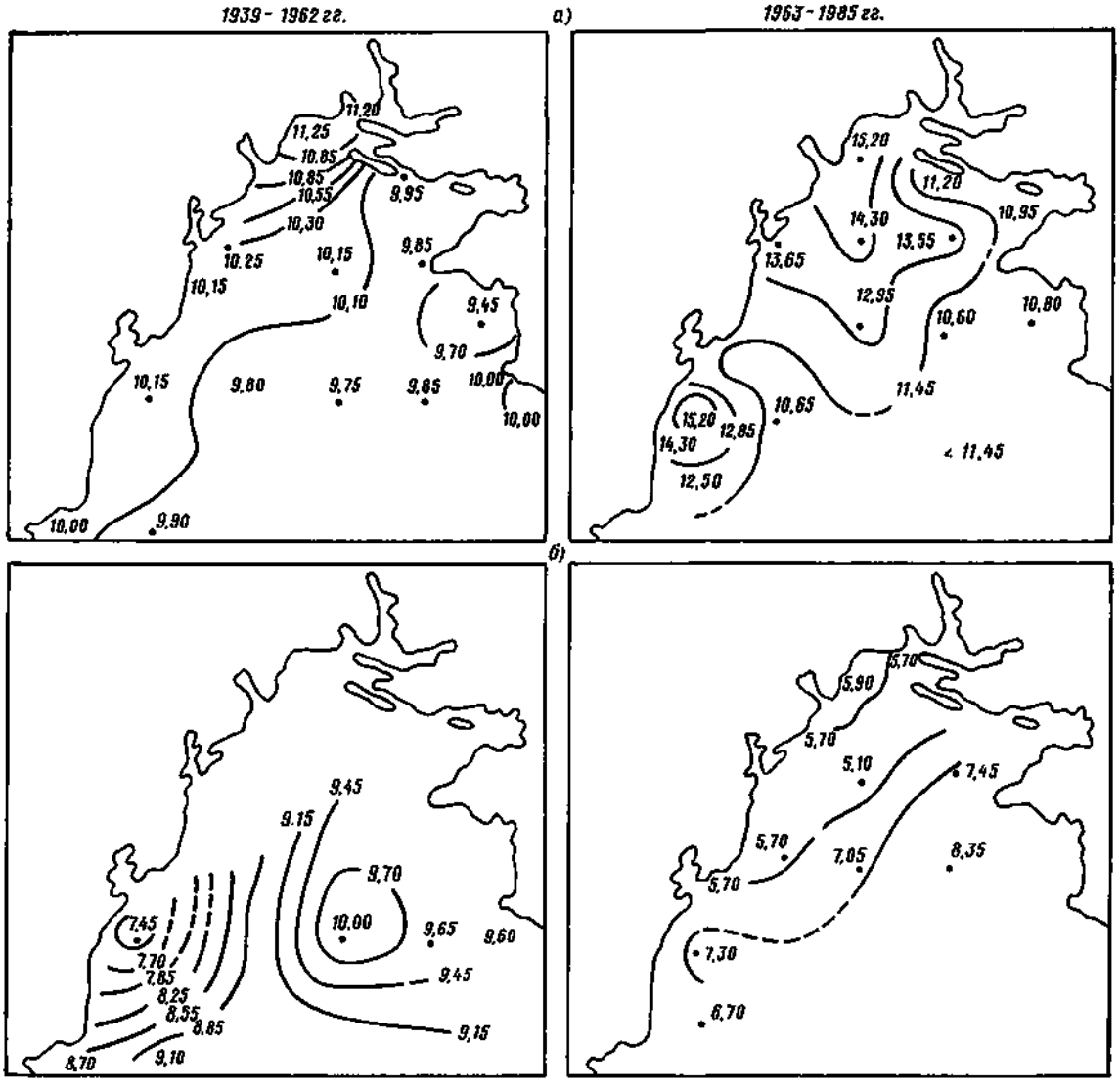

Рис. 20. Средние многолетние поля растворенного кислорода весной в поверхностном горизонте (*а*) и летом на горизонте 50 м (*б*) северо-западной части моря, мг/л.

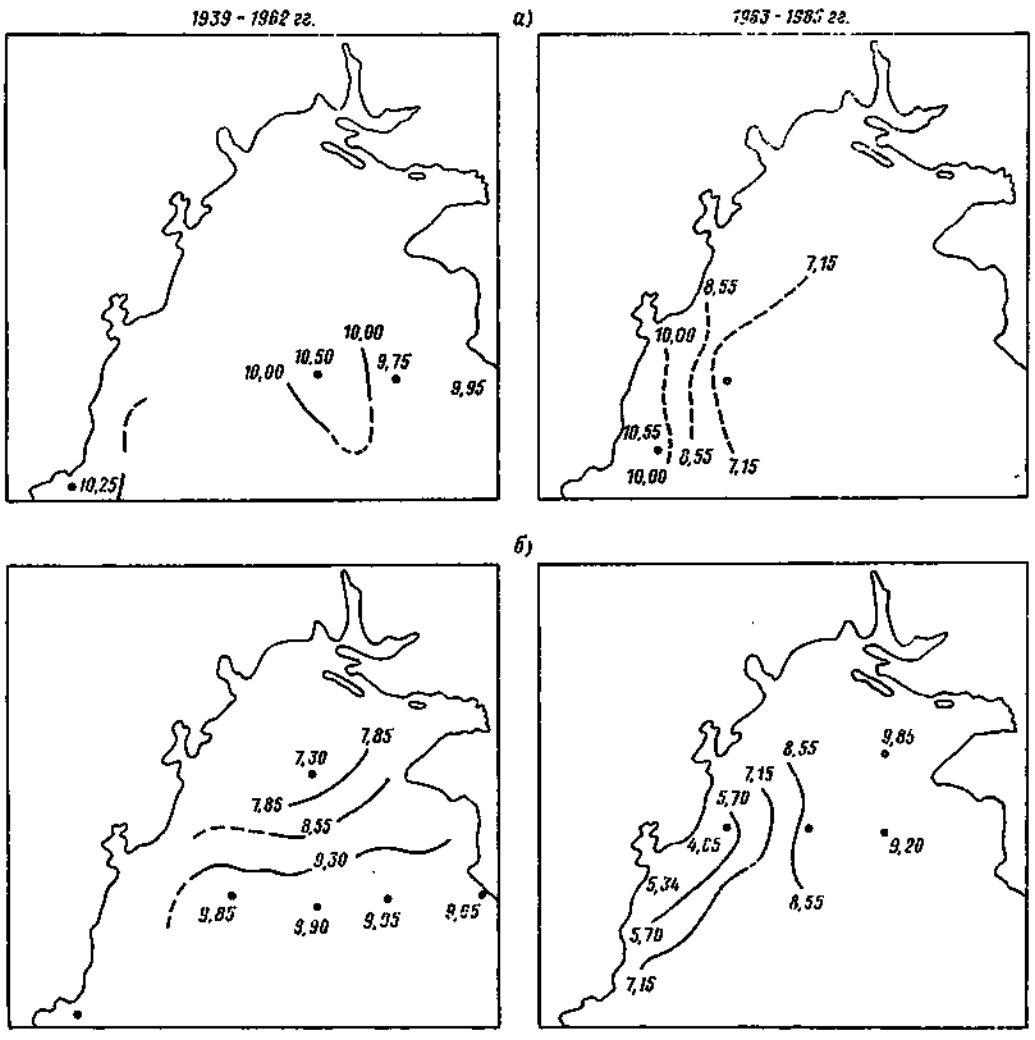

Рис. 21. Средние многолетние поля растворенного кислорода (мг/л) зимой (*а*) и осенью (*б*) на горизонте 50 м северо-западной части моря.

(10,26—12,12 мг/л) приурочены в основном к прибрежным районам (квадраты 9, 10, 19).

В летний сезон (1939—1962) в поверхностном горизонте (см. рис. 20) содержание растворенного кислорода изменялось в пределах 7,47—9,02 мг/л при среднем 8,17 мг/л. Максимальная концентрация обнаружена в квадрате 6 (113 % насыщения или 11,79 мг/л) в 1959 г., а минимальная (5,69 мг/л) — в квадрате 17 в августе 1959 г.

На горизонте 50 м в тот же сезон в период 1939—1962 гг. его среднее содержание изменялось в пределах 7,34—10,02 мг/л при максимуме

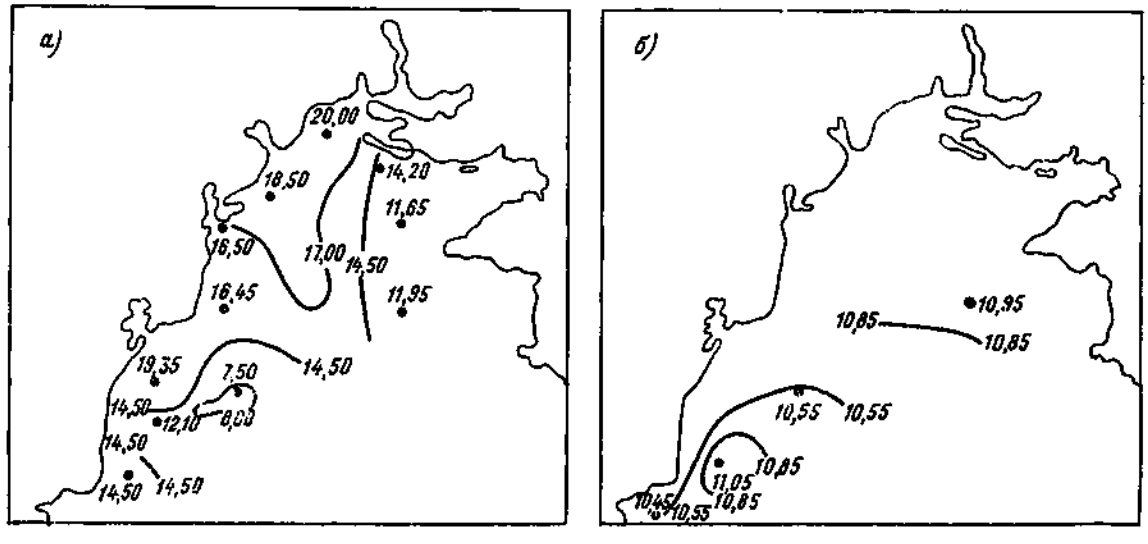

Рис. 22. Содержание растворенного кислорода (мг/л) весной в северо-западной части моря, 6—28 апреля 1985 г.

а — поверхностный горизонт; *б* — 50 м.

11,35 мг/л (квадрат 16) в августе 1959 г. и минимуме 5,42 мг/л (квадрат 14) в августе 1956 г.

За период 1963—1985 гг. в летний сезон среднее содержание растворенного кислорода уменьшилось в сравнении с 1939—1962 гг. Например, в квадрате 5 его средняя концентрация составляла 5,10 мг/л, а в других квадратах не превышала 8,36 мг/л.

Пониженные концентрации растворенного кислорода (5,17 и 5,70 мг/л) обнаружены в квадратах 2 и 10 соответственно по единичным наблюдениям.

По данным работы [167] резкая плотностная стратификация, обусловленная наличием сезонного термоклина в летний период, усугубляется падением солености в верхних слоях вод северо-западного района моря и затормаживает вертикальный обмен солями. Режим циркуляции вод, по-видимому, в летнее время благоприятствует выносу пресных вод р. Дуная в этот район моря, которые при этом попадают в систему замкнутых круговоротов и при максимальном пресном стоке которых создаются благоприятные условия для понижения содержания растворенного кислорода за счет увеличения поступления органических веществ, потребляющих на окисление кислород.

В осенний сезон в период 1939—1962 гг. (см. рис. 21) в центральной области северо-западного района моря существовала область пониженного содержания кислорода (средняя концентрация 7,20 мг/л, квадрат 11).

Среднее многолетнее содержание растворенного кислорода на поверхностном горизонте в этот сезон изменялось от 7,20 до 9,30 мг/л.

За период 1963—1985 гг. среднее содержание растворенного кислорода варьировало в пределах от 8,96 до 10,36 мг/л. За указанный период времени среднее содержание растворенного кислорода, например, в квадрате 11 увеличилось на 3,47 мг/л.

На горизонте 50 м (см. рис. 21) за 1939—1962 гг. только в квадратах 4, 7, 9, 10, 19, 20, 31 проведены наблюдения. Среднее содержание кислорода на этой акватории на глубине 50 м изменялось от 7,30 (квадрат 7) до 9,99 мг/л (квадрат 17).

Максимальное среднее содержание растворенного кислорода (9,99 мг/л) было свойственно квадрату 17, а минимальное — квадрату 7. В 1963—1985 гг. среднее содержание растворенного кислорода на горизонте 50 м варьировало по квадратам в пределах 4,39—9,90 мг/л. Минимальные значения средних концентраций (4,39; 4,66; 5,34 мг/л) приурочены соответственно к квадратам 9, 10 и 19.

В зимний сезон основной черноморский поток вод заходит в северо-западный район моря и вызывает осолонение его вод [20]. При этом среднее содержание растворенного кислорода в зимний сезон на поверхностном горизонте (см. рис. 21) в период 1939—1962 гг. находилось в пределах 10,27—13,49 мг/л. Максимальные значения растворенного кислорода (13,65; 13,05; 13,30 мг/л) приурочены к квадратам 1, 2, 18.

В период 1963—1985 гг. на поверхностном горизонте диапазон концентраций кислорода составил значения 10,53—13,52 мг/л при максимальных значениях в квадратах 4 и 5 соответственно 17,42 и 16,99 мг/л.

Как видно из рис. 21, на поверхности в зимний сезон 1963—1985 гг. сформировалась область с повышенным содержанием кислорода (13,08—13,93 мг/л).

В это же время произошли изменения в расположении изооксиген в сравнении с периодом наблюдений в 1939—1962 гг. вследствие появления области с концентрацией кислорода больше 13 мг/л.

Резкое изменение в среднем содержании кислорода между двумя периодами наблюдений в зимний сезон прослеживается и на горизонте 50 м (см. рис. 21). Например, в квадрате 15 в период 1939—1962 гг. среднее содержание растворенного

Таблица 21

Среднее содержание растворенного кислорода в период 1963—1979 гг.

Горизонт, м	Зима		Весна		Лето		Осень		Год	
	мг/л	%	мг/л	%	мг/л	%	мг/л	%	мг/л	%
Северо-западный район										
0	13,00	106	10,53	110	7,92	104	9,71	102	10,29	105
10	9,84	99	9,37	107	7,26	91	9,42	99	8,97	99
20	9,67	99	8,94	86	6,56	71	9,06	97	8,56	88
30	9,13	92	9,87	94	7,80	68	9,73	103	9,13	89
50	9,66	90	9,59	92	6,44	66	9,19	92	8,72	85
Устьевое взморье р. Дуная										
0	13,23	104	10,83	114	8,56	109	9,47	101	10,52	107
10	11,02	98	8,71	89	7,00	86	7,70	81	8,60	88
20	10,33	94	7,57	74	5,66	67	6,86	72	7,60	76
30	10,44	101	7,93	76	6,10	63	6,12	67	7,64	77
50	9,90	98	10,12	98	6,52	63	6,39	64	8,23	81

кислорода было 8,92 мг/л, а в 1963—1985 гг. уменьшилось до 6,76 мг/л, что, очевидно, связано с поднятием верхней границы сероводородной зоны до глубины 75 м. В свою очередь обедненные кислородом воды основного черноморского течения в зимний сезон (по схеме циркуляций течения [20]) могут заходить в северо-западную часть моря, снижая содержание растворенного кислорода на горизонте 50 м в квадратах 20 и 11 до 6,99—6,76 мг/л.

Сезонная изменчивость содержания растворенного кислорода по глубине в слое 0—50 м иллюстрируется в качестве примера за период 1963—1979 гг. данными табл. 21.

В летний период в слое 0—50 м происходит значительное понижение средних концентраций растворенного кислорода, обусловленное повышением температуры воды. Его концентрации варьируют от 7,92 на поверхности до 6,44 мг/л в придонном слое.

В осенний период под влиянием быстрого охлаждения поверхностных вод формируется область с повышенным содержанием кислорода, значения которого достигают 10,06—10,19 мг/л или 103 % насыщения. В придунайском районе моря формируется область с низким содержанием кислорода, что обусловлено существенным влиянием органических веществ, поступающих с водами р. Дуная в этот период года [2].

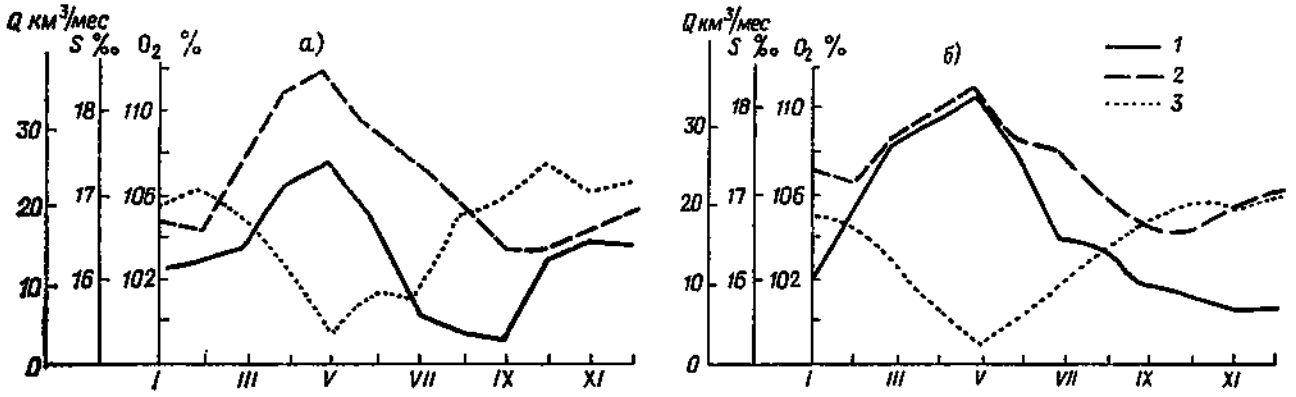

Рис. 23. Содержание растворенного кислорода (*1*), речного стока (*2*) и солености (*3*) за 1951—1957 гг. (*а*) и 1958—1976 гг. (*б*) в северо-западной части моря (квадрат 25).

Содержание растворенного кислорода в поверхностных водах всегда обратно пропорционально ходу температурных перемен. С глубиной влияние температуры и процессов фотосинтеза ослабевает, преобладающим фактором является вертикальное перемешивание вод.

На рис. 23 показан ход кривых солености, относительного содержания растворенного кислорода, речного стока за периоды 1951—1957 и 1958—1976 гг. В целом ход кривой относительного содержания кислорода почти повторяет ход кривой суммарного речного стока.

Максимум насыщенности воды кислородом в мае соответствует минимальным значениям солености (<16 ‰), а максимальное значение суммарного речного стока соответствует максимальной насыщенности вод кислородом (<110 % насыщения). В летние месяцы при условии процессов фотосинтеза содержание растворенного кислорода увеличивается.

Весьма важен вопрос о кислородном режиме северо-западного района в связи с устойчивыми

Таблица 22

Данные по водообмену

Параметр водообмена	Зима (преобладание северо-восточных ветров)	Лето (преобладание северо-западных ветров)
Приток морских вод, м³/с	$33{,}1 \cdot 10^4$	$12{,}8 \cdot 10^4$
Отток морских вод, м³/с	$29{,}4 \cdot 10^4$	$19{,}2 \cdot 10^4$
Приток речных вод, м³/с	$0{,}6 \cdot 10^4$	$1{,}1 \cdot 10^4$
Отклонение уровня моря от среднего многолетнего, м		
по расчетам	+0,34	−0,42
по данным наблюдений	+0,14	−0,22

ситуациями «заморных» явлений. В этой связи вопросы циркуляции вод имеют первостепенное значение для выявления характера и причин дефицита растворенного кислорода. Вывод, полученный на основе исследования [20], показывает, что основной особенностью сезонной изменчивости циркуляции вод северо-западного района моря является ослабление циклонической циркуляции от зимы к лету. В частности, изменение режима водообмена от зимы к лету показано в табл. 22. В зимний период объем поступающих вод больше по сравнению с летним периодом. Такой характер водообмена и приводит к существенному изменению гидрохимического режима вод северо-западной части моря (например, осолонение зимой, распреснение летом) и размаху сезонных колебаний уровня на 0,8 м.

Авторами [20] доказано, что режим циркуляции вод, благоприятный для выноса пресного стока р. Дунай из северо-западной части моря, устойчив лишь в зимний период года, т. е. когда сток практически минимален. Следовательно, в весенне-летний период года режим циркуляции при максимальном и загрязненном речном стоке Дуная может привести к развитию заморских явлений

Таблица 23

Океанографические характеристики вод северо-западного района в период 1986 г.

Время наблюдений	Горизонт, м	Соленость, ‰	Условная плотность	Содержание растворенного кислорода, мг/л	% насыщения
13 VIII	0	10,10	4,40	10,56	138
11 ч 20 мин	10	15,53	9,09	4,84	62
	15	17,78	13,73	< 0,8	0
4 VIII	0	12,04	6,00	8,13	107
4 ч 20 мин	10	15,89	9,86	3,66	46
	15	17,84	13,88	0,13	1

вдоль западного побережья моря. Вихревая структура способствует медленному переносу речных вод в центральные и восточные районы северо-западной части моря.

Следовательно, дефицит кислорода возможен в летний период года, и его устойчивость зависит также от длительности штилевой ситуации. Некоторые натурные характеристики, сопровождающие заморные явления, представлены для конкретного случая в табл. 23.

С 1972 по 1984 г. «заморы» регулярно отмечались, занимая от 20 до 70 % площади северо-западного района.

С 1978—1984 гг. сероводород занимал 5—20 % площади «заморов». Это явление отмечается и в самое последнее время. Например, в период 9—23 августа 1986 г. зафиксирован дефицит растворенного кислорода у побережья Дунайской устьевой области, где температура воды на поверхности в исследуемый период 26,0 °С, соленость воды 10,10 ‰ при относительном содержании растворенного кислорода 138 % насыщения, водород-

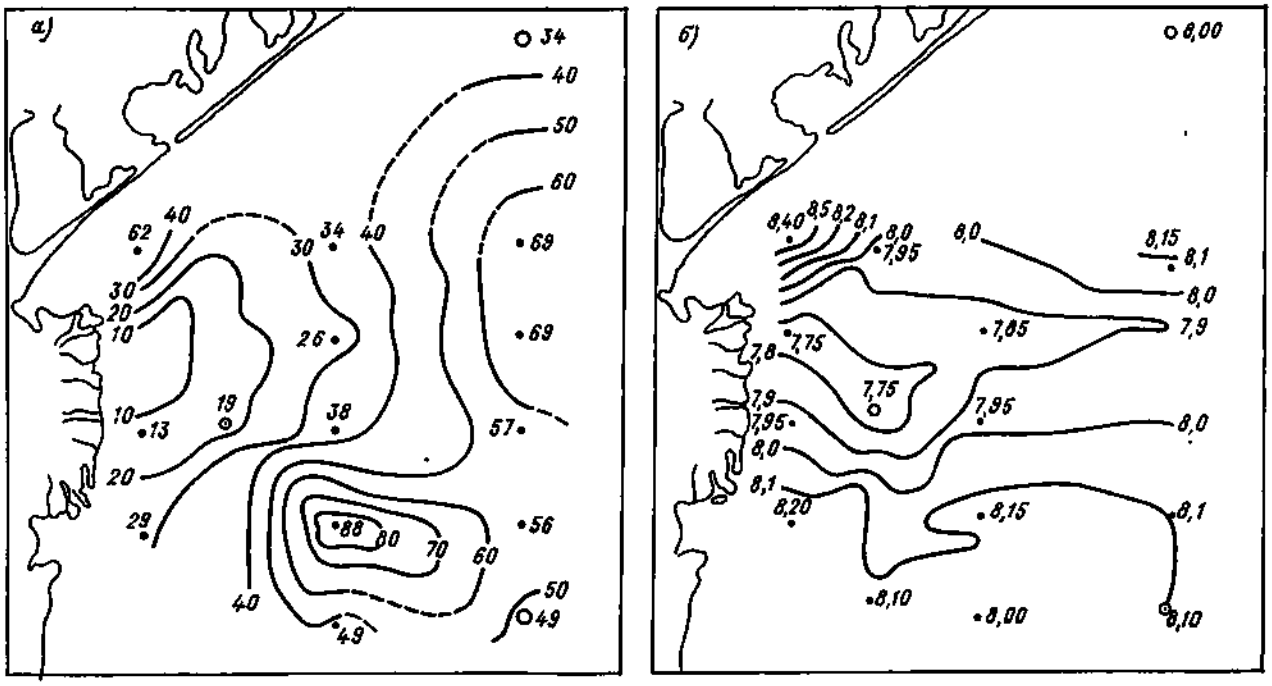

Рис. 24. Содержание растворенного кислорода (% насыщения) (*а*) и водородного показателя (*б*) в период 9—23 августа 1986 г.

ный показатель 8,60 (рис. 24). В придонном же горизонте обнаружен сероводород (0,06 мг/л) при полном отсутствии кислорода, а pH при этом 7,75. Кислород в придонном слое (20 м), по-видимому, израсходован на окисление органического вещества.

Формирование «заморной» ситуации хорошо прослеживается, в частности, по следующим данным.

В 1981 г. в весенне-летний период (квадрат 1) при существовании условий, ограничивающих водообмен, согласно работе [20], уже формировалось низкое содержание растворенного кислорода. Его содержание у дна достигало 6,76 мг/л, в то же время на глубине 10 м составляло 10,07 мг/л. При этом небольшие содержания кремния в придонном слое (470 мкг/л) свидетельствовали о наличии большого количества диатомовых водорослей, а плотность воды на поверхности составляла 5,66 усл. ед. и в придонном горизонте (20 м)— 14,66 усл. ед.

4.1.3. Оценка баланса растворенного кислорода

В. И. Беляев с сотрудниками [17] выполнили оценку вклада различных факторов в кислородный баланс северо-западного шельфа Черного моря по результатам моделирования с применением ограниченного массива натурных наблюдений. Используя математическую модель авторов работы [17], совместно с Е. П. Давыдовой были выполнены оценки влияния речного стока и соединений биогенных элементов (азота и фосфора) на временной ход содержания растворенного кислорода с привлечением массива натурных наблюдений (табл. 20) за период 1939—1962 и 1963—1985 гг. При этом использовались также данные по речному стоку [8] и данные Е. П. Давыдовой о годовом ходе концентраций фитопланктона, макрофитов, зоопланктона, органического вещества, соединений азота и фосфора, а также количества рыб (рис. 25).

Изменение содержания растворенного кислорода рассчитывалось по уравнению

$$\frac{d[O_2]}{dt} = \sum_{i=1}^{4} \overline{A_i},$$

где A_1 — выделение растворенного кислорода O_2 в результате процесса фотосинтеза водной растительностью (фитопланктоном и макрофитами); A_2 — расход растворенного кислорода на дыхание

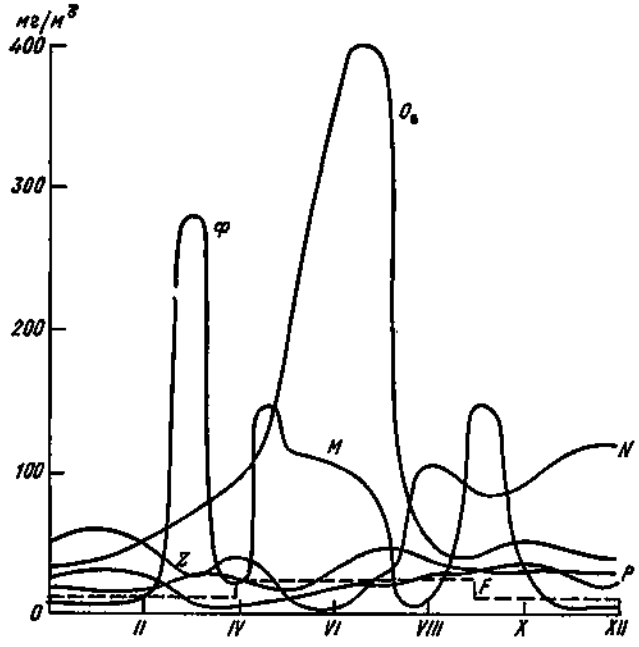

Рис. 25. Годовой ход изменения параметров экосистемы. *Ф* — фитопланктон; *M* — макрофиты; *Z* — зоопланктон; *N*, *P* — биогенные соединения азота и фосфора; O_B — растворенное органическое вещество; *F* — рыбы.

зоопланктона и рыб; A_3 — расход растворенного кислорода на окисление органического вещества; A_4 — обмен растворенным кислородом через границы системы (поступление со стоком рек, обмен с глубинной частью моря, с атмосферой).

Выделение растворенного кислорода при фотосинтезе фитопланктоном и макрофитами описывается выражением

$$A_1 = \alpha_ф P_ф Ф + \alpha_м P_м M,$$

где $\alpha_ф$, $\alpha_м$ — выделение кислорода на единицу образуемой биомассы фитопланктона и макрофитов за вычетом затрат на дыхание растений соответственно; $Ф$ и M — концентрации фитопланктона и макрофитов; $P_ф$ и $P_м$ — скорость роста биомассы растений за счет фотосинтеза фитопланктона и макрофитов соответственно [18].

Расход растворенного кислорода на дыхание зоопланктона и рыб определяется следующим образом:

$$A_2 = b_Z Z + b_F F,$$

где Z — концентрация зоопланктона; F — количество рыб; b_Z и b_F — удельные расходы кислорода на дыхание соответственно для зоопланктона и рыб, которые оценивались по формуле Винберга:

$$b_{Z,F} = a_{Z,F} W_{Z,F}^{-K_{Z,F}},$$

где $a_Z = 0{,}165$; $K_Z = 0{,}19$; $W_Z = 1$ мг; $a_F = 0{,}297$; $K_F = 0{,}19$; $W_F = 20$ г; a и b — в мг/(м³·с) [18].

Расход кислорода на разложение органического вещества описывается выражением $A_3 = CERO_B$, где $C = 1{,}5$ — химический эквивалент кислорода для органического вещества; R — влияние содержания растворенного кислорода на скорость разложения органического вещества; E — скорость разложения органического вещества; O_B — концентрация органического вещества [18].

Обмен кислородом через границы района определяется по формуле

$$A_4 = \frac{Q}{V} O_{2B}' - \frac{Q_1}{V} O_{2S} + \frac{W}{V} O_{2d} + K(O_{2p} - O_2),$$

где Q — суммарный поток воды в район из глубинной части моря; W — суммарный береговой сток; V — общий объем воды в районе; Q_1 — суммарный поток воды, вытекающий из района; O_{2B}, O_{2S}, O_{2d} — содержание кислорода соответственно в глубинных, поверхностных и речных водах; O_{2p} — равновесная концентрация кислорода в поверхностном слое моря, расчитываемая по формуле (при $S = 17‰$)

$$O_{2p} = 13{,}15 - 0{,}582T^{0{,}685},$$

где T — температура воды, °С; K — константа аэрации, представлена выражением

$$K = K_{ср} + K_м \cos[\pi(t - t_{max})]/2],$$

где $t_{max} = 270$ сут (декабрь); $K_{ср} = 2{,}65$ сут$^{-1}$; $K_м = 2{,}25$ сут$^{-1}$.

Численные значения компонентов уравнения баланса представлены в табл. 24 и на рис. 25 [169], а вычисленная кривая содержания кислорода приведена на рис. 26.

Полученные расчетные данные позволили прийти к следующим выводам. Принятая модель кислородного баланса реагирует на изменение речного стока. Большой вклад в изменение содержания

Таблица 24

Некоторые численные компоненты уравнения баланса растворенного кислорода

Компонент	Численное значение
$\alpha_ф$	0,35 мгО$_2$/мг
$\alpha_м$	0,35 мгО$_2$/мг
b_Z	$+1{,}229 \cdot 10^{-2}$ млО$_2$/мг
b_F	10 · 162 млО$_2$/мг
O_{2B}	2 860 мг/м³
O_{2d}	14 300 мг/м³
Q	$3{,}14 \cdot 10^{11}$ м³/сезон
V	$3{,}5 \cdot 10^{12}$ м³/сезон
Q_1	$1{,}57 \cdot 10^{12}$ м³/сезон

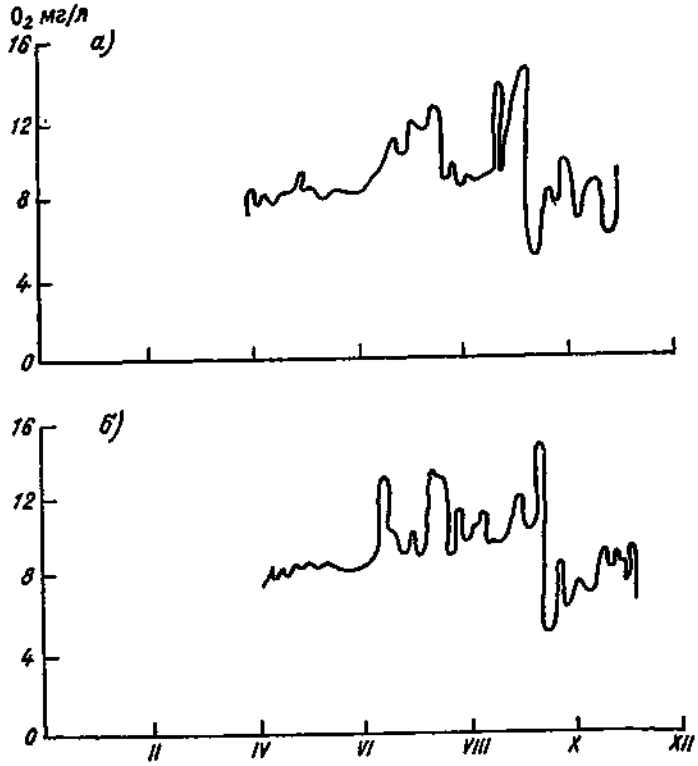

Рис. 26. Годовой ход содержания кислорода в поверхностном слое северо-западного района моря по математической модели с учетом речного стока, мг/л.
а — 1951 — 1957 гг.; *б* — 1958 — 1976 гг.

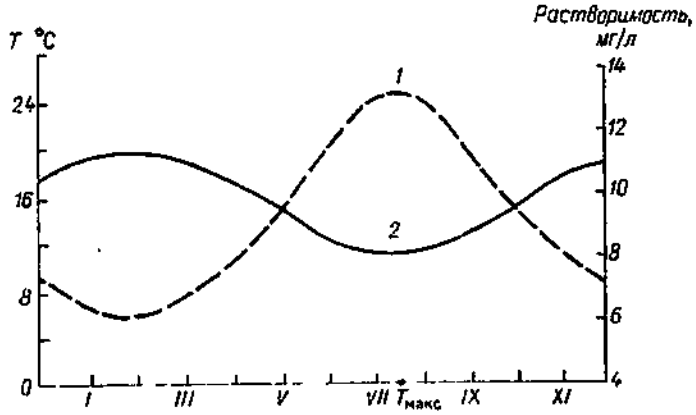

Рис. 27. Годовой ход температуры (*1*) и растворимости кислорода (*2*).

растворенного кислорода вносят фотосинтетическая деятельность водных растений и процессы, связанные с окислением органического вещества. Увеличение поступления биогенных элементов со стоком рек на 40 % приводит к увеличению органического вещества в период отмирания фитопланктона (конец лета), а численность живых организмов при этом уменьшается. Происходят так называемое вторичное загрязнение воды. Годовой ход растворимости кислорода, вычисленный из данных по годовому ходу температуры воды и зависимости растворимости от ее температуры, имеет синусоидальный характер (рис. 27).

4.1.4. Оценка суточного хода содержания растворенного кислорода

Анализ суточного хода выполнен с использованием натурных наблюдений на многосуточной станции в период 31 июля — 7 августа 1982 г. (координаты станции $\varphi = 42°00'$ и $\lambda = 28°20'$). Комплексный анализ такого ряда наблюдений для северо-западного района моря выполнен впервые с применением спектрального и корреляционного анализов. Массив наблюдений для горизонтов 0, 10, 20, 30, 50, 75 м составляет 2100 наблюдений с их однородной плотностью на всех стандартных горизонтах. Измерения и расчеты температуры воды, солености, растворимости и содержания кислорода, концентрации феофетина производились с дрейфующего судна с дискретностью 3 ч. Известно, что суточные изменения растворенного кислорода в морских водах обусловлены суточными изменениями температуры воды, продуцированием при фотосинтезе и потреблением при окислительных процессах и дыхании морских организмов, обмена с атмосферой и диффузионного обмена с нижними слоями воды. Амплитуда суточных изменений содержания кислорода определяется соотношением интенсивности процессов продуцирования и потребления. В светлое время суток происходит накопление растворенного кислорода, а в темное — его потребление.

Многосуточные тенденции хода различных параметров выявлялись с помощью инверсионного критерия линейного тренда (табл. 25). В период выполнения многосуточной станции течение носило неустойчивый характер. Анализ данных табл. 25 показывает, что размах значений тренда растворимости кислорода за 7 сут, в слое 0—50 м от —0,56 мг/л до 0 (критерий Фишера 0,03—0,35), а тренд незначим. Но для горизонта 75 м размах тренда составил 0,44 мг/л, критерий Фишера 6,8, поэтому для данного горизонта тренд значим.

Размах значений тренда растворенного кислорода в слое 0—75 м варьировал в пределах от —0,64 до 0,11 мг/л при значениях коэффициентов тренда от —0,011 до 0,001.

Максимальный размах тренда свойствен водам горизонтов, наиболее существенно подвергающихся действию гидрологических и антропогенных факторов (10 и 30 м).

Размах значений тренда для солености вод в слое 0—75 м варьировал в пределах от —0,57 до —0,93 ‰ при коэффициентах тренда от —0,010 до —0,016.

Максимальный размах тренда приурочен к поверхностному горизонту и слою 50—75 м. Тренд солености значим для слоя 0—75 м (см. табл. 25).

Размах значений тренда температуры воды варьировал в слое 0—75 м от —0,06 до 3,46 °С с коэффициентом тренда от —0,001 до 0,0841. Тренд не значим только на горизонтах 0 и 50 м.

Таблица 25

Параметры межсуточной изменчивости растворимости, содержания и приращения кислорода, а также изменчивости солености, температуры воды и концентрации феофитина

Гидрохимический показатель	Горизонт, м	Коэффициент тренда	Размах тренда	Критерий Фишера
Растворимость кислорода	0	0,000	0,01	0,81
	10	0,000	0,01	0,03
	20	—0,010	—0,56	1,1
	30	—0,001	—0,10	1,0
	50	—0,001	—0,06	0,35
	75	0,007	0,44	6,8
Растворенный кислород	0	—0,001	—0,10	2,4
	10	—0,003	—0,13	6,1
	20	—0,000	—0,01	0,02
	30	—0,000	—0,64	30
	50	—0,000	—0,03	0,03
	75	—0,001	0,11	0,76
Соленость	0	—0,014	—0,80	95
	10	—0,011	—0,66	69
	20	—0,010	—0,57	48
	30	—0,012	—0,73	95
	50	—0,016	—0,92	143
	75	—0,016	—0,93	149
Температура воды	0	0,003	0,18	2,5
	10	0,003	0,15	8,6
	20	0,059	3,46	2,2
	30	0,017	1,01	8,6
	50	—0,001	—0,06	0,70
	75	0,001	0,05	32
Приращение кислорода	0	—0,001	—0,11	3,1
	10	—0,001	—0,11	5,5
	20	0,010	0,56	15
	30	0,004	0,24	2,9
	50	0,000	0,01	0,01
	75	—0,006	—0,31	3,1
Феофитин	0	—0,002	—0,10	2,4
	10	—0,002	—0,13	6,1
	20	0,001	0,07	0,32
	50	0,001	0,05	0,09
	75	0,005	0,07	2,9

Размах значений тренда для приращения растворенного кислорода (разность между относительным содержанием и растворимостью кислорода) находился в пределах от —0,31 до 0,56 мг/л для всей исследованной толщи воды. Значения приращения кислорода на горизонте 20 м изменялись от —1,19 до 0,78 мг/л, что свидетельствует в ряде случаев о расходе растворенного кислорода. Тренд значим на горизонтах 10 и 20 м (см. табл. 25).

Размах значений тренда для феофитина в слое 0—75 м варьировал от —0,13 до 0,32 мкг/л, и все тренды значимы.

Максимальные колебания температуры воды наблюдались в слое скачка плотности (20—30 м).

Во всей толще вод обнаружен небольшой отрицательный тренд солености.

Поверхностные воды на многосуточной станции были хорошо аэрированы (104—105 % насыщения).

Среднее квадратическое отклонение концентрации растворенного кислорода в слое 0—75 м изменялось от 0,143 до 1,206 мг/л за период наблюдений на этой станции при минимальном его содержании в пределах 7,29 мг/л (на глубине 75 м) и 8,17 мг/л (на глубине 30 м) и максимальном 8,60—9,83 мг/л. При этом минимальные значения в слое 0—50 м приходились в основном на ночные сроки наблюдений (0; 3 ч и реже — в 21 ч), а максимальные значения — на светлое время суток (6, 12, 18 ч). Изменчивость концентраций кислорода в данной точке наблюдений в слое 0—75 м обусловлена, очевидно, перемешиванием вод и фотосинтетической активностью растений. Дисперсия в этом

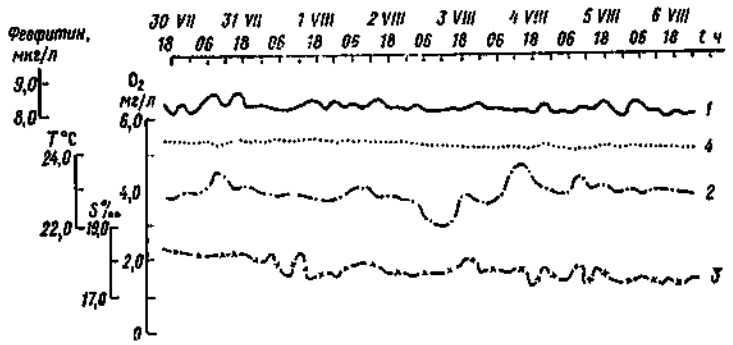

Рис. 28. Изменчивость концентраций феофетина (*1*), температуры воды (*2*), солености (*3*), приращения растворенного кислорода (*4*) на многосуточной станции. Поверхностный горизонт.

слое изменялась от 0,010 до 0,013 при среднем изменении концентрации кислорода от 8,27 до 8,37 мг/л, а коэффициенты вариации — в пределах 1,5—1,7 %.

Температура воды и соленость имели сравнительно малую суточную изменчивость в слое 0—10 м.

В слое 20—50 м средние значения растворенного кислорода достигают 8,62—9,10 мг/л, что можно объяснить преобладающим влиянием суточной изменчивости фотосинтетической активности фитопланктона в слое термоклина и сгонно-нагонными явлениями. Значения дисперсии концентраций кислорода в слое 20—50 м непрерывно возрастают по глубине от 0,034 до 0,120, а коэффициенты вариации увеличиваются от 2,6 до 4,5 %. Минимальные значения растворенного кислорода приходятся, также как и для 0—10-метрового слоя, на темное время суток, а максимальные — на утренние и дневные сроки наблюдений.

На глубине 20 м отмечались максимальные пределы колебаний температуры воды (13,16—22,28 °С).

На глубине 75 м содержание растворенного кислорода несколько меньше, чем на горизонте 50 м (7,29—9,23 мг/л). Коэффициент вариации и дисперсия на этом горизонте также уменьшаются до 3,8 % и 0,045 соответственно.

Динамика ряда гидролого-гидрохимических и гидробиологических показателей, полученная на описываемой многосуточной станции, показана на рис. 28, а некоторые статистические характеристики распределения этих показателей представлены в табл. 26.

Результаты корреляционного анализа связей между концентрацией растворенного кислорода, с одной стороны, и соленостью, «приращением» растворенного кислорода, температурой воды, концентрацией феофитина и растворимостью кислорода, с другой стороны, представлены в табл. 27.

Таблица 26

Статистические характеристики показателей водной среды на многосуточной станции

Характеристика	Горизонт, м					
	0	10	20	30	50	75
Растворенный кислород						
Средняя концентрация, мг/л	8,37	8,27	8,62	9,00	9,10	7,90
Среднее квадратическое отклонение, мг/л	0,14	1,20	0,21	0,31	0,41	0,30
Коэффициент вариации, %	1,7	1,5	2,5	3,5	4,5	3,8
Критерий Корню	1,7	1,6	1,6	1,5	1,6	2,3
Соленость						
Средняя концентрация, ‰	17,83	17,92	18,06	18,38	18,65	—
Среднее квадратическое отклонение, ‰	0,30	0,26	0,25	0,27	0,32	—
Коэффициент вариации, %	1,7	1,5	1,4	1,6	1,5	—
Критерий Корню	1,3	1,5	1,5	1,6	1,5	—
Растворимость кислорода						
Средняя растворимость, мг/л	7,72	7,72	8,39	9,17	10,47	10,47
Среднее квадратическое отклонение, мг/л	0,04	0,31	0,31	0,23	0,21	0,40
Коэффициент вариации, %	0,6	0,4	3,8	2,5	2,0	3,8
Критерий Корню	1,7	1,6	1,6	1,6	8,7	5,4
Феофитин						
Средняя концентрация, мкг/л	8,4	8,3	8,6	—	9,1	7,9
Среднее квадратическое отклонение, мкг/л	0,2	0,1	0,3	—	0,4	0,4
Коэффициент вариации, %	1,7	1,5	3,5	—	4,2	—
Критерий Корню	1,7	1,6	1,8	—	1,6	—
Температура воды						
Средняя температура, °С	23,01	22,90	18,67	10,17	7,97	7,68
Среднее квадратическое отклонение, °С	0,25	0,12	1,94	0,82	0,17	0,03
Коэффициент вариации, %	11	0,5	10	8,1	2,1	0,3
Критерий Корню	2,1	1,5	1,6	1,5	2,8	1,4
«Приращение» растворенного кислорода						
Среднее значение, мг/л	0,64	0,54	0,23	—0,33	—1,37	—2,57
Среднее квадратическое отклонение, мг/л	0,14	0,11	0,36	—0,34	0,40	0,40
Коэффициент вариации, %	23	22	160	100	29	16
Критерий Корню	1,7	1,6	1,7	2,1	1,6	2,7

Выявлена хорошая мера сопряженной изменчивости между содержанием растворенного кислорода и его приращением. Ошибка корреляции в слое 0—75 м между вышеуказанными величинами не превышает 0,12.

Зависимость между содержанием растворенного кислорода и температурой воды в слое 0—75 м отсутствует, а ошибка корреляции в этом слое не превышает 0,13.

Таблица 27

Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии

Коэффициент корреляции r	Горизонт, м						Уравнение регрессии
	0	10	20	30	50	75	
r_{O_2-S}	−0,20	−0,13	−0,01	−0,42	−0,04	0,16	$1/y = A + Bx$
$r_{O_2-\Delta O_2}$	0,96	0,96	0,54	−0,20	0,86	0,38	$y = A + B \lg x$
r_{O_2-t}	0,11	−0,14	−0,09	−0,24	0,05	0,17	$y = A + B \lg x$
$r_{O_2-\Phi}$	0,02	0,14	0,27	—	0,38	0,8	$\lg y = A + B \lg x$
$r_{O_2-P_{O_2}}$	0,03	−0,14	−0,06	−0,15	−0,39	−0,39	$1/y = A + Bx$

Примечание: O_2 — концентрация растворенного кислорода; S — соленость; ΔO_2 — «приращение» растворенного кислорода; t — температура воды; Φ — концентрация феофитина, мкг/л; P_{O_2} — растворимость кислорода.

Коэффициент корреляционной связи между концентрацией феофитина и растворенного кислорода равномерно увеличивается с глубины 20 м до придонного слоя.

Корреляционная связь между концентрацией растворенного кислорода и его растворимостью в слое 0—75 м слабая, а ошибка корреляции составляет 0,11—0,13.

Полный статистический анализ изменчивости содержания растворенного кислорода и его растворимости и приращения, а также солености и температуры воды, образующих случайное поле, при приемлемых ограничениях на свойства поля, по данным рис. 28, дает энергетический спектр, который распределяет интенсивности колебаний по частотам (временным и пространственным). Спектрограммы концентраций растворенного кислорода представлены на рис. 29.

Межсуточная изменчивость солености на поверхностном горизонте имеет один энергонесущий частотный интервал с периодом 9,8—8,7 ч. На горизонте 10 м основной энергетический вклад во временную изменчивость солености воды вносит гармоника, период которой составляет 39 ч. В слое 20—50 м энергонесущие частотные интервалы отсутствуют. Основной энергетический вклад на горизонте 75 м вносят гармонические колебания, периоды которых — 11,1 и 7,1 ч. Данная временная гармоника, очевидно, обусловлена сейшевыми колебаниями Черного моря.

Спектральный состав многосуточной изменчивости температуры воды в слое 0—10 м не имеет энергетических вкладов. На горизонте 20 м прослеживается один энергонесущий частотный интервал с периодом 8,7 ч. В слое 30—50 м спектральный состав межсуточной изменчивости температуры воды имеет несколько энергонесущих частотных интервалов: 15,6—19,5 ч на горизонте 30 м и 6,5—7,1 ч, 9,8—11,1 ч на горизонте 50 м. Один энергонесущий частотный интервал с периодом 9,8 ч отмечается на горизонте 75 м. В изменчивости температуры воды прослеживаются в основном колебания короткопериодных циклов, очевидно, обусловленные световыми (дневными и ночными) колебаниями.

Во временной изменчивости содержаний растворенного кислорода (см. рис. 29) в слое 0—10 м доминируют частотные интервалы 10,5—12,0 ч (на поверхности) и 9,3—10,5 ч (на горизонте 10 м). На поверхности основной энергетический вклад во временную изменчивость содержания кислорода вносит гармоника, период которой составляет 42 ч. В слое 20—30 м периоды с энергетическим вкладом отсутствуют. На горизонте 50 м

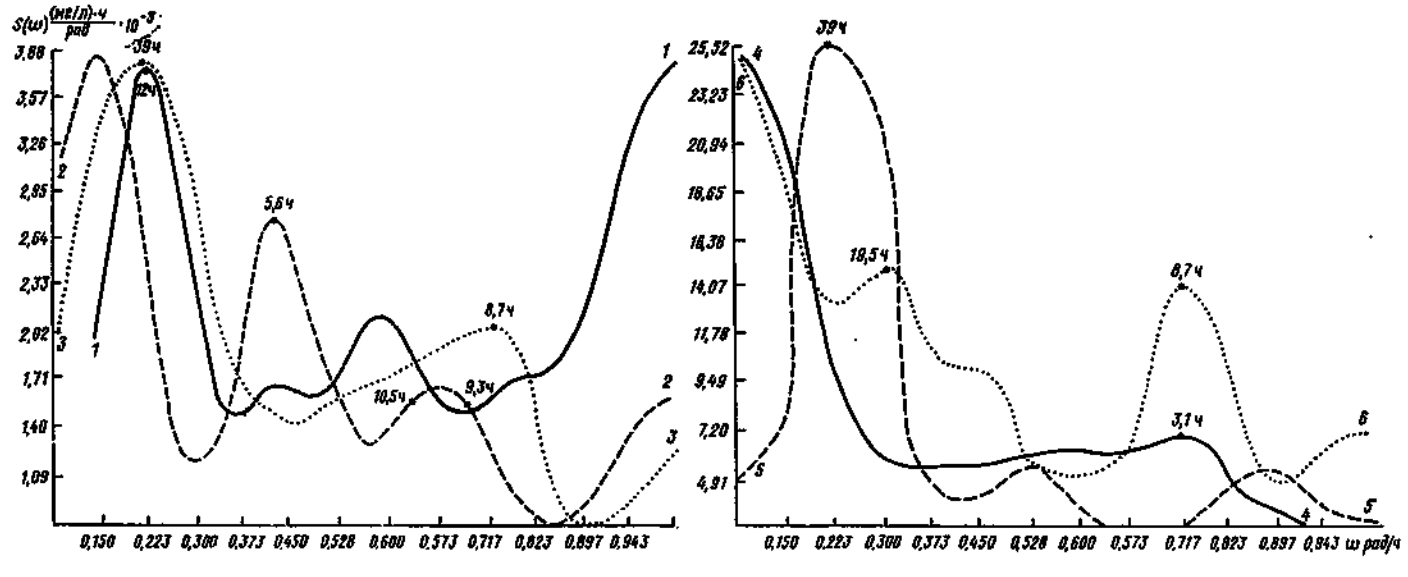

Рис. 29. Спектрограмма межсуточной изменчивости содержания растворенного кислорода.
1 — поверхностный горизонт, *2* — 10 м, *3* — 20 м, *4* — 30 м, *5* — 50 м, *6* — 75 м.

прослеживается несколько энергонесущих частот с периодами 39, 13 и 7 ч, причем энергонесущая частота с периодом 39 ч выражена наиболее значительно (см. рис. 29).

На горизонте 75 м в энергетический вклад вносит гармоника, период которой 8,7 ч. Эта гармоника обусловлена, очевидно, изменениями процессов фотосинтеза, который в свою очередь зависит от солнечной радиации, ее суточных колебаний.

Спектральный состав межсуточной изменчивости растворимости в слое 0—75 м имеет несколько энергонесущих частот. Основной энергетический вклад прослеживается на горизонтах 10, 20, 50 м, периоды частот которых — 39; 8,7 и 15,6 ч соответственно. Указанная гармоника, вероятно, обусловлена изменениями температуры воды в течение 7 сут. На горизонте 75 м вклад энергонесущих частот отсутствует.

В изменчивости содержаний феофетина доминирует энергонесущая частота, период которой составляет 39 ч, прослеживающаяся на поверхности и на горизонте 50 м.

Спектральный состав межсуточной изменчивости приращения имеет (как и у феофитина) основную энергонесущую частоту, период которой 39 ч на поверхности и на горизонте 50 м.

Результаты спектрального анализа свидетельствуют о едином энергонесущем вкладе в межсуточную изменчивость концентраций растворенного кислорода, феофитина, приращения концентрации кислорода. Феофитин, являясь продуктом разложения пигмента хлорофилла «А», характеризует, очевидно, также некоторое определенное количество кислорода, расходуемого на разложение органического вещества. Приращение растворенного кислорода показывает, на какие процессы расходуется растворенный кислород и какое его количество при этом затрачивается, если концентрация кислорода ниже от его равновесной концентрации. В случаях когда концентрация кислорода выше от его равновесной «компенсационной точки», то приращение показывает прибыль растворенного кислорода за счет фотосинтеза, обмен с атмосферой, либо диффузионного переноса кислорода из нижележащих слоев воды.

Выводы

Выявленный Ю. П. Селиным [146] характер квазипериодических колебаний средних годовых концентраций растворенного кислорода, обусловливаемых колебаниями стока рек, результатами представленных исследований не прослеживается, так как многоводные годы наблюдались в 1965 г. (312 км³), 1966 г. (325 км³), 1970 г. (404 км³), 1980 г. (360,5 км³) и в 1981 г. (336,5 км³).

В весенний сезон 1985 г. отмечалось увеличение водности рек в северо-западной части Черного моря (Днестра, Днепра, Южного Буга, Дуная) на 66,3 км³/год в сравнении с 1984 г., что, в свою очередь, способствовало повышению содержания растворенного кислорода до 20 мг/л в весенний сезон в 1985 г.

Среднее содержание растворенного кислорода в весенний сезон за 1963—1985 гг. на поверхностном горизонте увеличилось на 0,83—4,03 мг/л в сравнении с 1939—1962 гг.

На горизонте 50 м диапазон изменчивости средней концентрации за 1963—1985 гг. увеличился на 0,47—1,73 мг/л в сравнении с 1939—1962 гг.

В летний сезон за период 1963—1985 гг. на поверхностном горизонте среднее содержание растворенного кислорода уменьшилось в сравнении с 1939—1962 гг. на 0,66—2,37 мг/л.

Среднее многолетнее содержание растворенного кислорода за период 1963—1985 гг. на поверхностном горизонте в осенний сезон увеличилось на 1,76—1,06 мг/л в сравнении с 1939—1962 гг.

Среднее многолетнее содержание растворенного кислорода в зимний сезон в поверхностном горизонте за 1963—1985 гг. увеличилось практически незначительно (на 0,26—0,03 мг/л) в сравнении с 1939—1962 гг.

Заход обедненных кислородом вод основного черноморского течения в зимний сезон уменьшило среднее содержание растворенного кислорода от 8,92 мг/л (1939—1962) до 6,76 мг/л (1963—1985).

В осенний период формируется область с повышенным содержанием кислорода (до 10,06—10,19 мг/л) за счет влияния быстрого охлаждения поверхностных вод.

По мере приближения ко дну влияние температуры и процессов фотосинтеза ослабевает.

Уменьшение водообмена от зимы к лету приводит к существенному изменению гидрохимического режима вод северо-западной части моря.

В весенне-летний период года режим циркуляции при максимальном речном стоке Дуная может привести к развитию заморных явлений в северо-западной части.

В 0—50-метровом слое тренд содержания растворенного кислорода не значим, на горизонте 75 м — значим (критерий Фишера 6,8).

Максимальный размах тренда свойствен водам горизонтов, существенно подвергающихся действию гидрологических и антропогенных факторов. Тренд феофитина значим для горизонтов 0—75 м.

Результаты корреляционного анализа выявили хорошую меру сопряженной изменчивости между содержанием растворенного кислорода и его приращением.

Коэффициент корреляционной связи между концентрацией растворенного кислорода и феофитином равномерно увеличивается с глубины 20 м до придонного слоя.

В 0—10-метровом слое во временной изменчивости содержаний растворенного кислорода доминируют частотные интервалы 10,5—12,0 ч (на поверхности) и 9,3—10,5 ч (на горизонте 10 м).

Основной энергетический вклад во временную изменчивость содержания растворенного кислорода вносит гармоника, период которой составляет 42 ч. На горизонте 50 м энергонесущая частота с периодом 39 ч выражена наиболее значительно.

Результаты спектрального анализа показали наличие единого энергонесущего вклада в межсуточную изменчивость концентраций растворенного кислорода, феофитина, приращения концентрации кислорода.

4.2. Открытое море

Введение

Первые исследования по содержанию растворенного кислорода в Черном море относятся к

1924—1928 гг., когда в экспедиции под руководством Ю. М. Шокальского впервые было выполнено определение растворенного кислорода. С 1923 по 1926 г. на Черном море производили работы Азово-Черноморская научно-промысловая экспедиция под руководством А. Г. Книповича, в которой также были получены материалы по содержанию растворенного кислорода.

С 1925 г. гидрохимическими работами в Черном море занимается Севастопольская биологическая станция. Для более эффективного выполнения экспедиционных работ начиная с 1935 г. происходит кооперирование различных организаций, работающих на Черном море. Во всех совместных экспедициях ГИМЕИН, АзЧерНИРО, СБС и других выполнялись гидрохимические работы с обязательным определением растворенного кислорода.

В 1935 г. на судне «Гидрограф» ЧФ, СБС, ГГИ, УГМС Черного и Азовского морей, Военно-Морская Академия им. К. Е. Ворошилова выполняют съемку всего Черного моря с исследованием растворенного кислорода.

Большим недостатком всех наблюдений этих лет являлась чрезвычайная растянутость экспедиционных работ во времени (до двух-трех месяцев).

В 1951, 1952, 1954 и 1956 гг. гидрометеорологической обсерваторией Черноморского флота выполняются синхронные съемки шестью отрядами, материалы которых представляют большую ценность, так как съемки охватили всю акваторию моря продолжительностью не более 6 сут.

АзЧерНИРО ежегодно выполняет в Черном море гидрохимические работы по определению кислорода по разрезу Ялта—Батуми.

Начиная с 1957 г. изучением кислородного режима моря занимается Бассейновая гидрометеорологическая обсерватория Черного и Азовского морей Гидрометслужбы СССР. В прибрежных районах моря с 1957 г. при морских гидрометеорологических станциях I разряда и в устьевых областях рек Дуная, Южного Буга и Днепра открываются гидрохимические лаборатории, которые занимаются изучением гидрохимического режима в закрепленных за ними регионах моря. В период Международного геофизического года в 1957—1958 гг. также проводились синхронные гидролого-гидрохимические съемки. К участию и съемкам привлекались все организации, работающие на Черном море.

За период 1925—1986 гг. накоплен статистически значимый материал по содержанию растворенного кислорода в море. По отдельным экспедиционным исследованиям опубликовано большое число работ (Б. А. Скопинцев, М. А. Добржанская, А. Г. Книпович, Н. И. Чигирин, Я. К. Гололобов, А. К. Богданова, Е. Ф. Шульгина, В. А. Жоров и др.).

Однако результаты одной-двух съемок не могут дать представления об общих закономерностях распределения растворенного кислорода в море и причинах, их обусловливающих. Е. Ф. Шульгиной были обобщены материалы по содержанию растворенного кислорода в Черном море с 1948 по 1963 г. в виде осредненных карт на горизонтах 0, 50, 100 и 200 м по сезонам года. Наиболее фундаментально на настоящий момент кислородный режим моря рассмотрен Б. А. Скопинцевым в его монографии [150], включающей наблюдения до начала 60-х гг. Однако такие вопросы, как суточные изменения кислорода, явления заморов и причины их возникновения, влияние ветровых условий на распределение кислорода в шельфовой зоне, влияние зарегулирования водного стока Днепра и Дуная на содержание растворенного кислорода в море и отдельных его районах, влияние водообмена с соседними морями, изменение зоны сосуществования кислорода и сероводорода в многолетнем разрезе до и после зарегулирования водного стока рек, изменение полей кислорода в периоды до и после зарегулирования водного стока по отдельным сезонам и за год, влияние антропогенных факторов на содержание растворенного кислорода в прибрежных и устьевых районах описаны в общих чертах.

4.2.1. Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы

При составлении настоящего раздела были проанализированы материалы наблюдений за растворенным кислородом с 1939 по 1986 г. включительно, находящиеся в гидрометфонде СО ГОИНа и снятые с магнитных лент ЦОД. В работу вошли материалы синхронных съемок Черного моря, материалы МГИ АН УССР, БГМО ЧАМ, СО ГОИН, АзЧерНИРО и подразделений. УГКС Госгидромета СССР, содержащие ежегодные наблюдения на стандартных вековых разрезах. Всего было проанализировано более 30 000 наблюдений за растворенным кислородом от поверхностного горизонта до глубины 200 м. Для получения полной картины распределения кислорода в море за многолетний период и выявления его сезонной изменчивости на различных горизонтах анализ материалов проводился по квадратам (см. рис. 1). Для каждого квадрата по сезонам на различных горизонтах рассчитывались средние значения абсолютного и относительного содержания растворенного кислорода и находились экстремальные значения.

За период 1939—1962 гг. (условно принятый как период до зарегулирования речного стока) акватория моря была разбита на 66 квадратов размером $1 \times 1°$, а за период 1963—1986 гг.— на 95 квадратов размером $1° \times 0{,}40'$ (см. рис. 1). Как в первый, так и во второй периоды, основная масса станций выполнялась в прибрежных и открытых районах Черного моря, принадлежащих СССР, наименьшая — в районе турецкого побережья. В первый период большее количество наблюдений выполнялось весной и летом, во второй — осенью (табл. 28).

Число наблюдений в каждом квадрате неодинаково. Наибольшее число наблюдений приходится на квадраты, расположенные в северо-западном районе моря, у берегов Крыма, Кавказа, в прибосфорском районе, а некоторые квадраты не освещены наблюдениями полностью. Для каждого квадрата по сезонам на различных горизонтах рассчитывалось среднее значение абсолютного и относительного содержания кислорода, а также для всей акватории моря. Анализ вод на содержание растворенного кислорода выполнялся по руководствам [125, 126].

4.2.2. Режим растворенного кислорода

Горизонт 0—0,5 м. В период 1939—1962 гг. Гидрометслужбой СССР было выполнено 1899 станций, а в период 1963—1985 гг.— 2716 станций.

Таблица 28

Материалы наблюдений за содержанием растворенного кислорода в открытой акватории моря

Наименование НИС	Дата	Район исследования	Количество станций	Количество проб
«Горизонт»	V 1960 г.; V, VI, VII, VIII, IX, X 1963 г.	Вековой разрез м. Херсонес — прол. Босфор	46	363
	V 1960 г.	Разрез м. Синоп — Керчь	2	15
	IV, VI 1961 г.; II, III, IV, V, VI, VIII, XII 1963 г.; IX, X, XI 1962 г.; I, II, III, IV, VII, VIII, IX 1964 г.; VI 1965 г.	Вековой разрез м. Кодош — Унье	154	1 032
	VIII 1964 г.	100-мильный разрез от пос. Ольганка на юго-юго-запад	15	95
	VII 1966 г.; XI 1967 г.	50-мильный от м. Такиль на юг	11	58
«Мгла»	I, III, V 1961 г.; VIII, XII 1963 г.; VIII, XI 1964 г.; III 1966 г.; II 1968 г.; II, V 1969 г.; XI 1971 г.; II 1972 г.; VIII 1973 г.; VII 1974 г.	Вековой разрез м. Херсонес — прол. Босфор	520	5 359
	III, V 1961 г.	Разрез м. Синоп — Керчь	18	125
	IV 1963 г.; II 1968 г.; VII 1972 г.; II, V, VIII 1969 г.	Вековой разрез м. Кодош — Унье	57	516
	III—IV, V—VI, VII—VIII 1975 г.		87	614
	VII 1967 г.; II 1968 г.; II 1969 г.; XI 1971 г.; II 1972 г.; VI 1973 г.; VI 1975 г.	Вековой разрез Ялта — Батуми	96	777
«Риф»	V 1963 г.; V 1964 г.; V, VIII, XI 1965 г.; XI 1966 г.; V, VIII, XI 1969 г.; III 1970 г.	Вековые разрезы м. Херсонес — прол. Босфор, м. Кодош — Унье, Ялта — Батуми	68	596
«Александр Власов»	XII 1965 г.; II, XI 1966 г.; VIII 1967 г.	Вековые разрезы м. Кодош — Унье, Ялта — Батуми	19	158
«Прибой»	VIII 1968 г.	Вековые разрезы Ялта — Батуми, м. Херсонес — прол. Босфор	14	111
«Пассат»	VII, XI 1972 г.; X—XI 1973 г.	Вековые разрезы м. Херсонес — прол. Босфор, Ялта — Батуми, м. Кодош—Унье	124	1 212
«Волна»	II, V, VII 1974 г.	Вековой разрез м. Кодош — Унье	12	89
«Академик Вернадский»	III—IV 1973 г.	Все вековые разрезы	64	552
«Муссон»	I—II 1974 г.; IV 1977 г.; XI 1979 г.	Все вековые разрезы	304	2 273
«Эрнст Кренкель»	IV 1974 г.; VIII 1984 г.	Все вековые разрезы, юго-западная часть моря	138	1 308
«Виктор Бугаев»	VI—VII 1986 г.; XI—XII 1974 г.; VIII 1984 г.; II 1985 г.	Восточная часть, все вековые разрезы, юго-западная часть моря	245	1 977
«Тантал»	X 1974 г.; IX 1979 г.; III—IV 1980 г.	Все вековые разрезы	87	617
«Георгий Ушаков»	II 1979 г.	Все вековые разрезы	53	448
«Яков Гаккель»	III, VII, XI 1973 г.; IV, VIII, XI 1976 г.; II, IV, VII—VIII, X—XI 1977 г.; II, VI—VII, VIII 1978 г.; XII 1980 г.; II, V, VII—VIII 1981 г.; VII, X—XI 1982 г.; VII 1984 г.; II, IV, XI 1985 г.; II 1986 г.	Вся акватория моря, все вековые разрезы	2514	19 240

В первый период число наблюдений достигало: весной — 70 (квадрат 21), летом — 42 (квадрат 19), осенью — 16 (квадрат 19), зимой — 41 (квадрат 18). Во второй период наблюдений плотность станций хотя и была выше, но от квадрата к квадрату менялась в широких пределах: в весенний сезон — 1—32 (максимум в квадрате 41), в летний сезон — 1—57 (квадрат 1), в осенний сезон — 1—82 (квадрат 73), в зимний сезон — 1—54 (квадрат 73). Несмотря на различную статистическую обеспеченность расчетных данных, представленные поля сезонных концентраций кислорода наиболее объективно по сравнению с ранее описанными в литературе характеризуют пространственную и временную изменчивость в каждом сезоне за 46-летний период наблюдений. Изменчивость этих полей по акватории моря достаточно велика. В весенний сезон 1939—1962 гг. средние концентрации кислорода, свойственные каждому квадрату, различались в пределах 8,86—11,23 мг/л (98—119 % насыщения), в летний — в пределах 6,66—9,02 мг/л (86—112 % насыщения), в осенний — в пределах 7,22—9,59 мг/л (92—100 % насыщения), в зимний сезон — в пределах 8,97—13,49 мг/л (93—105 % насыщения). Наибольший размах колебаний средних абсолютных содержаний кислорода (4,52 мг/л) достигал в зимний период, что связано с неравномерностью охлаждения поверхностной воды по акватории моря в этот сезон. В летний сезон размах колебаний средних концентраций по акватории моря уменьшился до 2,34 мг/л (26 % насыщения). Максимальные концентрации весной в 1939—1962 гг. достигали 13,46 мг/л (150 % насыщения) в северо-западной части моря (квадрат 2), а летом — 11,79 мг/л (143 % насыщения, квадрат 6). Осенью абсолютные средние значения концентраций кислорода в связи с охлаждением вод возрастают по сравнению с летом по всей акватории моря, а относительные значения близки к 100 % насыщения.

В период 1963—1985 гг. средние концентрации кислорода колебались в следующих пределах: в весенний сезон — 8,76—11,22 мг/л (90—112 % насыщения), в летний сезон — 7,37—9,33 мг/л (100—120 % насыщения), в осенний сезон — 8,32—10,00 мг/л (100—105 % насыщения), в зимний сезон — 9,94—13,93 мг/л (94—106 % насыщения).

Приведенные численные данные за два периода, продолжительностью по 23 года, позволяют сделать следующие выводы.

В период 1963—1985 гг. наблюдались более высокие абсолютные и относительные значения концентраций кислорода, чем в период 1939—1962 гг.

Четко наблюдается сезонная изменчивость концентраций кислорода: увеличение их в осенне-зимний период и уменьшение в весенне-летний; наибольшее насыщение кислородом — летом, наименьшее — зимой.

Средние квадратические отклонения значительно меняются по акватории моря в каждом сезоне. Так, например, весной 1939—1962 гг. их значения колебались в пределах 0,13—1,33 мг/л при средних значениях концентраций 9,63—11,19 мг/л (квадраты 40 и 2 соответственно), а весной 1963—1985 гг. — в пределах 0,07—1,59 мг/л при средних значениях концентраций 10,22 и 11,22 мг/л (квадраты 39 и 2). Как правило, большему среднему и и максимально-разовому значению концентрации кислорода соответствует большая относительная изменчивость (так, зимой 1963—1985 гг. среднее квадратическое отклонение концентрации кислорода достигало 1,56 мг/л при среднем его содержании 12,99 мг/л в квадрате 10). Однако в отдельных квадратах большему среднему значению содержания кислорода соответствует меньшее среднее квадратическое отклонение. Например, в квадрате 1 зимой 1963—1985 гг. среднее содержание кислорода 13,52 мг/л, а среднее квадратическое отклонение 1,11 мг/л. Столь значительный разброс в значениях средних квадратических отклонений свидетельствует о том, что временная изменчивость концентраций кислорода в каждом квадрате весьма значительна внутри каждого сезона в течение периодов 1939—1962 и 1963—1985 гг.

Структура поля концентраций кислорода характеризуется разной степенью неравномерности и немонотонности его распределения в зависимости от сезона года.

Весной 1939—1962 гг. наблюдалось относительно монотонное убывание среднего содержания кислорода с северо-запада на юго-восток от 11,23 (квадрат 1) до 8,86 мг/л (квадрат 66). Максимальная концентрация кислорода (13,46 мг/л) наблюдалась в квадрате 2 при средней 11,19 мг/л, а минимальная (7,42 мг/л) — в квадрате 33 при средней 9,56 мг/л. В центральной части моря (квадраты 35, 36) наблюдалась зона пониженного содержания кислорода (<9 мг/л). В 1963—1985 гг. распределение кислорода было более равномерным и монотонным. Средние концентрации кислорода в различных квадратах моря были близки между собой: 10,34—11,22 мг/л в северо-западной части моря (квадраты 1—6) и 10,24—10,86 мг/л — в восточной (квадраты 81—85, 93, 94). Максимальная же концентрация кислорода (14,22 мг/л) в квадрате 2 была выше, а минимальная (7,16 мг/л) в квадрате 27 — ниже во второй период.

Летом 1939—1962 гг. сохранялось более высокое среднее содержание кислорода (7,83—9,02 мг/л) в северо-западной части моря (квадраты 1—8), чем в восточной (7,02—8,42 мг/л в квадратах 51—55, 61—66). Максимальная концентрация кислорода 12,22 мг/л наблюдалась у Крымского побережья (квадрат 19), а минимальная 5,26 мг/л — у Анатолийского побережья (квадрат 43). В 1963—1985 гг. содержание кислорода было несколько выше. Распределение средних концентраций кислорода было относительно равномерным и монотонно снижалось с северо-запада на юго-восток от 5,46—9,1 (квадраты 1—10) до 5,38—8,35 мг/л (квадраты 81—86). Максимальная и минимальная концентрации (13,73 и 5,04 мг/л) наблюдались в северо-западной части моря (квадраты 4 и 1 соответственно).

Осенью 1939—1962 гг. наиболее высокое среднее содержание кислорода (8,57—9,29 мг/л) сохранялось в северо-западной части моря (квадраты 1—8) и в центральной — 9,56 мг/л (квадрат 36). Максимальные разовые же концентрации кислорода (12,15 и 12,30 мг/л) наблюдались в восточной (квадраты 51 и 66), а минимальные разовые (16,72 мг/л) в центральной (квадрат 35) части моря.

В период 1939—1962 гг. зимой в квадрате 1 максимальная концентрация кислорода была 13,65 мг/л при средней в 13,49 мг/л. В направлении на юго-восток наблюдалось убывание содержания кислорода до минимума (8,97 мг/л) у восточного побережья моря напротив Поти (квадрат 52). В зимний сезон 1963—1985 гг. в северо-западной части моря максимальная концентрация составляла 17,42 мг/л при средней 13,93 мг/л (в квадрате 4). Зоны повышенного содержания кислорода (>11 мг/л) и пониженного (<11 мг/л) чередовались в пространстве по всей акватории моря (соответственно в квадратах 1—6, 10, 19, 20, 32, 44 и в квадратах 12, 23—25, 27—29, 34, 35, 41, 42, 54—56, 66, 67, 75—80). Минимальная концентрация кислорода (7,34 мг/л) при ее среднем значении 10,04 мг/л наблюдалась у берегов Кавказа (квадрат 41).

Период 1963—1985 гг. отличался от периода 1939—1962 гг. большей степенью неравномерности и немонотонности поля кислорода в аналогичные сезоны года.

Так, зимой 1963—1985 гг. (рис. 30) зоны повышенного и пониженного содержания кислорода чередовались в пространстве. Одна зона повышенных концентраций кислорода (>11 мг/л) располагалась в западной части моря, одна — в центральной и две — в восточной. В северо-западной части моря в прибрежных районах, от Очакова до м. Сфынтул-Георге, наблюдалась зона с концентрациями кислорода >13 мг/л, которая по площади была гораздо больше, чем в период 1939—1965 гг. Средняя наибольшая концентрация кислорода достигала 13,93 мг/л. Минимум (по средним) содержания кислорода (9,87 мг/л) наблюдался у м. Бафра. Зоны повышенного содержания кислорода (>11 мг/л) располагались в восточной части моря: одна — у Керченского пролива, другая — у Анатолийского побережья.

По работе [86] структуры поля кислорода в феврале 1963—1978 гг. несколько отличалась от представленной на рис. 30. В период 1960—1985 гг. средние концентрации кислорода были на 0,7—1,1 мг/л выше по сравнению с 1963—1978 гг. [86]. Если в феврале 1963—1978 гг. в центрах восточной и западной частей моря были выявлены две зоны пониженного содержания кислорода (9,5 и 10,4 мг/л соответственно), то в период 1960—1985 гг. в этих зонах средние концентрации кислорода (см. рис. 30) составляли 10,5 и 10,9 мг/л соответственно. В центральной части моря, по данным работы [86], концентрации кислорода составляли около

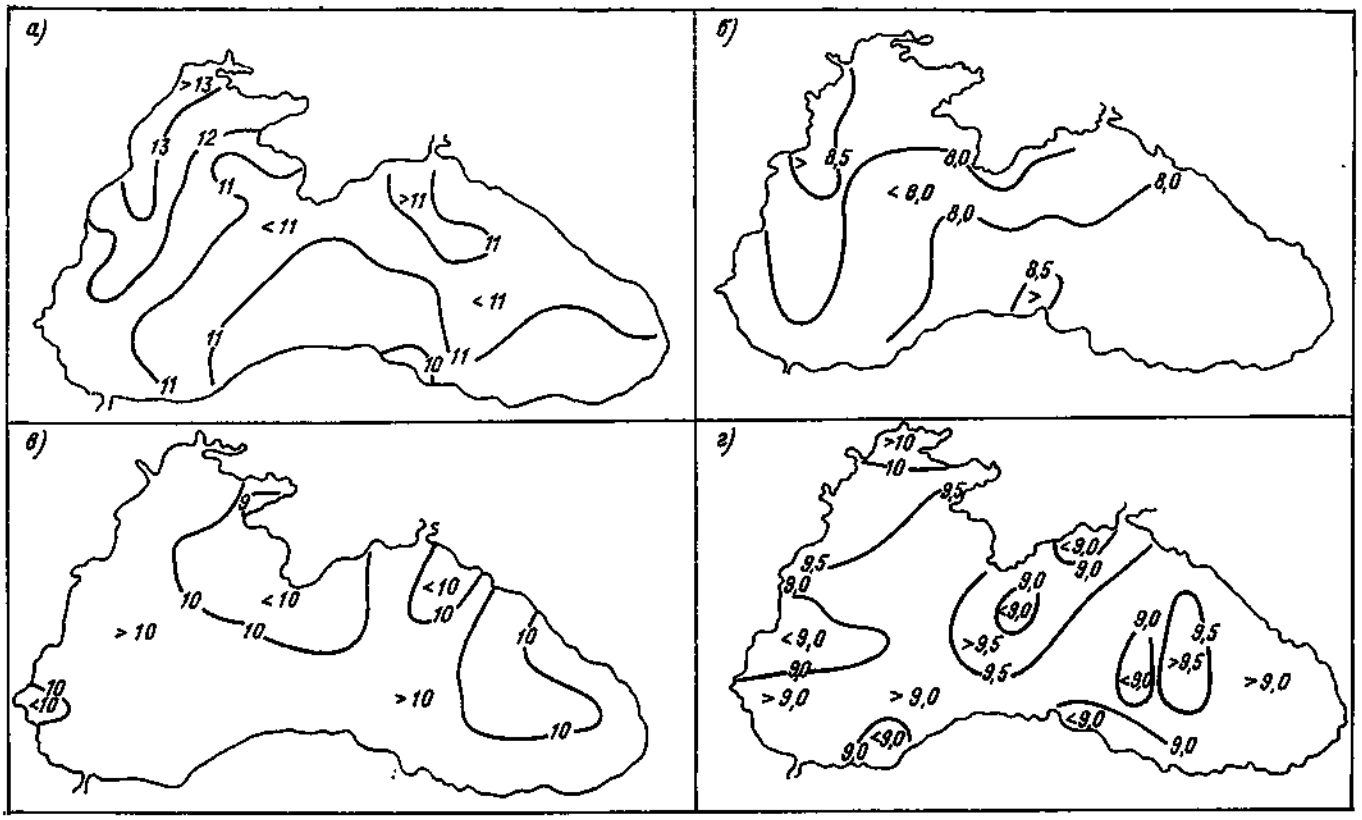

Рис. 30. Осредненное поле концентраций растворенного кислорода на горизонте 0—0,5 м в период 1963—1985 гг., мг/л. *а* — зима, *б* — лето, *в* — весна, *г* — осень

10,4 мг/л, а по данным рис. 30 среднее содержание кислорода здесь составляло 10,62—11,17 мг/л.

Осредненное поле кислорода в зимний период 1948—1963 гг., по данным Шульгиной [181], также несколько отличалось от представленного на рис. 30. В этот период зона высоких (>13 мг/л) концентраций кислорода в северо-западной части моря была по площади значительно меньше, чем в период 1960—1985 гг. В восточной части моря на месте зоны пониженных концентраций кислорода (<10,0 мг/л) в период 1960—1985 гг. выявлена зона с концентрациями более 11 мг/л. В центральной части моря, а также в прибосфорском и прикерченском районах моря среднее содержание кислорода в 1948—1963 гг. было также ниже на 0,4—0,8 мг/л, чем в период 1960—1985 гг.

Анализ осредненного поля кислорода в весенний период 1963—1985 гг. (см. рис. 30) показывает, что в северо-западной части моря средние концентрации кислорода для всего района (10,75 мг/л) остаются выше, чем в восточной (10,26 мг/л), западной (10,62 мг/л) и центральной (10,13 мг/л). В прикрымском районе моря, в западной части у Бургаса, в центре восточной части и у берегов Кавказа (напротив Анапы, Новороссийска и Туапсе) можно выделить четыре зоны пониженного (<10,0 мг/л) содержания кислорода при его среднем значении для всего моря 10,24 мг/л (среднее квадратическое отклонение равно 0,64 мг/л).

Содержание кислорода весной 1948—1963 гг., по данным Шульгиной [181], было несколько ниже, чем по нашим данным в 1963—1985 гг. и колебалось от 11 мг/л (северо-западная часть моря) до <9,0 мг/л у берегов Кавказа (от 110 до <100 % насыщения).

По данным работы [85], структура поля кислорода в апреле 1963—1978 гг. была близка к представленной на рис. 30 с той лишь разницей, что в 1963—1985 гг. концентрации кислорода в прибосфорском районе моря и у Анатолийского побережья были на 0,7—1,5 мг/л выше, а в прикрымском районе — на 0,7 мг/л ниже, чем по данным [85].

Осредненное поле кислорода в летний период 1963—1985 гг. (см. рис. 30) показывает, что кислород распределялся более равномерно и монотонно, чем в весенний сезон. Средние концентрации кислорода в водах западной, центральной и восточной частей моря были практически равны между собой (8,0 мг/л, что близко к полному насыщению — 99—101 %). У Анатолийского побережья, напротив Синопа, средняя концентрация кислорода равнялась 8,79 мг/л. Максимальное (по средним данным) содержание кислорода (9,33 мг/л) наблюдалось в квадрате 4 напротив Вилково, а минимальное (7,56 мг/л) — в квадрате 67 в центре восточного циклонического круговорота. В прибосфорском районе средние концентрации кислорода (7,96—8,0 мг/л) были также близки к средней по всей акватории моря (8,03 мг/л). По данным Шульгиной [181] структура поля концентраций кислорода в 1948—1963 гг. несколько отличалась от представленной на рис. 30. Так, в прибосфорском районе моря средние концентрации кислорода были ниже 7,0 мг/л (<95 % насыщения), а в северо-западной части моря не было зоны с концентрациями <9,0 мг/л. В восточной части моря средние концентрации кислорода (<8,0 мг/л) в 1948—1963 гг. были также ниже, чем в 1963—1985 гг.

По работе [85] структура поля кислорода в августе 1963—1978 гг. была близка к представленной на рис. 30. Однако в восточной части моря в 1963—1978 гг. зоны, в которых наблюдались пониженные содержания кислорода (<7,0 мг/л), по данным 1963—1985 гг. (см. рис. 30), уже отсутствуют. Средняя взвешенная концентрация кислорода по всему морю в 1963—1985 гг. была также на 0,3—0,5 мг/л выше, чем в 1963—1978 гг.

Осенью происходит увеличение абсолютного содержания кислорода по всей акватории моря, которое, по мнению разных авторов [69, 72, 75, 78, 150, 154, 181], связано с начинающимся в этот период всеобщим охлаждением вод. Пересыщение воды кислородом в отдельных районах моря свидетельствует о еще довольно существенном влиянии фотосинтеза [78, 150, 154, 181]. По работе [78] разница в содержании кислорода осенью 1963—1979 гг. между областями с высокими и низкими концентрациями его составляла 2,04 мг/л (20 % насыщения). Наиболее высокие концентрации кислорода (>10,0 мг/л) располагались на севере северо-западной части моря, а наиболее низкие (<9,0 мг/л) — в центре восточного циклонического круговорота.

По сравнению с периодом 1963—1979 гг. [78] структура поля кислорода осенью 1963—1985 гг. (см. рис. 30) изменилась незначительно. В северо-западной части моря зона с повышенным содержанием кислорода (>10,0 мг/л) не претерпела ощутимых изменений, а зона с содержанием кислорода <9,0 мг/л стала больше по площади и несколько сместилась на север. В западной части моря, напротив Бургаса, осенью 1963—1985 гг. выявляется зона с содержанием кислорода >9,0 мг/л, тогда как в 1963—1979 гг. содержание кислорода здесь было <9,0 мг/л [78]. В центральной же части моря, наоборот, среднее содержание кислорода в квадрате 36 упало с >9,0 в 1963—1975 гг. до 8,96 мг/л в 1963—1985 гг. В восточной части моря зона пониженного содержания кислорода (<9,0 мг/л) сместилась в 1963—1985 гг. на юг и к Анатолийскому побережью, где в 1963—1979 гг. содержание кислорода превышало 9,0 мг/л. Осенью 1963—1985 гг. поле концентраций кислорода было относительно равномерным по сравнению с другими сезонами того же периода времени и колебалось от 8,32 мг/л (квадрат 66) до 10,36 мг/л (квадрат 10). Осредненные концентрации кислорода близки между собой для различных частей моря: западная часть — 9,06, восточная — 9,06, центральная — 9,23, северо-западная — 9,49 мг/л. Средние квадратические отклонения в поле концентраций кислорода в западной и центральной частях моря составили 0,20, а в восточной и северо-западной — 0,38. Максимально-разовая концентрация наблюдалась в квадрате 1 (13,53 мг/л), а минимально-разовая — в квадрате 46 (7,12 мг/л).

По данным работы [86] в ноябре 1963—1978 гг. структура поля кислорода несколько отличалась от представленной на рис. 30 и от структуры поля кислорода в 1948—1963 гг. [181]. В северо-западной части моря в ноябре 1963—1978 гг. концентрации кислорода были выше примерно на 0,7 мг/л, чем осенью 1948—1963 гг., но на 0,4 мг/л ниже, чем осенью 1963—1985 гг. В западной части моря зона повышенных концентраций кислорода, расположенная в 1963—1978 гг. у берегов Румынии и Болгарии, сместилась осенью 1963—1985 гг. на юг к Бургасу и берегам Турции. В центральной и восточной частях моря в ноябре 1963—1978 гг. поле концентраций кислорода было практически равномерным [86], а осенью 1963—1985 гг., как отмечалось выше, здесь наблюдались зоны как пониженных (<9,0 мг/л), так и повышенных (>9,0 мг/л) его концентраций.

Межгодовая изменчивость содержания кислорода, рассчитанная из всего массива наблюдений в период 1960—1985 гг., представлена в табл. 29.

Таблица 29

Содержание кислорода на горизонте 0—0,5 м

Год	Среднее	Минимальное	Максимальное
1960	9,83/98	8,06/95	11,57/114
1961	9,32/100	7,24/92	11,37/109
1962	9,30/96	7,32/93	10,97/108
1963	8,72/100	8,23/96	12,43/112
1964	9,30/101	7,29/92	11,72/117
1965	9,52/101	7,60/82	12,13/110
1966	9,27/107	7,43/96	12,80/142
1967	9,06/109	6,51/91	12,05/157
1968	9,23/105	7,12/93	14,72/121
1969	9,13/103	5,62/73	11,96/115
1970	9,70/103	6,30/90	12,12/119
1971	8,97/100	5,04/64	13,52/135
1972	9,02/101	7,33/95	11,85/113
1973	9,09/101	7,79/93	10,44/107
1974	9,74/104	7,19/92	12,62/135
1975	8,49/100	6,63/88	11,46/112
1976	9,12/101	7,39/99	11,45/111
1977	9,29/100	6,43/80	11,69/136
1978	9,47/105	7,33/92	13,08/123
1979	9,39/100	7,40/92	10,53/110
1980	9,44/104	7,43/92	11,27/109
1981	9,43/104	5,72/72	12,59/139
1982	9,50/106	7,77/93	12,70/142
1983	9,93/109	6,86/85	17,01/192
1984	9,29/100	7,10/68	11,16/129
1985	9,97/102	7,82/95	20,01/166

Примечание. Числитель — концентрация кислорода, мг/л; знаменатель — процент насыщения.

Колебания средних годовых концентраций кислорода лежат в пределах 8,49—9,97 мг/л (96—109 % насыщения), минимальных — в пределах 5,04—8,23 мг/л (73—96 % насыщения), а максимальных — в пределах 10,53—20,01 мг/л (110—192 % насыщения). При этом характер изменчивости как средних годовых, так минимальных и максимальных концентраций отличается немонотонностью. Последняя формируется не только под влиянием естественного изменения среднего содержания кислорода на горизонте, но и под влиянием пространственной динамики его концентраций в различные периоды времени, а следовательно, и как результат смены сети станций наблюдений и различия в длинах рядов наблюдений. Поэтому для более полного выявления характера пространственно-временной динамики концентраций кислорода на горизонте 0—0,5 м рассмотрим некоторые наиболее характерные результаты экспедиционных исследований.

По данным 1960—1985 гг. наиболее высокому содержанию кислорода в поверхностном горизонте соответствовали наиболее низкие значения температуры и солености воды. Так, в январе—феврале 1974 г. (рис. 31) на станции, расположенной напротив м. Сфынтул-Георге, содержанию кислорода 13,08 мг/л (115 % насыщения) соответствовала

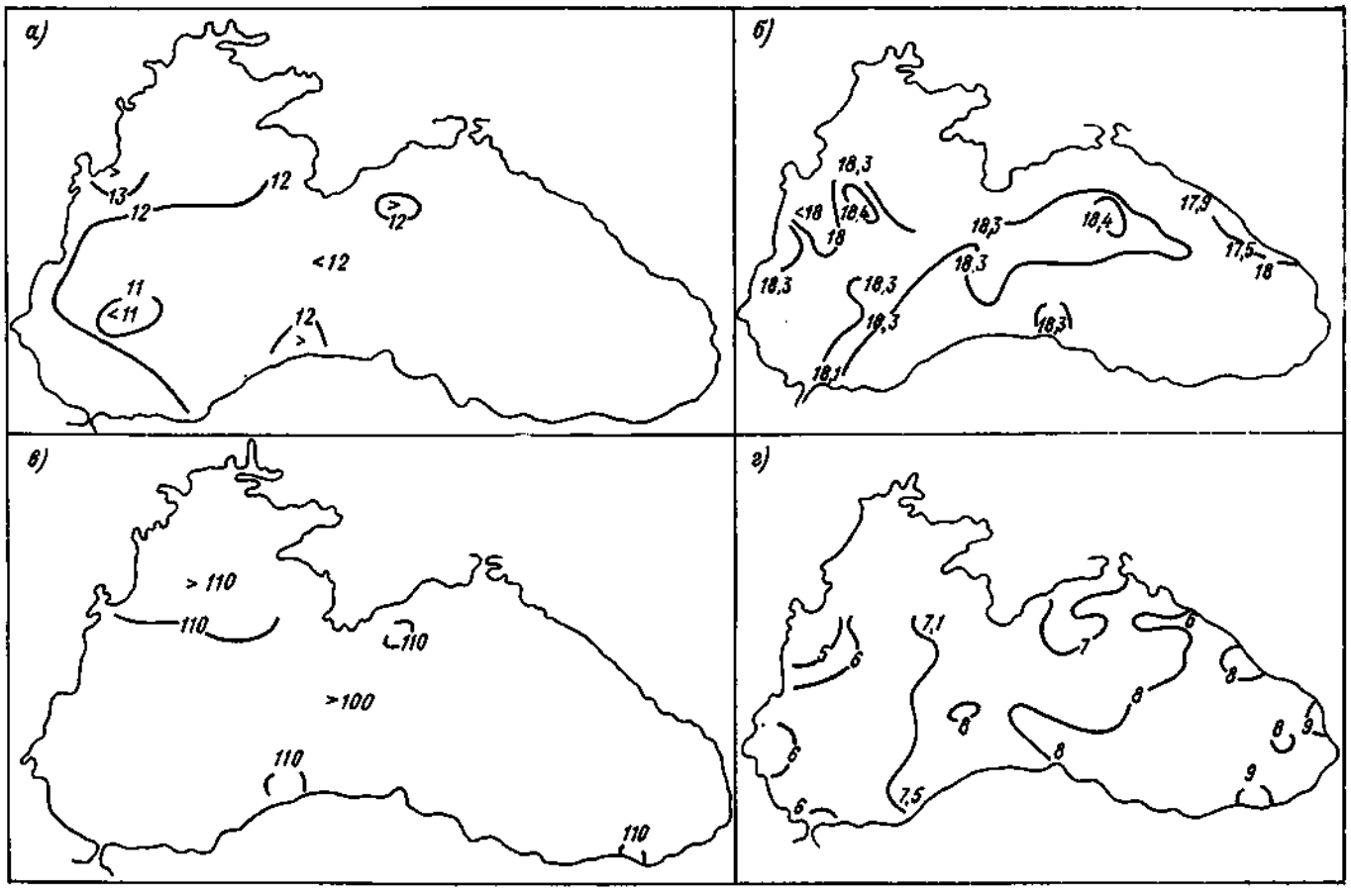

Рис. 31. Поле концентраций (*а, в*) растворенного кислорода (мг/л; % насыщения), солености (*б*, ‰) и температуры (*г*, °С) в январе — феврале 1974 г. на горизонте 0—0,5 м.

температура воды 4,18 °С и соленость 17,52 ‰. На станции, расположенной в центре западного циклонического круговорота, содержание кислорода 10,43 мг/л (103 % насыщения) при его среднем значении для всей акватории моря 11,15 мг/л (107 % насыщения), температура 7,01 °С и соленость 18,33 ‰. В январе—феврале 1974 г. наблюдалось самое высокое среднее абсолютное и относительное содержание кислорода за все зимние сезоны 1960—1985 гг.

В феврале 1977 г. (рис. 32) среднее содержание растворенного кислорода (10,9 мг/л или 105 % насыщения) в поверхностном горизонте было ниже, чем в январе—феврале 1974 г., но на отдельных станциях (напротив м. Сфынтул-Георге) его концентрации достигали 14,7 мг/л (~130 % насыщения) при температуре воды 6,2 °С и солености 15,79 ‰. Столь высокая концентрация кислорода и низкая соленость воды, в отличие от февраля 1974 г., объясняются неравномерностью стока Дуная [21, 69]. На севере восточной части моря можно выделить зону пониженного содержания кислорода (10,03—10,67 мг/л или 96—100 % насыщения). При этом температура (7,3—7,9 °С) и соленость (17,5—18,5 ‰) воды здесь были выше, чем в северо-западной части моря.

В феврале 1978 г. содержание растворенного кислорода по всей акватории моря было также высоким и колебалось в пределах 9,53—13,08 мг/л при среднем значении 10,27 мг/л, что близко к полному насыщению или даже пересыщению (99—110 %).

В феврале 1979 г. средняя концентрация кислорода по всей акватории моря составляла 10,40 мг/л (103 % насыщения), а пределы ее колебаний 9,99—10,40 мг/л.

Через два года (февраль 1981 г.) поле концентраций кислорода изменилось, судя по данным рис. 32. Как видно из рис. 32 наблюдались зоны повышенного его содержания (>11,0 мг/л или 98—104 % насыщения) в северо-западной части моря и пониженного (<10,0 мг/л или 95—97 % насыщения) в прикрымском районе моря и у берегов Кавказа (напротив Туапсе и Поти). В западной части моря средние концентрации кислорода (10,9 мг/л или 104 % насыщения) под влиянием стока рек — несколько выше, чем в восточной (10,3 мг/л или 98 % насыщения) при средней по всей акватории моря 10,76 мг/л или 99,7 % насыщения. У Анатолийского побережья, напротив м. Инеболу — м. Синоп, наблюдалась зона с содержанием кислорода > 11,0 мг/л и небольшим пересыщением (101—102 %).

В январе 1985 г. распределение кислорода на горизонте 0—0,5 м (см. рис. 32) было несколько более равномерным и монотонным, чем в предыдущие 1974—1984 гг. На подавляющем большинстве станций в глубоководной части моря его концентрации были близки к среднему по акватории значению 10,72 мг/л (100 % насыщения). В северо-западной части моря можно выделить зону повышенных концентраций кислорода (>11,0 мг/л или ~ 100 % насыщения) с максимумом (13,22 мг/л или 104 % насыщения) на станции, расположенной

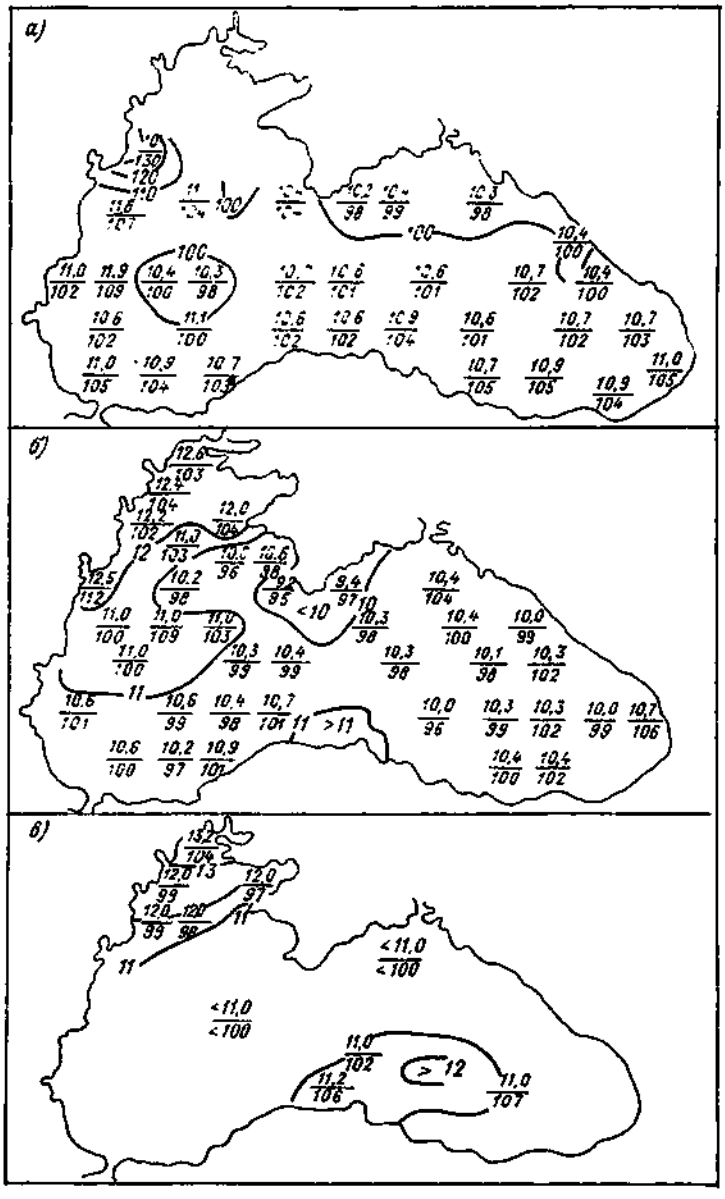

Рис. 32. Поле концентраций растворенного кислорода в феврале 1977 г. (*а*) и 1981 г. (*б*), в январе 1985 (*в*) (поле восстановлено методом Монте-Карло) на горизонте 0—0,5 м. Числитель — мг/л; знаменатель — % насыщения.

напротив г. Одессы. Температура воды на этой станции была 0,94 °С, а соленость 17,04 ‰. На одной из станций, расположенных в центре восточного циклонического круговорота, содержание кислорода достигало 12,50 мг/л (120 % насыщения) при температуре воды 8,58 °С и солености 17,78 ‰. Столь значительное пересыщение кислородом поверхностных вод в зимнее время года, по-видимому, можно объяснить, с одной стороны, сильным охлаждением воды до 7,0—7,5 °С, которое происходило ночью (о чем свидетельствуют данные на соседних станциях, расположенных в 30 милях севернее), и дальнейшим прогревом поверхностной воды днем до 8,58 °С. С другой стороны, пересыщение вод кислородом на юге восточной части моря может свидетельствовать о том, что процессы фотосинтеза здесь не прекращаются и в зимнее время года. Зона минимальных содержаний кислорода (<10,0 мг/л) наблюдалась на юго-востоке моря напротив Батуми с минимумом 9,13 мг/л или 95 % насыщения. Недонасыщение вод кислородом здесь, по-видимому, связано с его расходом на окисление органических веществ.

Содержание кислорода в воде Черного моря весной в большой степени зависит от интенсивности процессов фотосинтеза [151, 164, 181]. Так, например, в апреле 1977 г. (рис. 33) распределение кислорода было относительно равномерным и монотонно убывало с северо-запада на юго-восток от 12,59 мг/л (117,5 % насыщения) у Портицкого гирла до 10,24 мг/л (105 % насыщения) у Батуми. На севере северо-западной части моря насыщение кислородом было близко к полному насыщению (99,5 %), а содержание его равнялось 11,23 мг/л. Наименьшее содержание кислорода было в прикерченском районе — 10,04 мг/л (101,9 % насыщения).

В апреле 1985 г. (рис. 33) содержание кислорода по всей акватории моря было значительно выше, чем в предыдущие годы. Так, в северо-западной части моря его концентрации колебались от 11,4 до 20,0 мг/л (106—166 % насыщения), напротив Варны содержание кислорода равнялось 14,50 мг/л (121 % насыщения), в центральной части моря на одной из станций — 12,0 мг/л (112 % насыщения), а на востоке моря, напротив Поти — 10,57 мг/л (104 % насыщения) при средней по всему морю 11,77 мг/л (110 % насыщения). Столь значительное пересыщение вод растворенным кислородом в апреле 1985 г. можно объяснить интенсивно протекающими процессами фотосинтеза в поверхностном слое [164], слабым конвективным перемешиванием [21] и слабым обменом кислородом с атмосферой [17]. Самому высокому пересыщению воды кислородом (166 %) соответствовали низкие значения температуры (3,55 °С), солености (14,05 ‰) и плотности воды (11,25 усл. ед.). Характерно, что на горизонте 10 м на этой же станции температура воды была всего 0,36 °С, соленость — 17,57 ‰, плотность воды — 14,12 усл. ед. (северо-западная часть моря, станция[x], см. рис. 33), т. е. видна резкая стратификация вод, при которой конвективное перемешивание отсутствует. Содержание кислорода с глубиной также резко падало и составляло на горизонте 10 м 13,65 мг/л (106 % насыщения). На одной из станций в восточной части моря (напротив м. Вома) содержание кислорода в апреле было минимальным — 8,93 мг/л (86 % насыщения), температура — 8,44 °С, соленость — 18,28 ‰, плотность воды — 14,19 усл. ед. Пониженное содержание кислорода в отдельных районах моря авторы работ [16, 19, 28, 164] объясняют повышенным расходом кислорода на окисление органического вещества.

В августе—сентябре 1976 г. (рис. 34) концентрации кислорода колебались в пределах от 7,56 до 9,26 мг/л при среднем значении по всей акватории моря 8,02 мг/л (101 % насыщения). Зоны повышенных содержаний (>9,0 мг/л) наблюдались в северо-западной и восточной частях моря. Зоны пониженного содержания кислорода (<8,0 мг/л) наблюдались в западной и восточной (в ее центре и у Анатолийского побережья) частях моря.

В сентябре 1981 г. структура поля концентраций кислорода отличалась от структуры поля концентраций кислорода в августе—сентябре 1976 г. В северо-западной части моря на месте зоны повышенных концентраций в конце августа — начале сентября 1976 г. наблюдалась зона пониженных концентраций (<8,0 мг/л) в сентябре 1981 г.

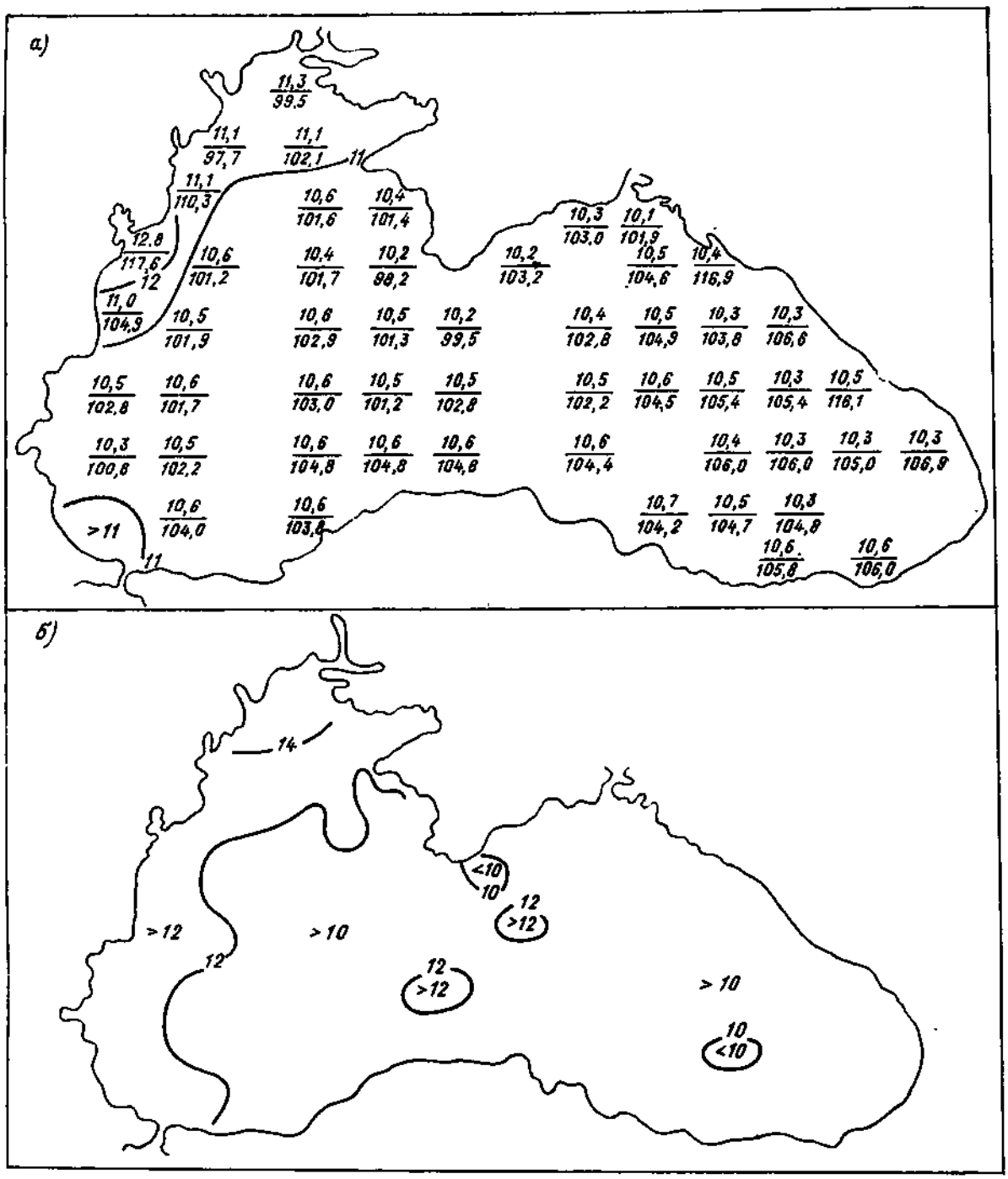

Рис. 33. Поле концентраций растворенного кислорода в апреле 1977 г. (*а*) и 1985 г. (*б*) на горизонте 0—0,5 м.

Числитель — мг/л; знаменатель — % насыщения.

В западной же части моря появилась обширная зона повышенных концентраций (>9,0 мг/л) с максимумом 9,30 мг/л (112 % насыщения) у Портицкого гирла. У Крымского побережья (напротив м. Сарыч) содержание кислорода в сентябре 1981 г. было 7,63 мг/л (98 % насыщения), а у Анатолийского (напротив м. Синоп) — 8,96 мг/л (108 % насыщения). В восточной части моря концентрации растворенного кислорода колебались от 7,72 до 8,73 мг/л (101—110 % насыщения) при среднем значении для акватории моря 8,23 мг/л (102 % насыщения).

В июле 1982 г. (см. рис. 34) средняя концентрация кислорода по акватории моря была на 1,69 мг/л выше, чем в августе—сентябре 1976 г. и на 1,47 мг/л, чем в сентябре 1981 г. и составляла 9,70 мг/л (106 % насыщения). На периферии моря концентрации кислорода были выше, чем в центральных районах и колебались от 8,92 до 12,40 мг/л. Зоны повышенных содержаний кислорода (>10,0 мг/л) располагались в северо-западной (напротив устья р. Дуная), в западной (квадраты 19, 20, 73 и 59), центральной (у Анатолийского побережья напротив м. Керемпе и Синоп) и у берегов Кавказа (напротив Геленджика, Туапсе и Поти). Между содержанием кислорода и температурой существует обратная корреляция (коэффициент корреляции по всему морю в летнее время

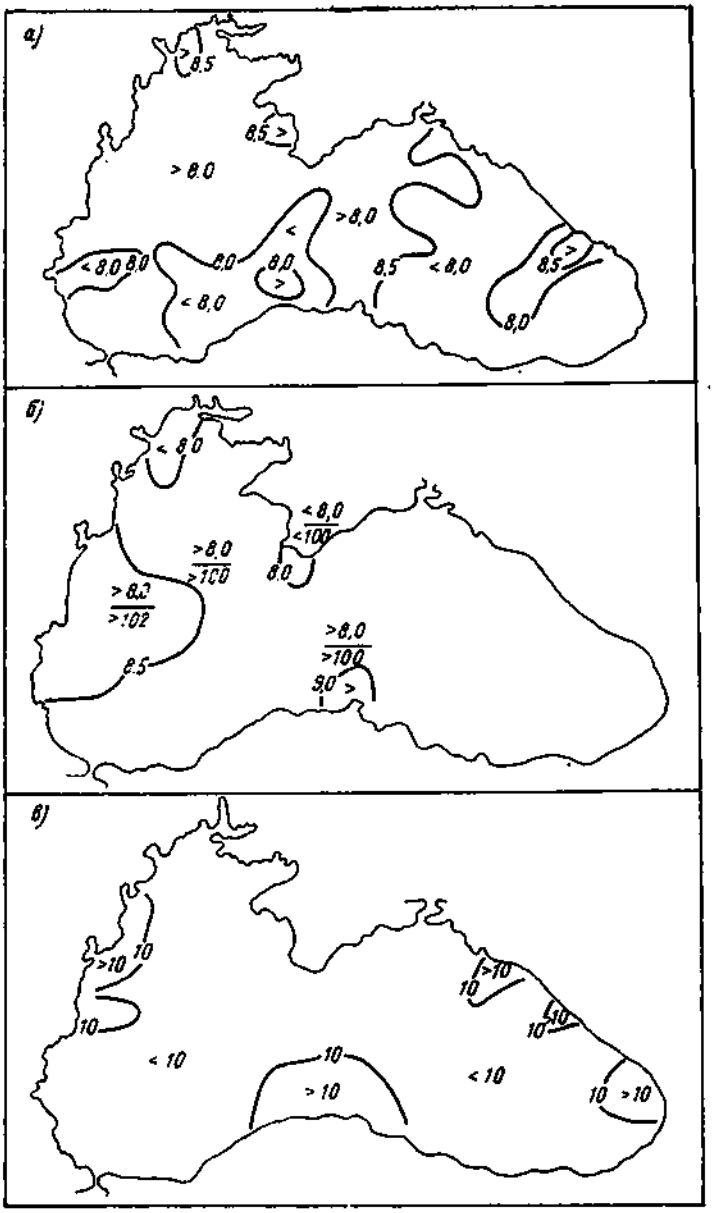

Рис. 34. Поле концентраций кислорода на горизонте 0—0,5 м, восстановленное методом Монте-Карло, в августе — сентябре 1976 г. (*а*), в сентябре 1981 г. (*б*) и в июле 1982 г. (*в*).
Числитель — мг/л; знаменатель — % насыщения.

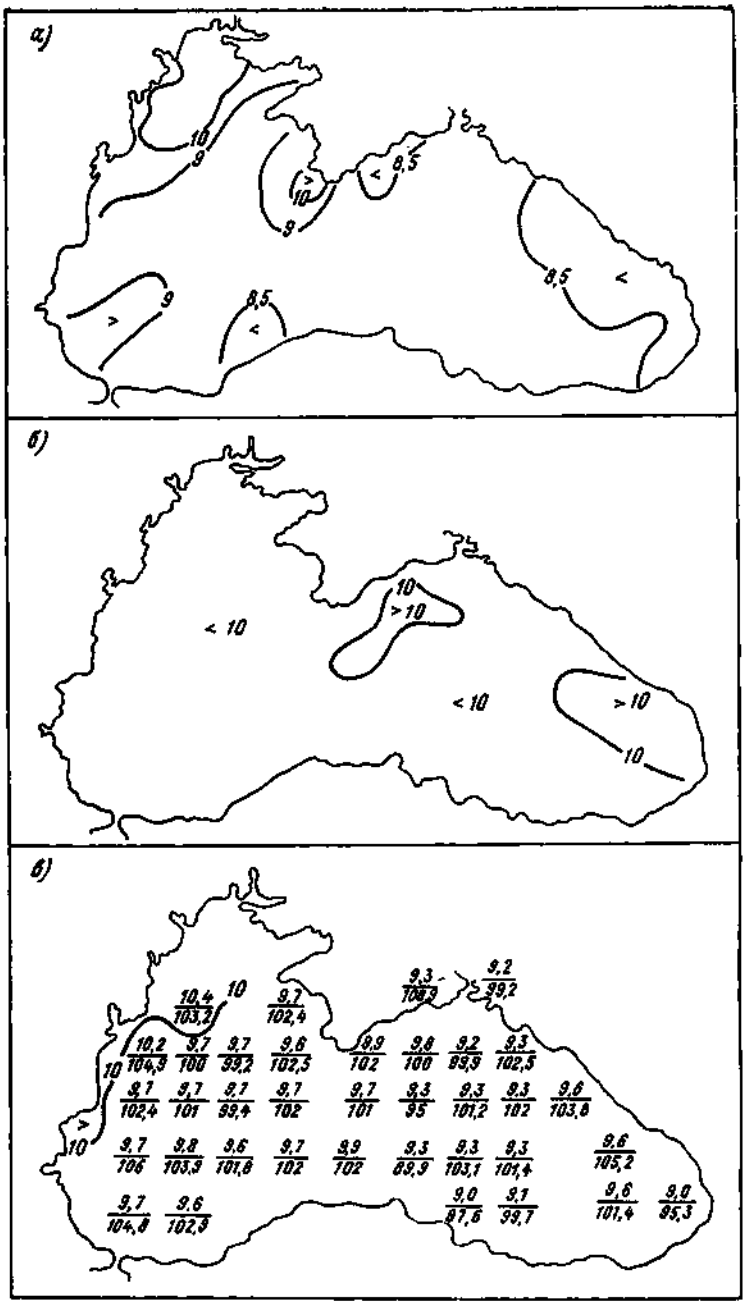

Рис. 35. Поле концентрации кислорода на горизонте 0—0,5 м в ноябре — декабре 1974 г. (*а*), в октябре — ноябре 1977 г. (*б*), в ноябре 1979 г. (*в*).
Числитель — мг/л; знаменатель — % насыщения.

года $r = -0{,}5$). Характерное уравнение регрессии для диапазона концентраций кислорода в пределах 87—157 % насыщения имеет вид

$$C_{O_2} = 24{,}89 - 14{,}07 \lg T,$$

где C_{O_2} — концентрация кислорода, мг/л; T — температура, °С.

По данным работы [81], «...суммарные объемы кислорода в глубоководной части менялись соответственно солнечной активности» в летний сезон. В этом аспекте важно проследить изменения в структуре полей кислорода в поверхностном горизонте (0—0,5 м) в осенний сезон на примере 1974—1985 гг.

В ноябре—декабре 1974 г. (рис. 35) концентрации кислорода колебались от 12,79 мг/л (138 % насыщения) в северо-западной части моря до 8,02 мг/л (88 % насыщения) у Анатолийского побережья при средней по всему морю 8,97 мг/л (100 % насыщения). В центральной глубоководной части моря концентрации кислорода были близки к среднему сезонному значению (8,97 мг/л). У Крымского полуострова наблюдались зоны с повышенным (>10,0 мг/л, или около 110 % насыщения) и пониженным (<9,0 мг/л, или 96 % насыщения) содержанием кислорода. В восточной части моря поле кислорода было относительно равномерным, размах колебаний его концентраций здесь не превышал 0,8 мг/л. У Кавказского побережья наблюдалась обширная зона с содержанием кислорода <9,0 мг/л (98—101 % насыщения).

В октябре—ноябре 1977 г. структура поля концентраций кислорода претерпела значительные изменения в сравнении с ноябрем—декабрем 1974 г. Так, в северо-западной части моря на месте зоны повышенных концентраций кислорода в ноябре—декабре 1976 г. появилась зона пониженных

концентраций (7,20—8,93 мг/л, или 77—95 % насыщения) в октябре—ноябре 1977 г. В восточной же части моря, наоборот, концентрации кислорода возросли с 8,36—9,20 мг/л (97—102 % насыщения) в ноябре—декабре 1974 г. до 9,39—11,69 мг/л (110—136 % насыщения) в октябре—ноябре 1977 г. В центральной части моря зона повышенного содержания кислорода (>10,0 мг/л) в ноябре — декабре 1974 г., в октябре—ноябре 1977 г. сместилась на юг к центру моря, а на месте зоны с пониженным содержанием кислорода (<9,0 мг/л, или 96 % насыщения) у Южного берега Крыма появилась зона с содержанием кислорода >10,0 мг/л (105—116 % насыщения). Столь разное распределение кислорода в осенний период 1974 и 1977 гг. объясняется, очевидно, тем, что первое характерно в большей степени для конца осени, а второе (октябрь—ноябрь 1977 г.) — для ее начала. Пересыщение кислородом (>110 %) в центральной и особенно в восточной частях моря может свидетельствовать о том, что процессы фотосинтеза здесь протекали довольно интенсивно.

В ноябре 1974 г. на станции, расположенной в центре восточной части моря, содержание кислорода 8,56 мг/л (98,5 % насыщения) при температуре воды 16,88 °С, соленость 18,46 ‰ и плотность 12,95. В северо-западной части, напротив Сулины, содержание кислорода 12,62 мг/л (139 % насыщения), температура воды 11,4 °С, соленость 12,36 ‰, т. е. зона повышенных концентраций кислорода образовалась, в данном случае, под влиянием стока р. Дуная, так как наибольшему его содержанию соответствовали пониженная температура и соленость воды, свойственные взморью Дуная.

В ноябре 1977 г. максимальное содержание кислорода (13,29 мг/л, или 136 % насыщения) было в центре восточной части моря при температуре 11,3 °С, солености 18,5 ‰, плотности воды 13,94 усл. ед. Среднее содержание кислорода по всей акватории моря 9,49 мг/л (105 % насыщения), минимальное (7,20 мг/л) — в северо-западной части при температуре 13,40 °С, солености 17,88 ‰, плотности 13,15 усл. ед.

На многосуточной станции в ноябре—декабре 1977 г. содержание кислорода колебалось от 8,69 до 10,90 мг/л (92—112 % насыщения). Между содержанием кислорода и соленостью воды обнаружена слабая корреляция, а с температурой корреляционная связь несколько выше ($r = -0{,}5$):

$$\lg C_{O_2} = 1{,}66 - 0{,}78 \lg T,$$

где T — температура с диапазоном ее колебаний 11,40—13,00 °С.

В ноябре 1979 г., в год максимальной солнечной активности, среднее по акватории моря содержание кислорода (9,60 мг/л, или 100 % насыщения) было наибольшим для этих месяцев периода 1963—1985 гг. Однако концентрации кислорода в ноябре—декабре 1979 г. колебались в небольших пределах: от 8,44 мг/л (92 % насыщения) в центре восточной части моря до 10,53 мг/л (105 % насыщения) у м. Сфынтул-Георге. Наибольшие концентрации кислорода (9,57—10,53 мг/л, или 103—109 % насыщения) наблюдались у западного побережья, наименьшие (8,76—9,54 мг/л, или 95—104 % насыщения) — у юго-восточного. В центральной и западной частях моря средняя концентрация кислорода составила 9,70 мг/л и была выше, чем в восточной (9,30 мг/л). Пересыщение кислородом (109 %) наблюдалось в прибосфорском районе моря, что может свидетельствовать о высокой степени активности процессов фотосинтеза здесь. В ноябре—декабре 1980 г. размах колебаний кислорода (9,09—10,20 мг/л, или 92—102 % насыщения) по акватории моря был меньше, чем в ноябре—декабре 1979 г. при среднем значении 9,32 мг/л (98 % насыщения).

В декабре 1981 г. концентрации кислорода колебались от 9,24 до 11,23 мг/л при среднем значении по акватории моря 9,83 мг/л (100 % насыщения), что выше, чем в ноябре—декабре 1979 и 1980 гг., что связано с более низкой температурой воды в декабре 1981 г.

Таблица 30

Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции между содержанием кислорода (С мг/л), температурой (T °С) и соленостью воды (S ‰)

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон, квадрат
$C = 16{,}29 - 6{,}63 \lg T$	−0,60	Зима, 23, 24, 25
$C = 19{,}79 - 8{,}73 \lg T$	−0,70	Весна, 23, 24, 25
$C = 11{,}72 - 0{,}16\ T$	−0,70	Лето, 23, 24, 25
$C = 11{,}57 - 0{,}17\ T$	−0,60	Осень, 23, 21, 25
$C = 86{,}60 - 86{,}00 \lg T$	−0,85	Зима, 36
$C = 145{,}47 - 151{,}47 \lg T$	−0,96	Весна, 36
$C = 87{,}03 - 73{,}52 \lg T$	−0,84	Лето, 36
$C = 186{,}34 - 139{,}90 \lg T$	−0,46	Осень, 36
$\lg C = 9{,}44 - 0{,}42\ T$	−0,20	Зима, 60
$\lg C = 67{,}16 - 7{,}98\ T$	−0,96	Весна, 60
$\lg C = 53{,}58 - 5{,}76\ T$	−0,80	Лето, 60
$C = 57{,}06 - 42{,}78 \lg T$	−0,24	Осень 60
$C = 92{,}31 - 90{,}54 \lg T$	−0,90	Зима, 21
$C = 57{,}36 - 5{,}34\ T$	−0,90	Весна, 21
$C = 45{,}73 - 2{,}67\ T$	−0,50	Лето, 21
$\lg C = 1{,}62 - 0{,}18\ S$	−0,50	Зима, 23, 24, 25
$\lg C = 12{,}42 - 0{,}46 \lg S$	−0,1	Весна, 23, 24, 25
$C = 7{,}40 + 0{,}03\ S$	−0,1	Лето, 23, 24, 25
$C = 131{,}04 - 28{,}35 \sqrt{S}$	−0,4	Осень, 23, 24, 25

В ноябре 1982 г. размах колебаний концентраций кислорода по акватории моря составлял 2,24 мг/л: от 8,70 до 10,95 мг/л при средней 9,43 мг/л, а в ноябре 1983 г. уменьшился до 1,4 мг/л: от 8,6 до 10,0 мг/л при средней 9,22 мг/л.

Через два года, в ноябре 1985 г., средняя концентрация кислорода составляла 9,70 мг/л (105 % насыщения), минимальная — 9,00 мг/л (102 % насыщения), а максимальная — 11,36 мг/л (122 % насыщения). Следовательно, поверхностные воды были пересыщены растворенным кислородом. Максимальное пересыщение кислородом наблюдалось в прикрымском районе моря напротив м. Сарыч.

Нами установлено, что между содержанием растворенного кислорода и температурой воды существует хорошая корреляция (табл. 30).

В весенне-летний период коэффициенты корреляции между содержанием кислорода и температурой воды выше, чем в осенне-зимний, что связано со значительным уменьшением концентраций кислорода вследствие прогрева вод и увеличением их стратификации в этот период. В осенне-зимний период динамика вертикального перемещения вод увеличивается, и содержание кислорода по глубине выравнивается. По этим же причинам более низкие

коэффициенты корреляции между содержанием кислорода и соленостью воды.

В прикрымском районе моря (квадраты 23, 24, 25) в весенний период коэффициенты корреляции значительно снизились ($r = -0,1$), а летом поменяли свой знак. Очевидно, поднимающиеся более соленые воды в этом районе моря увеличивают приток биогенных элементов, создавая кормовую базу для фитопланктона, что приводит к интенсификации процессов фотосинтеза, которые в эти сезоны года играют решающую роль в распределении и содержании кислорода. Это предположение подтверждается не только уравнением регрессии, но и и повышенным содержанием кислорода (10,07—11,36 мг/л или 109—122 % насыщения) в прикрымском районе моря в весенний и летний сезоны.

В центральной части моря (квадрат 36) уравнения регрессии между содержанием кислорода и температурой воды приобретают несколько иной вид (см. табл. 30).

Между содержанием кислорода и соленостью воды корреляции в этом квадрате не найдено. Коэффициенты корреляции были малы $r = 0,15 ... 0,17$.

Наибольшие коэффициенты корреляции были зимой и весной, что, по-видимому, связано с высокими градиентами изменения температуры в эти сезоны, а наименьшие — осенью, когда градиенты температуры невелики.

В западной части моря (квадрат 60) коэффициенты корреляции между концентрацией кислорода и соленостью изменялись в зависимости от сезона года от —0,12 зимой до +0,48 весной.

На границе западной и северо-западной частей моря (квадрат 21) корреляции между этими параметрами воды не обнаружено ($r = 0,14 ... 0,25$). В то же время при корреляровании содержания кислорода с температурой воды коэффициенты корреляции достаточно велики.

Осенью ввиду малого количества измерений в квадрате 21 корреляция не рассчитывалась.

Таким образом, для поверхностного горизонта можно сделать следующие выводы.

Структура поля концентраций кислорода в период 1963—1986 гг. несколько изменилась по сравнению с периодом 1948—1962 гг. Зоны пониженных его концентраций стали располагаться севернее и ближе к Крымскому полуострову.

В период 1963—1986 гг. выявлен более высокий размах колебаний как средних, так и экстремальных концентраций кислорода, что соответствует выводам об увеличении динамики вод в этот период [6]. Поле концентраций кислорода изменяется от сезона к сезону. Наблюдается увеличение концентраций кислорода в осенне-зимний период и уменьшение в весенне-летний; наибольшее насыщение кислородом — летом, наименьшее — зимой.

Межгодовая изменчивость абсолютного и относительного содержания кислорода отличалась немонотонностью.

Карты-схемы полей кислорода хорошо согласуются со схемой течений в Черном море.

Между содержанием кислорода и температурой воды существует значимая корреляция. Коэффициенты корреляции колебались в зависимости от сезона года и районов моря в широких пределах. Наименьшее его значение ($r = -0,2$) было зимой в западной части моря (квадрат 60), а наибольшее ($r = -0,96$) — весной в центральной части моря (квадрат 36).

Горизонт 10 м. В период 1963—1986 гг. плотность числа наблюдений по акватории моря (см. табл. 1—4) была весьма различна, и в разные сезоны года от квадрата к квадрату менялась в следующих пределах: зимой 1—92, весной 1—57, летом 1—81, осенью 1—52 с максимумом числа измерений в квадратах 73, 26, 41, 23 соответственно.

В зимний сезон распределение концентраций кислорода на этом горизонте было более равномерным и монотонным по акватории моря, чем на поверхности: его содержание колебалось в пределах от 11,39 (106 % насыщения в квадрате 19) до 10,04 мг/л (96 % насыщения в квадрате 28).

В западной части моря средние концентрации кислорода (11,39—10,10 мг/л, или 106—100 % насыщения) несколько выше, чем в восточной (10,89—10,04 мг/л, или 105—96 % насыщения).

Максимально-разовые концентрации кислорода колебались в пределах от 12,78 мг/л (125 % насыщения в квадрате 19) до 10,62 мг/л (102 % насыщения в квадрате 70), а минимально-разовые — от 6,49 (70 % насыщения в квадрате 53) до 10,86 мг/л (103 % насыщения в квадрате 31).

Наибольший размах колебаний содержания растворенного кислорода (5,12 мг/л) и наибольшее среднее квадратическое отклонение (1,26 мг/л) наблюдались в центре восточного циклонического круговорота (квадрат 53), что может свидетельствовать о наибольшей здесь динамике вод в зимний период года. Наименьший размах колебаний концентраций кислорода (0,28 мг/л) и наименьшее среднее квадратическое отклонение (0,13 мг/л) наблюдалось в квадрате 83.

Следует заметить, что число наблюдений в квадратах в первом случае составляло 21, а во втором лишь 3. Однако в квадрате 74 число наблюдений также, как и в квадрате 53, равнялось 21, а среднее квадратическое отклонение было лишь 0,66 мг/л и размах колебаний концентраций кислорода 2,47 мг/л.

Относительно повышенные средние квадратические отклонения содержания кислорода (0,78—0,80 мг/л) свойственны прибосфорскому (квадрат 73) и прикрымскому (квадрат 23) районам моря, что также может свидетельствовать о повышенной здесь динамике вод в зимнее время года. Характерно, что в указанных выше районах моря наблюдались повышенные значения максимально-разовых концентраций растворенного кислорода (12,73—12,08 мг/л).

Весной средние значения концентраций растворенного кислорода падают вследствие прогрева вод. Относительное же его содержание увеличивается вследствие усиления процессов фотосинтеза. Поле кислорода здесь более равномерное, чем на вышележащем поверхностном горизонте. Средние концентрации кислорода колебались от квадрата к квадрату в следующих пределах: от 10,65 (109 % насыщения) в квадрате 63 до 9,47 мг/л (100 % насыщения) в квадрате 91. Вдоль западного и Анатолийского побережий (квадраты 19, 31, 43, 44, 58, 73, 62, 63) в струе основного черноморского течения средние концентрации растворенного кислорода на 0,1—0,4 мг/л выше, чем на остальной акватории моря.

Максимально-разовые концентрации кислорода от квадрата к квадрату весной колеблются в более широких пределах, чем зимой, что, по-видимому, связано с разной скоростью протекания процессов фотосинтеза весной в различных районах моря. Так, в квадрате 29 максимальное содержание кислорода весной 14,15 мг/л (148 % насыщения), а в квадрате 38 лишь 10,69 мг/л (110 % насыщения).

Минимально-разовые концентрации кислорода в подавляющем большинстве квадратов близки между собой — 7,72—8,57 мг/л (98—101 % насыщения), что может свидетельствовать о существовании некоторой равномерности распределения минимальных концентраций кислорода на горизонте.

Средние квадратические отклонения концентраций кислорода весной 1963—1986 гг. колебались в различных квадратах в довольно широких пределах: от 1,70 (квадрат 31) до 0,16 мг/л (квадрат 71). Характерно, что квадратам с наибольшими средними квадратическими отклонениями содержания кислорода (1,70—1,17 мг/л) свойственны наибольшие максимально-разовые концентрации (14,15—11,75 мг/л) — квадраты 19, 29, 31, 32, 37, 43, 44, 59, 62, 63.

Летом как средние, так и экстремальные концентрации растворенного кислорода ниже, чем в весенне-зимний период. Среднее содержание кислорода в различных квадратах было близко между собой: 7,74—8,72 мг/л (101—109 % насыщения). Причем лишь в отдельных квадратах (19, 20, 40, 41, 76) его среднее содержание превышало 8,6 мг/л; в других же квадратах оно было близко к среднему на горизонте по всей акватории моря — 8,14 мг/л (105 % насыщения). Максимально-разовые концентрации растворенного кислорода от квадрата к квадрату колебались в широких пределах от 8,02 до 12,58 (104—152 % насыщения), а минимально-разовые — от 4,50 до 7,94 мг/л (59—96 % насыщения). Наиболее высокие значения максимально-разовых концентраций кислорода (>11 мг/л) и размах колебаний концентраций кислорода (около 5,7 мг/л) в период 1963—1986 гг. наблюдались в центрах восточного (квадраты 53, 67) и центрального (квадрат 36) циклонических круговоротов, а также у берегов Кавказа (квадраты 27, 41, 86). Наиболее низкие значения минимально-разовых концентраций кислорода (4,50—4,77 мг/л) наблюдались в прикрымском районе моря (квадраты 24, 25) и в районе напротив Новороссийска (квадрат 27). Этим же квадратам (24, 25, 27) свойственны наибольшие значения средних квадратических отклонений содержания растворенного кислорода (1,27—1,54 мг/л), а наименьшие значения (0,28 мг/л) были в западной части моря (квадрат 47).

Повышенные значения средних квадратических отклонений содержания кислорода в указанных выше районах (прикрымский, центры циклонических круговоротов, у берегов Кавказа) можно объяснить, по-видимому, повышенной динамикой вод в них.

Осенью средние концентрации кислорода увеличиваются по сравнению с летним периодом года ввиду начавшегося охлаждения вод в различных квадратах до значений 8,57—9,46 мг/л. Максимум среднего содержания кислорода был в прибрежном районе западной части моря напротив Констанцы (квадрат 19), а минимум — в центре моря (квадрат 50). Максимально-разовые концентрации кислорода колебались от 12,42 мг/л (квадрат 41) до 8,92 мг/л (квадрат 50). Высокие максимально-разовые концентрации кислорода (12,18—12,33) отмечались, как и летом, в центре восточного циклонического круговорота (квадраты 53, 67). Минимально-разовые концентрации кислорода колебались от квадрата к квадрату в пределах от 6,83 (квадрат 34) до 9,03 мг/л (квадрат 64).

Наибольшие средние квадратические отклонения содержания кислорода (1,4 мг/л) были в центре восточного циклонического круговорота (квадрат 67) и в прибрежном районе моря напротив Констанцы (квадрат 19), воды которого находятся под влиянием стока р. Дуная.

Рассмотрим наиболее характерные результаты экспедиционных исследований: в феврале 1978 г., апреле 1985 г., августе — сентябре 1976 г. и ноябре — декабре 1985 г. (рис. 36). Карта распределения кислорода в апреле 1985 г. (рис. 36) подготовлена с применением метода Монте-Карло.

В феврале 1978 г. зона максимальных концентраций кислорода (>11,0 мг/л) располагалась (не считая северо-западного района) в западной части моря. В направлении востока и юго-востока содержание растворенного кислорода падало практически монотонно, достигая своего минимума (950 мг/л, 0,92 % насыщения) напротив Новороссийска. Однако на юге моря вдоль Анатолийского побережья от о. Кефкен до Синопа располагалась вторая зона повышенного содержания кислорода (>11,0 мг/л) с максимумом 12,06 мг/л (108 % насыщения) напротив Амасры, при среднем по всему морю 10,83 мг/л (102 % насыщения).

В апреле 1985 г. среднее содержание растворенного кислорода на горизонте 10 м было значительно выше (11,55 мг/л, 108 % насыщения), чем в феврале 1978 г. Значительное пересыщение вод кислородом в весенний период происходит вследствие активного протекания процессов фотосинтеза. В апреле 1985 г. зона с содержанием кислорода более 11,0 мг/л охватывает почти всю западную часть моря за исключением небольшого района у Босфора, где концентрации кислорода были меньше 11,0 мг/л. У Анатолийского побережья от м. Инеболу до Чивы и Кавказского побережья от Сочи до Сухуми, а также в центре восточного циклонического круговорота располагались зоны повышенного содержания кислорода (>11,0 мг/л, 107—113 % насыщения). Минимум содержания кислорода (10,26 мг/л или 96 % насыщения) был обнаружен в прикрымском районе моря напротив Ялты.

Летом 1976 г. абсолютное содержание растворенного кислорода было значительно ниже, чем в весенне-зимний период, и было почти на всей акватории моря близко к его среднему значению 8,14 мг/л (106 % насыщения) за период 1963—1986 гг. Лишь в восточной части моря и прикрымском районе можно выделить в общей сложности четыре относительно небольшие по площади зоны повышенного содержания кислорода (>9,0 мг/л, 115—120 % насыщения). В двух из этих зон (прикрымской и в восточной части моря) концентрации кислорода достигали 11,23—11,30 мг/л соответственно.

Распределение кислорода, характерное для осеннего периода, в октябре — ноябре 1985 г. было

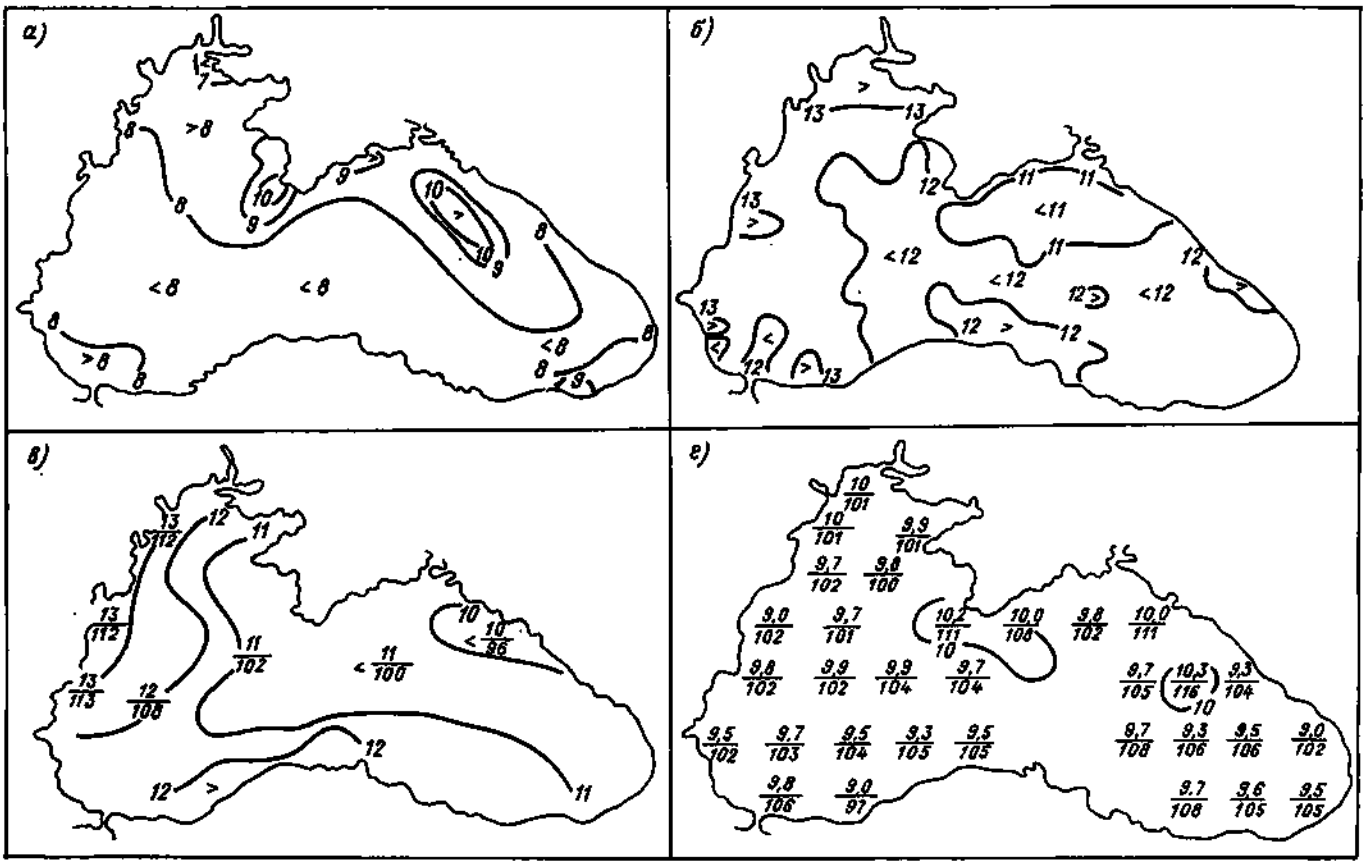

Рис. 36. Поля концентраций кислорода на горизонте 10 м.
а — август — сентябрь 1976 г., *б* — апрель 1985 г., *в* — февраль 1978 г., *г* — декабрь 1985 г.
Числитель — мг/л, знаменатель — % насыщения.

более равномерным, чем в феврале 1985 г. Размах колебаний концентраций кислорода по акватории моря в октябре — ноябре 1985 г. был невелик — 150 мг/л (110—116 % насыщения) наблюдалось в центрах западного и центрального циклонических круговоротов, а минимальное 8,86 мг/л (97 % насыщения) — у Анатолийского ное 8,86 мг/л (97 % насыщения) — у Анатолийского побережья напротив о. Кефкен. Хотя среднее абсолютное содержание кислорода (10,0 мг/л) в западной части моря было выше, чем в восточной (9,64 мг/л), относительное его содержание в восточной (108 % насыщения) больше, чем в западной (101 % насыщения). Характерно также, что более высокой солености в восточной части моря (17,86—17,96 ‰) по сравнению с западной (16,16—16,85 ‰) соответствовало более высокое относительное содержание кислорода (106—116 % насыщения) против 97—110 % насыщения в западной.

Среднее годовое содержание кислорода колебалось от 9,09 до 9,82 мг/л (98—109 % насыщения) с максимумом в 1983 г. (табл. 31). В период с 1963 по 1986 г. на горизонте 10 м наблюдался положительный тренд содержания кислорода, равный 0,21 мг/(л·год) (0,17 % насыщения в год). Минимально-разовые концентрации колебались от 4,50 до 7,72 мг/л (59—98 % насыщения), а максимально-разовые — от 14,14 до 11,10 мг/л (141—113 % насыщения). Если сравнить данные табл. 31 с данными Шульгиной [181], то окажется, что среднее содержание кислорода в 1948—1963 гг. было на 2,0 % ниже, чем в период 1963—1986 гг.

Между содержанием кислорода, соленостью и температурой воды на горизонте 10 м существует хорошая корреляция (табл. 32).

Таблица 31

Среднее годовое содержание растворенного кислорода на горизонте 10 м

Год	Среднее	Минимальное	Максимальное
1933	9,13/100	6,19/64	14,15/148
1964	9,09/98	5,39/60	12,19/139
1965	9,22/99	6,73/80	11,98/124
1966	9,26/101	5,84/74	13,03/132
1967	9,14/100	5,97/72	12,48/135
1968	9,17/100	6,69 75	12,45/127
1969	9,14/100	6,92/90	13,25/135
1970	9,20/101	6,23/65	12,35/125
1971	9,29/102	7,19/94	11,45/122
1972	9,24/101	5,32/60	11,65/123
1973	9,20/100	7,13/91	11,10/113
1974	9,53/102	6,41/65	12,73/130
1975	9,27/101	6,39/64	11,49/119
1976	9,29/102	6,56/67	11,75/128
1977	9,43/103	6,40/65	11,72/127
1978	9,46/104	6,60/68	12,77/131
1979	9,47/103	7,14/94	11,30/131
1980	9,46/103	7,16/95	12,83/136
1981	9,56/103	7,03/92	12,65/132
1982	9,72/105	7,69/96	12,20/130
1983	9,82/109	7,72/98	12,07/129
1984	9,36/102	7,57/96	11,98/127
1985	9,69/103	4,50/59	13,14/140
1986	9,44/102	7,47/96	12,22/130

Примечание. Числитель — концентрация кислорода, мг/л; знаменатель — процент насыщения

Из табл. 32 видно, что наиболее высокий коэффициент корреляции (0,81) в весенний сезон, а наиболее низкий (0,33) — в зимний сезон. С ростом температуры и солености содержание кислорода падает ввиду уменьшения его растворимости в воде.

В осенний же сезон в восточной части моря с ростом солености происходило увеличение содержания кислорода. По-видимому, поднимающиеся в результате осенней конвекции воды, богатые биогенными веществами, вызывали усиление процессов фотосинтеза в этой части моря. Действительно, пересыщение вод кислородом в осенний сезон здесь было более высоким (104—116 % насыщения), чем на остальной акватории моря.

Горизонт 20 м. Плотность числа наблюдений на горизонте 20 м от квадрата к квадрату менялась в следующих пределах: зимой 1—92 (квадрат 73), весной 1—53 (квадрат 29), летом 1—79 (квадрат 24), осенью 1—65 (квадрат 23).

Таблица 32

Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции между содержанием кислорода (C мг/л), соленостью (S ‰) и температурой воды (T °С)

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон
$C = 14{,}12 - 0{,}11S - 0{,}16T$	0,81	Весна
$C = 19{,}7 - 0{,}33S - 0{,}24T$	0,77	Лето
$C = 12{,}40 - 0{,}06S - 0{,}11T$	0,33	Зима
$C = 3{,}44 + 0{,}46S - 0{,}17T$	0,57	Осень

Зимой средние концентрации растворенного кислорода на горизонте колебались от 9,89 мг/л (квадрат 33) до 11,29 мг/л (квадрат 31), что на 0,10—0,13 мг/л меньше, чем на горизонте 10 м. В западной части моря среднее содержание кислорода (10,56—11,26 мг/л) было выше (вследствие более низкой температуры воды), чем в восточной (10,0—10,89 мг/л). В центральной части моря средние концентрации кислорода в различных квадратах колебались в более узких пределах (10,32—10,69 мг/л). Некоторое повышение среднего содержания кислорода (10,82—11,00 мг/л) наблюдалось у Анатолийского побережья (квадраты 62—64).

Максимально-разовые концентрации кислорода колебались от 10,44 мг/л (квадрат 40) до 11,93 мг/л (квадрат 19), а минимально-разовые — от 5,34 (квадрат 25) до 10,87 мг/л (квадрат 31). Наибольшее среднее квадратическое отклонение (1,33 мг/л) было в квадрате 25, а наименьшее (0,14 мг/л) в квадрате 66. Для зимнего периода характерно, что наиболее высокое среднее квадратическое отклонение (0,94—1,33 мг/л) свойственно квадратам с наиболее низким средним содержанием кислорода (9,89—10,24 мг/л) и наиболее низкими значениями минимально-разовых концентраций кислорода (5,34—7,17 мг/л).

В весенний сезон среднее содержание кислорода колебалось от квадрата к квадрату в более узких пределах, чем зимой: от 10,12 до 10,89 мг/л. Размах средних концентраций кислорода составлял весной 0,77 мг/л против 1,40 мг/л зимой. Наиболее высокое среднее содержание кислорода ($\geqslant$10,57 мг/л) наблюдалось у Анатолийского побережья (квадраты 61—63) и центрах западного (квадрат 46) и восточного (квадрат 68) циклонических круговоротов; наиболее низкие ($\leqslant$10,14 мг/л) — на границе с северо-западной частью (квадраты 19—21) и в прикрымском районе моря (квадраты 23 и 24).

Максимально-разовые значения концентраций кислорода в квадратах колебались в довольно широких пределах: от 10,62 (101 % насыщения в квадрате 71) до 14,08 мг/л (146 % насыщения в квадрате 19); минимально-разовые — от 6,76 (65 % насыщения в квадрате 25) до 10,59 мг/л (101 % насыщения в квадрате 61).

Средние квадратические отклонения содержания кислорода от его средних значений на горизонте 20 м выше, чем на вышележащем горизонте. Среднее квадратическое отклонение весной колебалось от квадрата к квадрату в пределах от 2,03 (квадрат 19) до 0,21 мг/л (квадрат 71). Характерно, что в квадратах с наибольшими средними квадратическими отклонениями (2,03—1,17 мг/л) были наибольшие значения максимально-разовых концентраций кислорода (14,08—12,79 мг/л).

В летний сезон средние абсолютные значения концентраций кислорода в большинстве квадратов были ниже, чем в весенне-летний период и колебались от 7,69 до 10,76 мг/л с максимумом в центре восточного циклонического круговорота (квадрат 53), и минимумом у побережья Кавказа (квадрат 42).

Максимально-разовые концентрации кислорода летом колебались еще в больших пределах, чем весной: от 15,10 (158 % насыщения в квадрате 41) до 8,47 мг/л (98 % насыщения в квадрате 19). Минимально-разовые концентрации кислорода колебались от 2,96 (29 % насыщения) в квадрате 41 до 10,29 (94 % насыщения) в квадрате 38.

Средние квадратические отклонения концентраций кислорода летом были больше, чем в весенне-зимний период и колебались от 2,03 в квадрате 41 до 0,41 мг/л в квадрате 19. Для летнего сезона характерно, что повышенные средние квадратические отклонения содержания кислорода ($>$1,4 мг/л) свойственны квадратам, в которых есть как повышенные значения максимально-разовых ($\geqslant$11,98 мг/л), так и пониженные значения минимально-разовых ($\leqslant$7,37 мг/л) концентраций.

Осенью 1963—1986 гг. среднее содержание кислорода колебалось от 10,76 (111 % насыщения) в квадрате 50 до 8,29 мг/л (99 % насыщения) в квадрате 75. В остальных квадратах (за исключением 38 и 86) среднее содержание кислорода было близко к его среднему значению по всей акватории моря на горизонте 20 м (9,29 мг/л или 103 % насыщения). Следовательно, можно сделать вывод, что осенью 1963—1986 гг. характер распределения в осредненном поле концентраций кислорода на горизонте 20 м отличался по сравнению с другими сезонами большей равномерностью и монотонностью.

Колебания максимально-разовых концентраций кислорода осенью были почти в таких же пределах, как и летом: от 15,13 (158 % насыщения) в квадрате 67 до 8,53 мг/л (100 % насыщения) в квадрате 75. Минимально-разовые концентрации кислорода колебались от 5,79 (68 % насыщения) в квадрате 31 до 10,09 мг/л (101 % насыщения) в квадрате 50.

Наибольшее среднее квадратическое отклонение содержания кислорода (1,97 мг/л) было в центре восточного циклонического круговорота (квадрат 67), наименьшее 0,28 мг/л в квадратах 35, 45, 82.

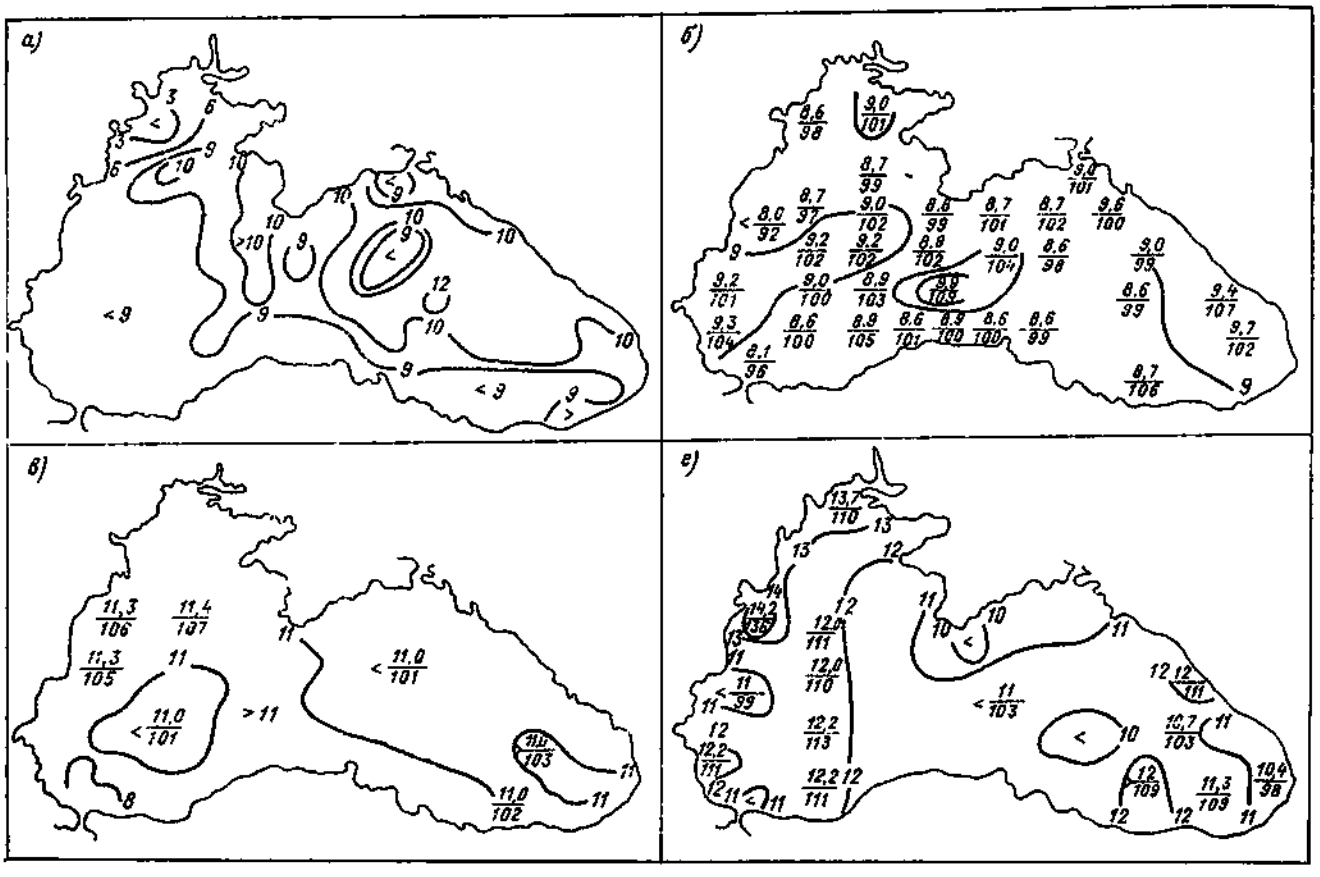

Рис. 37. Поля концентраций кислорода на горизонте 20 м.
а — август 1976 г., *б* — ноябрь 1977 г., *в* — февраль 1977 г., *г* — апрель 1985 г.
Числитель — мг/л, знаменатель — % насыщения.

При рассмотрении результатов исследований наиболее характерных экспедиций (рис. 37) получены следующие выводы.

В феврале 1977 г. распределение растворенного кислорода было неравномерным и немонотонным на горизонте 20 м. Зоны повышенного его содержания (>11,0 мг/л) располагались в западной и восточной частях моря. В прибосфорском районе моря повышенные содержания кислорода достигали значения 12,05 мг/л (113 % насыщения). Минимальная концентрация 10,14 мг/л (98 % насыщения) была обнаружена в прикрымском районе моря.

Обширные зоны пониженного содержания кислорода (<11,0 мг/л) располагались в центре западной части моря и почти по всей акватории восточной части. В восточной части моря лишь вдоль Анатолийского побережья и в районе напротив Батуми содержание кислорода превышало 11,0 мг/л (100 % насыщения).

В апреле 1985 г. среднее содержание кислорода (11,50 мг/л, 109 % насыщения) на горизонте 20 м по всей акватории моря было одним из наиболее высоких за весь рассматриваемый период времени. Так, в западной части моря среднее содержание кислорода (11,90 мг/л, 111 % насыщения) было выше, чем в восточной (11,22 мг/л, 102 % насыщения). Пониженное содержание и недосыщение вод кислородом, по-видимому, связано с подъемом вод. Так, в центре восточного циклонического круговорота была пониженная температура 6,62 °С и повышенная соленость воды — 18,39 ‰.

В августе—сентябре 1976 г. его распределение было неравномерным и немонотонным. Хотя с запада на восток и наблюдался положительный тренд увеличения абсолютного и относительного содержания кислорода, в отдельных районах моря располагались зоны как его пониженного (<2,8 мг/л, <30 % насыщения), так и повышенного (>11,0 мг/л, >130 % насыщения) содержания.

В западной части моря среднее содержание кислорода равнялось 7,90 мг/л (100,5 % насыщения). Это ниже, чем в центральной — 9,43 мг/л (113 %) и восточной — 10,56 мг/л (117 % насыщения).

В центральной части моря наблюдались зоны повышенного (>10,0 мг/л) и пониженного (<9,0 мг/л) содержания кислорода.

Наибольшая концентрация кислорода (11,98 мг/л или 137 % насыщения) существовала в центре восточного циклонического круговорота, что свидетельствует о высокой интенсивности протекания здесь процессов фотосинтеза. По-видимому, поднимающиеся водные массы в центрах циклонических круговоротов обеспечивают приток биогенных элементов, создавая кормовую базу для фитопланктона.

В октябре—ноябре 1977 г. поле концентраций кислорода было более равномерным, чем в другие сезоны года: размах колебания концентраций кислорода по акватории моря составил — от 8,07 мг/л (92 % насыщения) в западной части моря напротив Мангалия до 9,92 мг/л (110 % насыщения) в центральной части моря, при средней по всей акватории моря — 8,93 мг/л (100 % насыщения). Лишь в западной части моря можно было выделить две зоны пониженного содержания кислорода (<9,0 мг/л): в прибосфорском районе и в районе м. Калиакра и Мангалия. На остальной акватории

моря концентрации кислорода были близки к их средним значениям: 8,79 мг/л (99 % насыщения) — в западной; 9,03 мг/л (103 % насыщения) — в центральной и 9,0 мг/л (101 % насыщения) — в восточной частях моря.

В октябре—ноябре 1984 г. среднее содержание кислорода (9,93 мг/л, 105 % насыщения) было выше, чем в октябре—ноябре 1977 г., но характер распределения качественно сохранился. Так, в западной части моря среднее содержание кислорода (9,64 мг/л, 102,5 % насыщения) было ниже, чем в

Таблица 33

Содержание кислорода на горизонте 20 м в период 1963—1986 гг.

Год	Среднее	Минимальное	Максимальное
1963	9,74/104	6,40/66	15,10/158
1964	9,44/102	6,69/71	14,59/157
1965	9,57/103	7,19/80	13,85/145
1966	9,64/103	7,12/80	15,13/158
1967	9,53/102	6,74/77	12,67/135
1968	9,73/105	7,97/84	13,03/137
1969	9,84/106	7,09/87	13,37/140
1970	9,77/105	6,57/73	12,50/130
1971	9,52/103	6,69/74	14,18/147
1972	9,47/102	4,27/45	12,05/125
1973	9,74/104	7,20/80	11,55/121
1974	9,59/103	7,13/80	11,82/124
1975	9,72/104	8,09/93	12,06/126
1976	9,79/105	2,60/27	12,12/127
1977	10,00/106	2,96/33	12,05/126
1978	9,60/106	2,22/25	12,40/130
1979	9,57/104	3,86/41	11,60/121
1980	10,12/107	5,59/58	12,42/130
1981	9,73/105	4,43/46	12,30/130
1982	10,00/107	7,17/89	11,72/124
1983	10,37/110	7,73/87	12,00/127
1984	9,86/105	7,23/82	12,65/131
1985	10,37/110	7,37/84	14,08/136
1986	9,97/106	7,52/85	13,16/134

Примечание. Числитель — содержание кислорода, мг/л; знаменатель — процент насыщения.

центральной (10,28 мг/л, 110,5 % насыщения) и восточной (9,92 мг/л, 106 % насыщения). Максимальная концентрация кислорода (10,43 мг/л, 116 % насыщения), как и в 1977 г., наблюдалась в центре моря, а минимальная (9,29 мг/л, 102 % насыщения) — в западной части моря напротив м. Калиакра.

Среднее годовое содержание кислорода на горизонте 20 м (табл. 33) колебалось от 9,44 (1964) до 10,37 мг/л (1983). Значимый положительный тренд средних концентраций кислорода в рассматриваемый период времени 0,026 мг/л (0,18 % насыщения) в год, что на 0,004 мг/(л·год) выше, чем на горизонте 10 м.

Минимально-разовые концентрации кислорода колебались от 2,21 (25 % насыщения) до 8,09 мг/л (93 % насыщения); а максимально-разовые — от 11,55 (121 % насыщения) до 15,13 мг/л (158 % насыщения).

Как правило, наиболее низкое содержание кислорода приходится на летний сезон в слое скачка или под ним. Так, 30 июля 1987 г. на ст. 2 (глубина 43 м), расположенной у западного побережья моря напротив Констанцы, содержание кислорода 8,00 мг/л (102 % насыщения) при температуре 23,60 °С, солености 16,33 ‰, условной плотности 9,75 усл. ед. на горизонте 15 м и 6,39 мг/л (67 % насыщения) при температуре 12,81 °С, солености 16,48 ‰, плотности воды 12,19 усл. ед. на горизонте 20 м. На ст. 24 (глубина 2200 м), расположенной в центральной части моря напротив м. Керемпе 2 августа 1987 г. содержание кислорода было 9,00 мг/л (116 % насыщения) при температуре 22,44 °С, солености 17,76 ‰, плотности воды 11,12 усл. ед. на горизонте 10 м и 7,72 мг/л (68 % насыщения) при температуре 10,46 °С, солености 17,96 ‰, плотности воды 13,69 усл. ед. на горизонте 20 м.

В восточной части моря максимум содержания кислорода (11,23 мг/л, 123 % насыщения) в августе 1987 г. приходился на слой скачка (температура 9,19 °С, соленость 17,91 ‰, плотность 13,81 усл. ед.).

Тот факт, что слой скачка температуры, расположенный в летний сезон на глубинах 15—20 м, значительно влияет на структуру поля кислорода, затрудняет установление корреляционных связей между содержанием кислорода, температурой, соленостью и плотностью воды на горизонте 20 м в летний сезон. В осенне-зимний сезон в результате усилившейся конвекции вод происходит выравнивание по глубине до 20—30 м как температуры воды, так и содержания кислорода, что также затрудняет установление корреляционных связей между содержанием кислорода и физическими характеристиками воды.

В весенний сезон выявлена следующая корреляционная зависимость: с увеличением солености и температуры воды происходит уменьшение абсолютного содержания растворенного кислорода.

Характерное уравнение регрессии для глубоководной части моря

$$C = 15{,}55 - 0{,}10S - 0{,}18T \quad (r = 0{,}82),$$

где C — концентрация кислорода, мг/л; S — соленость, ‰; T — температура, °С.

Горизонт 30 м. В период 1963—1986 гг. плотность числа наблюдений по акватории моря в разные сезоны года менялась в следующих пределах: зимой 1—88 (квадрат 73), весной 1—38 (квадрат 23), летом 1—76 (квадрат 73), осенью 1—74 (квадрат 74).

Среднее содержание кислорода в зимний сезон колебалось от квадрата к квадрату от 10,96 (квадрат 63) до 9,86 мг/л (квадрат 25).

В западной части моря уровень средних концентраций кислорода (10,86—10,00 мг/л) выше, чем в восточной (10,72—9,86 мг/л). Некоторое повышение среднего содержания кислорода (10,96—10,57 мг/л) наблюдалось у Анатолийского побережья (квадраты 62—64).

Максимально-разовые концентрации кислорода колебались от 12,00 (квадрат 19), до 10,22 мг/л (квадрат 86), а минимально-разовые от 5,34 (квадрат 25) до 10,56 мг/л (квадрат 17).

Наибольшее среднее квадратическое отклонение концентраций кислорода (1,56 мг/л) было в прикрымском районе моря, а наименьшее (0,11 мг/л) в восточной части моря (квадрат 69).

Для зимнего периода характерно (как и на горизонте 20 м), что наиболее высокие значения средних квадратических отклонений кислорода (1,56—1,14 мг/л) свойственны квадратам с наиболее низкими значениями среднего содержания кислорода (9,86—10,00 мг/л) и наиболее низкими значениями

минимально-разовых его концентраций (5,34—7,49 мг/л).

В весенний сезон среднее содержание кислорода колебалось от квадрата к квадрату от 10,80 мг/л (квадрат 60) до 9,83 мг/л (квадрат 66), а сами средние концентрации были на 0,1—0,3 мг/л ниже, чем на горизонте 20 м.

Размах колебаний максимально-разовых концентраций кислорода на горизонте 30 м (11,85—10,56 мг/л, 115—100 % насыщения) был на 2,17 мг/л меньше, чем на горизонте 20 м. Относительное содержание кислорода на горизонте 30 м на 5—15 % насыщения меньше, чем на горизонте 20 м. Минимально-разовые концентрации кислорода колебались по акватории моря от 5,64 мг/л (58 % насыщения в квадрате 59) до 10,63 мг/л (100 % насыщения в квадрате 60).

Средние квадратические отклонения содержания кислорода колебались от квадрата к квадрату от 2,17 (квадрат 59) до 0,26 мг/л (квадрат 71).

Наибольшие средние квадратические отклонения содержания кислорода (2,1—1,7 мг/л) присущи квадратам с наименьшими минимально-разовыми концентрациями кислорода (5,64—6,32 мг/л).

Летом среднее содержание кислорода на горизонте 30 м колебалось от 11,0 (квадрат 49) до 8,72 мг/л (квадрат 58), что на 0,24—1,03 мг/л больше, чем на горизонте 20 м. Этот факт свидетельствует о том, что глубина заложения максимального содержания кислорода, а следовательно, и зона интенсивного фотосинтеза смещалась в летний период ближе к горизонту 30 м. Зона повышенных концентраций кислорода (>10,7 мг/л) располагалась в центральной части моря (квадраты 48, 49), а пониженных (<9,0 мг/л) — в западной (квадраты 57, 58) и на границе между западной и северо-западной частями моря (квадраты 19, 20). Максимально-разовые концентрации кислорода колебались в довольно широких пределах: 13,09 мг/л (квадрат 49) — 8,44 мг/л (квадрат 94), а минимально-разовые — 4,77 (квадрат 28) — 10,23 мг/л (квадрат 49).

Средние квадратические отклонения содержания кислорода колебались от 1,60 (квадрат 59) до 0,07 мг/л (квадрат 40). Как правило, повышенные значения средних квадратических отклонений кислорода (1,00—1,60 мг/л) свойственны квадратам с пониженными значениями его средних концентраций (8,72—10,00 мг/л).

Осенью среднее содержание кислорода колебалось от 10,60 мг/л (квадрат 50) до 8,66 мг/л (квадрат 21) при среднем содержании 9,43 мг/л (105 % насыщения), что на 0,1 мг/л больше, чем на горизонте 20 м. Относительное же содержание кислорода в среднем по акватории моря было выше на 2 %.

Зоны повышенных (>10,0 мг/л) концентраций кислорода наблюдались в центральной (квадраты 49 и 50) и восточной (квадрат 66) частях моря, а пониженных (<9,0 мг/л) — на границе с северо-западной (квадраты 19—21), в западной (квадраты 61, 71, 75) и в восточной (квадраты 80, 85, 91).

Максимально-разовые концентрации кислорода находились в пределах от 14,70 мг/л (156 % насыщения) в квадрате 41 до 9,22 мг/л (98 % насыщения) в квадрате 61. Высокое разовое пересыщение вод кислородом >140 % насыщения наблюдалось в центре восточного циклонического круговорота (квадрат 53). Минимально-разовые концентрации кислорода колебались от 2,99 мг/л (31 % насыщения) в квадрате 31 до 10,24 мг/л (104 % насыщения) в квадрате 50.

Средние квадратические отклонения содержания кислорода на горизонте 30 м осенью достигали наибольших значений и колебались по акватории моря от 2,29 (квадрат 31) до 0,16 мг/л (квадраты 33, 45).

Наибольшие средние квадратические отклонения содержания кислорода (>1,4 мг/л) свойственны квадратам с наименьшими значениями минимально-разовых концентраций (>5,7 мг/л), или же с наибольшими значениями максимально-разовых его концентраций (>12,9 мг/л).

В центре восточного циклонического круговорота (квадрат 53), по-видимому, подъем вод приводит к обогащению вышележащих вод биогенными веществами и, как следствие, к интенсивному развитию процессов фотосинтеза.

В феврале 1978 г. (рис. 38) распределение концентраций кислорода на горизонте 30 м было неравномерным и немонотонным. Однако степень этой неравномерности и немонотонности была меньше, чем на вышележащих горизонтах 20 и 10 м. Так, размах колебаний концентраций кислорода на горизонте 30 м составлял 2,40 мг/л (14 % насыщения). Содержание кислорода на горизонте 30 м колебалось от 12,00 (109 % насыщения) у западного побережья напротив Константы до 9,60 мг/л (95 % насыщения) напротив Новороссийска. Зоны повышенного содержания кислорода (>11,0 мг/л, >100 % насыщения) располагались как в западной (на большей ее части), так и в центральной и восточной областях моря напротив Анатолийского побережья и у берегов Кавказа напротив Поти. Две зоны пониженного содержания кислорода (<10,0 мг/л, <95 % насыщения) располагались на севере восточной части моря: в прикрымском районе и напротив Новороссийска.

В мае 1981 г. (см. рис. 38) размах колебаний концентраций кислорода составлял 2,4 мг/л (25 % насыщения). Зоны повышенного содержания кислорода (>10,7 мг/л) наблюдались в центрах западного (11,20 мг/л, 110 % насыщения) и центрального циклонических круговоротов, а также в восточной части моря у Анатолийского побережья напротив м. Нерос. Зона пониженного содержания кислорода (<9,3 мг/л) с минимумом на горизонте 8,77 мг/л (85 % насыщения) располагалась у западного побережья моря напротив Констанцы. Характерно, что в зимний сезон в этой части моря, как правило, располагается зона повышенного содержания кислорода (>11,0 мг/л).

В августе—сентябре 1976 г. (рис. 38) степень неравномерности и немонотонности распределения содержания кислорода была высока. В этот период зоны повышенного содержания кислорода наблюдались в западной части моря в прибосфорском районе, в центрах западной и центральной областей, у Анатолийского побережья напротив Амаеры и м. Керемпе.

Зона повышенного содержания кислорода (>11,0 мг/л) в ноябре 1986 г. (см. рис. 38) обнаружена лишь в центральной части моря с максимумом 11,07 мг/л (110 % насыщения). На остальной акватории моря концентрации кислорода

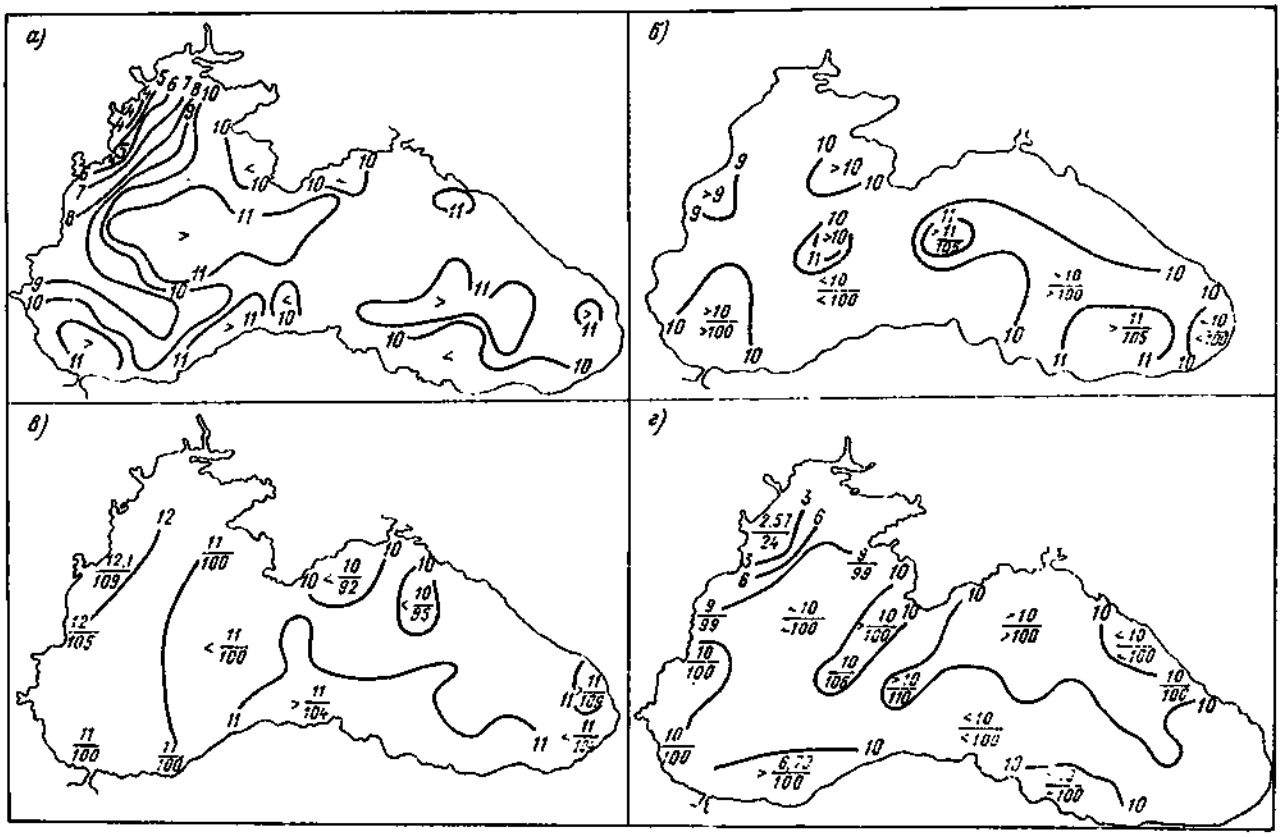

Рис. 38. Поля концентраций кислорода на горизонте 30 м.
а — август 1976 г., *б* — май 1981 г., *в* — февраль 1978 г., *г* — ноябрь 1986 г.; числитель — мг/л; знаменатель — % насыщения.

колебались от 10,52 мг/л (112 % насыщения) в центральной части моря до 9,36 мг/л (87 % насыщения) у Кавказского побережья напротив Геленжика.

Межгодовая изменчивость содержания кислорода на горизонте 30 м приведена в табл. 34. Среднее годовое содержание кислорода колебалось от 9,40 (99 % насыщения) в 1965 г. до 10,43 мг/л (104 % насыщения) в 1985 г. Значимый тренд изменения среднего годового содержания кислорода на этом горизонте не прослежен.

Таблица 34

Содержание кислорода на горизонте 30 м

Год	Среднее	Минимальное	Максимальное
1963	10,03/101	7,20/79	13,08/134
1964	9,63/100	7,14/77	12,23/123
1965	9,40/99	6,50/71	13,08/136
1966	9,70/100	6,13/68	14,70/156
1967	10,04/104	4,96/52	11,85/124
1968	9,92/101	7,12/78	11,45/116
1969	9,96/101	6,79/70	12,63/129
1970	9,46/100	4,77/51	11,53/119
1971	9,73/100	4,69/51	12,39/135
1972	9,69/100	6,46/67	12,03/131
1973	9,90/101	5,74/60	11,80/125
1974	10,03/101	4,90/52	13,09/137
1975	9,70/100	3,84/39	11,69/122
1976	10,29/103	7,26/80	12,26/135
1977	10,16/102	5,49/58	13,09/137
1978	9,72/100	2,99/31	13,10/138
1979	9,69/100	3,26/35	11,59/117
1980	10,20/103	1,41/15	11,43/116
1981	9,70/99	5,64/59	11,30/114
1982	10,02/101	7,07/78	11,52/117
1983	9,82/100	5,90/60	11,50/116
1984	9,89/101	4,33/75	11,35/114
1985	10,43/104	4,33/45	12,08/126
1986	9,92/101	2,57/24	—

Примечание. Числитель — содержание кислорода, мг/л; знаменатель — процент насыщения.

Между содержанием кислорода, соленостью и температурой воды на горизонте существует хорошая корреляция. Характерные уравнения регрессии для восточной части моря в разные сезоны приведены в табл. 35.

Таблица 35

Уравнения регрессии и коэффициенты корреляции между содержанием кислорода, соленостью и температурой воды

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон
$C = 85{,}6 - 3{,}89S - 0{,}34T$	0,83	Весна
$C = 13{,}22 - 0{,}07S - 0{,}10T$	0,46	Лето
$C = 28{,}3 - 0{,}54S - 0{,}39T$	0,43	Зима
$C = 24{,}0 - 0{,}64S - 0{,}11T$	0,56	Осень

Из табл. 35 видно, что с увеличением солености и температуры воды содержание кислорода уменьшается. Наиболее высокие коэффициенты корреляции (0,83) весной, наиболее низкие (0,30) — летом.

Закономерности распределения кислорода в слое 10—30 м. На основе представленных выше данных выявляется ряд следующих закономерностей в распределении и содержании растворенного кислорода в слое фотосинтеза.

Во-первых, в этот период (1963—1986) обнаружен значимый положительный тренд как абсолют-

ного (0,021—0,024 мг/(л·год)), так и относительного (0,17—0,19 % насыщения в год) содержания кислорода.

Во-вторых, между содержанием кислорода и физическими характеристиками (температура, соленость, плотность воды) обнаружена тесная корреляционная связь ($r = 0{,}81 \ldots 0{,}83$) в весенний сезон. Летом и зимой эта связь слабее (0,77—0,33). Осенью коэффициенты корреляции (0,56—0,57) занимали промежуточные значения.

В-третьих, обнаружен различный сезонный ход содержания кислорода в разных районах моря и на разных горизонтах. Он имеет следующие тенденции. Весной зона максимального пересыщения вод кислородом (130—142 %) наблюдается на горизонте 10 м в прибрежных районах западной части моря. Летом зона максимального пересыщения вод кислородом (140—158 %) перемещается к центрам циклонических круговоротов и к Анатолийскому побережью, а по глубине к горизонту 20 м. Осенью зона максимального пересыщения вод кислородом (120—158 %) перемещается в восточную часть моря (ее центр) в слой 20—30 м. Зимой содержание кислорода сравнительно выравнивается по глубине, но однако, зоны его пересыщения (110—125 %) обнаруживались у берегов западной части моря на горизонте 10 м.

В-четвертых, в летний сезон существует зависимость распределения и содержания растворенного кислорода от расположения слоя скачка температуры. Максимальное содержание кислорода обнаруживается на его верхней границе или в центре слоя скачка на глубинах 15—25 м, а его минимальное содержание — под слоем скачка температуры, на верхней границе сезонного пикноклина.

По данным Добржанской [70], «...летом при наличии рассеяния плотности воды по вертикали в пределах глубин, которые по степени освещенности, возможно, являются оптимальными, наряду с энергичной отдачей образовавшегося избытка кислорода в атмосферу из слоя, расположенного над скачком, происходит относительное накопление его в некоторой толще под ним». По нашим данным накопление кислорода свыше 100 % насыщения под скачком плотности не наблюдалось.

Осенью максимум кислорода по данным Добржанской [70] в 1952—1956 гг. наблюдается в слое 30—35 м, а по нашим данным 1970—1980 гг. — в слое 25—30 м. Уменьшение слоя максимального содержания кислорода в летний и осенний сезоны периода 1963—1986 гг. формируются, по нашему мнению, под влиянием процессов обострения галоклина в слое 30—125 м, опреснением слоя 0—20 м по всей акватории моря и осолонением вод на глубинах свыше 30 м в центрах циклонических круговоротов.

Следует отметить, что в период 1957—1981 гг. наблюдался положительный тренд солнечной активности при ее 10—11-летней цикличности [101].

Горизонт 50 м. Плотность числа наблюдений в одних и тех же сезонах года по акватории моря весьма различна. В период 1962—1985 гг. число наблюдений в отдельных квадратах составляло: весной 1—25, летом 1—32, осенью 1—49, зимой 1—50. Была весьма существенна изменчивость средних концентраций кислорода в каждом сезоне от квадрата к квадрату. Например, в 1939—1962 гг. она составила: весной 6,27—10,59 мг/л (56—94 % насыщения), осенью 6,66—10,37 мг/л (61—96 % насыщения), летом 6,63—10,07 мг/л (58—92 % насыщения), зимой 6,46—10,52 мг/л (58—96 % насыщения). Изменчивость средних концентраций кислорода на горизонте 50 м проявляется в большей степени, чем изменчивость таковых на поверхностном горизонте. Так, например, весной в квадрате 29 максимальная концентрация кислорода была 10,24 мг/л, а минимальная — 1,80 мг/л, летом — 8,80 и 5,90 мг/л, осенью 9,33 и 6,30 мг/л, зимой 11,7 и 1,61 мг/л соответственно. Размах колебаний концентраций кислорода на горизонте 50 м в зимний период 1939—1962 гг. в одном квадрате достигал 10,12 мг/л. Однако интервалы внутрисезонной изменчивости средних концентраций кислорода на горизонте 50 м в период 1939—1962 гг. были близки между собой. Следовательно, в этот период на горизонте 50 м существовала определенная внутригодовая устойчивость осредненного поля концентраций кислорода.

В период 1963—1985 гг. средние сезонные концентрации кислорода от квадрата к квадрату колебались в следующих пределах: весной 3,63—12,13 мг/л (36—110 % насыщения), летом 5,10—10,50 мг/л (51—102 % насыщения), осенью 4,39—10,22 мг/л (43—134 % насыщения), зимой 4,52—11,42 мг/л (51—101 % насыщения). Изменчивость как абсолютных, так и относительных содержаний кислорода была выше во второй период, чем в первый, и на горизонте 50 м.

В качестве примера на рис. 39 приведено распределение концентраций кислорода в период 1963—1985 гг.

Минимальные концентрации кислорода 0,56—0,71 мг/л весной 1963—1985 гг. приходились на центральные квадраты 37—39, а максимальные (12,50—12,92 мг/л) — на квадраты 41 и 56, расположенные вдоль Кавказского побережья. Летом 1963—1985 гг. наблюдались две зоны пониженного содержания кислорода ($<6{,}0$ мг/л): одна в северо-западной (квадраты 2, 5 и 10), другая в западной (квадрат 60). В центре восточного циклонического круговорота (квадрат 68) наблюдалась минимальная концентрация кислорода 0,60 мг/л, а максимальная (12,03 мг/л) — у Анатолийского побережья напротив м. Инеболу (квадрат 63).

Осенью средние концентрации кислорода в квадратах колебались от 4,39 (квадрат 9) до 10,22 мг/л (квадрат 17); максимальные — от 8,39 (квадрат 42) до 13,03 мг/л (квадрат 41); и минимальные — от 0,48 (квадрат 47) до 9,39 мг/л (квадрат 33). Неравномерность и немонотонность распределения кислорода в осенний период 1963—1985 гг. определялась действием циклонических круговоротов в западной, центральной и восточной частях моря. Если средняя по всей акватории моря в этот период составляла 8,53 мг/л, то в центрах циклонических круговоротов менее 7,14 мг/л.

Зимой, так же как и осенью, зона пониженного содержания (4,52—6,57 мг/л) наблюдалась в центре восточной части моря (квадраты 38—39). По направлению к берегам средние концентрации кислорода возрастают до 71,42 мг/л в западной части моря (квадраты 19 и 43) и до 10,65 мг/л — в восточной (квадраты 80 и 94).

Структура полей концентраций кислорода в период 1963—1985 гг. характеризовалась высокой степенью неравномерности и немонотонности. Зоны

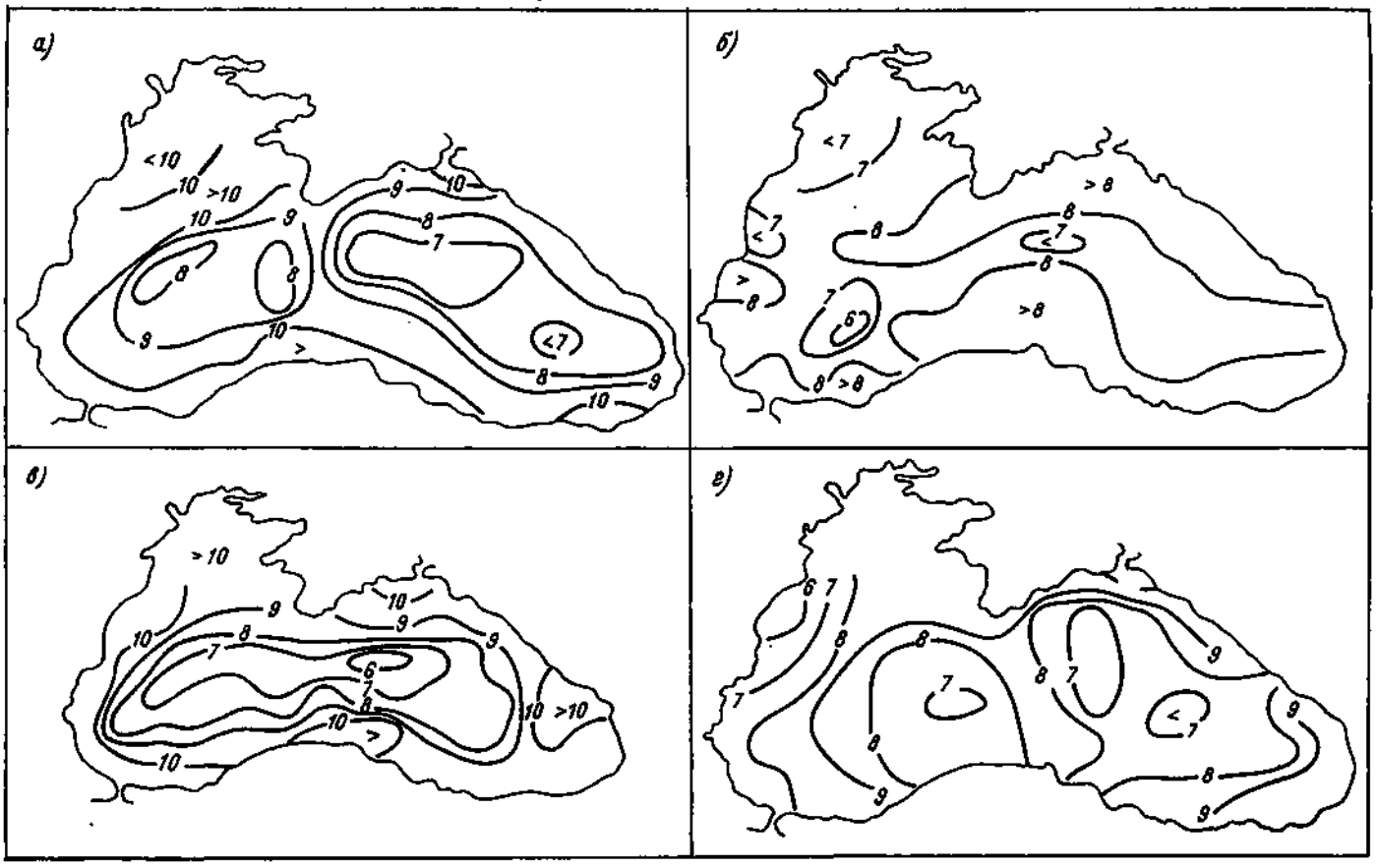

Рис. 39. Сезонные поля концентраций кислорода на горизонте 50 м в период 1963—1985 гг., мг/л.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна, *г* — осень.

пониженного содержания кислорода приходились на центры циклонических круговоротов. Пределы колебаний средних квадратических отклонений от квадрата к квадрату также свидетельствуют о значительной изменчивости полей концентраций кислорода в период 1963—1985 гг. на горизонте 50 м: 0,10—3,70 и 0,13—3,33 мг/л соответственно.

Межгодовая изменчивость содержания кислорода, рассчитанная из всего массива наблюдений в период 1960—1985 гг., представлена в табл. 36.

Колебания средних годовых концентраций кислорода (табл. 36) лежали в пределах: от 6,97 (79 % насыщения) в 1974 г. до 9,39 мг/л (92 % насыщения) в 1976 г.; минимальных — от 0,60 (6 % насыщения) в 1967 г. до 5,62 мг/л (55 % насыщения) в 1964 г.; максимальных — от 10,09 (99 % насыщения) в 1971 г. до 13,55 мг/л (139 % насыщения) в 1966 г. Наибольший размер колебаний концентраций кислорода (12,32, или 119 % насыщения) приходится на 1967 г. Второй максимальный размах его колебаний отмечен через 10 лет в 1977 г. — 10,85 (101 % насыщения) и третий — еще через 6 лет в 1985 г. — 11,79 мг/л (108 % насыщения). Эти периоды (10 и 6 лет) близки к периодам солнечной активности. Аналогичное явление отмечено в работе [81]. Максимум суммарных объемов кислорода над 1 м² в столбе воды между стандартными горизонтами 30—50 м приходится на 1967 и 1977 гг. [81]. В этой работе делается вывод, что «...суммарные объемы кислорода в глубоководной части моря меняются соответственно солнечной активности». Однако данный вывод сделан на основе сравнительно небольшого массива данных (1189 станций) и сравнительно короткого ряда наблюдений (13 лет).

Таблица 36

Содержание кислорода на горизонте 50 м

Год	Среднее	Минимальное	Максимальное
1960	8,86/81	4,63/46	10,62/100
1961	8,97/85	4,46/43	10,77/102
1962	8,57/80	4,36/42	10,55/100
1963	8,87/82	4,96/49	10,45/99
1964	8,99/84	5,62/55	10,37/99
1965	8,29/87	4,32/42	10,55/100
1966	8,97/90	4,59/45	13,55/139
1967	8,70/86	0,60/6	12,92/125
1968	9,24/90	3,53/34	11,30/103
1969	9,24/91	3,67/36	10,85/105
1970	9,16/90	4,56/43	10,10/100
1971	9,12/89	4,49/42	10,09/99
1972	9,24/90	3,07/30	10,92/106
1973	9,12/88	3,63/35	10,99/116
1974	6,97/79	0,67/6	10,86/106
1975	7,50/83	2,79/27	10,57/104
1976	9,39/92	4,19/39	11,04/105
1977	9,36/92	0,63/6	11,49/107
1978	7,77/80	1,71/17	11,67/138
1979	9,22/88	0,78/8	11,02/102
1980	8,79/87	1,21/12	11,36/103
1981	8,23/81	0,74/8	10,27/101
1982	8,89/82	1,44/15	11,83/136
1983	8,54/80	4,03/39	10,67/98
1984	8,94/84	4,09/39	10,34/102
1985	7,94/80	0,71/7	12,50/115

Примечание. Числитель — концентрация кислорода, мг/л; знаменатель — процент насыщения.

Приведенные в табл. 36 данные свидетельствуют о немонотонной изменчивости как средних годовых, так и максимальных концентраций кислорода. Неравномерность и немонотонность распределения кислорода на горизонте 50 м формируется не только под влиянием естественного его среднего изменения, но и под влиянием пространственной динамики его концентраций в различные периоды времени, а также вследствие смены сети станций в процессе исследований, различия годовых рядов наблюдений. Поэтому для более полного вычисления характера пространственно-временной динамики концентраций кислорода на горизонте 50 м рассмотрим некоторые, наиболее характерные результаты экспедиционных исследований.

Результаты основных экспедиционных исследований, выполнявшихся в 1948—1963 гг. различными организациями, представлены в работах Е. Ф. Шульгиной [181] и М. А. Добржанской [69, 72]. Особенностью поля кислорода в 1948—1963 гг. на горизонте 50 м было то, что его структура во всех сезонах года формировалась под действием циклонических круговоротов, в результате чего четко обозначались «...две изоповерхности, обусловленные существующими здесь циклоническими течениями».

Зимой большую часть моря занимала изооксигена 9,0 мг/л (80 % насыщения), ближе к берегам содержание кислорода увеличивалось. Весной и летом в центре циклонических круговоротов концентрации кислорода падали до 7,1 мг/л (70 % насыщения), а к осени опять увеличивались до 7,9—9,3 мг/л (70—80 % насыщения). Как заключает автор [181] «...осенью происходит переход от летнего к зимнему распределению кислорода по площади». В общем по всему морю на горизонте 50 м концентрации кислорода были близки между собой, диапазон их изменений был невелик.

Почти через 11 лет, в 1974 г., структура поля кислорода значительно усложнилась (рис. 40). Так, в январе—феврале 1974 г. наблюдалось пять зон пониженного содержания кислорода (три в западной и две в восточной частях моря) и две зоны высоких его содержаний. В центрах циклонических круговоротов содержание кислорода колебалось от 2,09 до 7,1 мг/л (20—70 % насыщения), а в центрах антициклонических от 10,22 до 10,85 мг/л (97—104 % насыщения). На периферии моря и в прибрежных районах содержание кислорода было близко к полному насыщению (96—103 %), а его концентрации колебались от 7,93 до 10,92 мг/л. Изолинии насыщения практически повторяют изолинии абсолютного содержания кислорода. В центрах циклонических круговоротов были повышенная температура (8,14—8,47 °С) и соленость воды (19,36—19,43 ‰), а в антициклонических — пониженные температура (6,58—6,96 °С) и соленость воды (18,13—18,17 ‰). Вдоль западного побережья температура воды была минимальной (5,43—6,56 °С), а вдоль восточного — максимальной (8,97—9,05 °С). Соленость же воды вдоль побережья колебалась в узких пределах (18,15—18,46 ‰). Столь низкие ее значения и повышенное содержание кислорода (>10,0 мг/л) на горизонте 50 м связано с опусканием вод вдоль побережья вследствие действия циклонической системы течений в море.

В апреле 1974 г. зона низких концентраций кислорода в восточной части моря сместилась ближе к Крымскому полуострову, а зона высоких его содержаний, которая была в феврале 1974 г., в апреле уже не существовала. В центре циклонического круговорота содержание кислорода упало до 0,67 мг/л (6 % насыщения), а на периферии моря

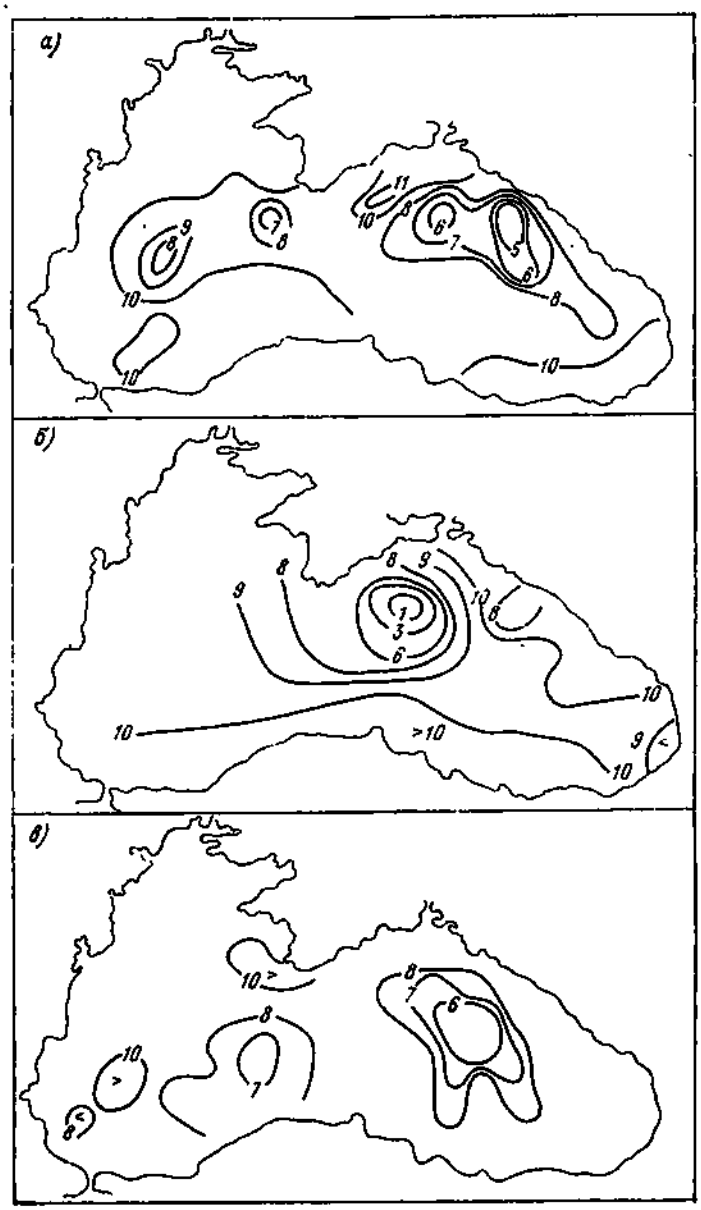

Рис. 40. Поля концентраций кислорода на горизонте 50 м в 1974 г., мг/л.
а — январь — февраль; *б* — апрель; *в* — ноябрь — декабрь.

было повышенным и колебалось в пределах 7,54—10,67 мг/л (90—104 % насыщения). В западной части моря в апреле 1974 г. вдоль Анатолийского побережья концентрации кислорода были значительно выше (10,43—10,97 мг/л или 97—103 % насыщения).

К ноябрю—декабрю 1974 г. структура поля концентраций кислорода на горизонте 50 м упростилась по сравнению с его структурой, существовавшей в феврале 1974 г., но была более неравномерной и немонотонной, чем в 1948—1963 гг. [181]. В ноябре — декабре 1974 г. наблюдались две зоны пониженного содержания кислорода (<7,0 мг/л или <60 % насыщения) и две — повышенного (≥10,0 мг/л или >100 % насыщения).

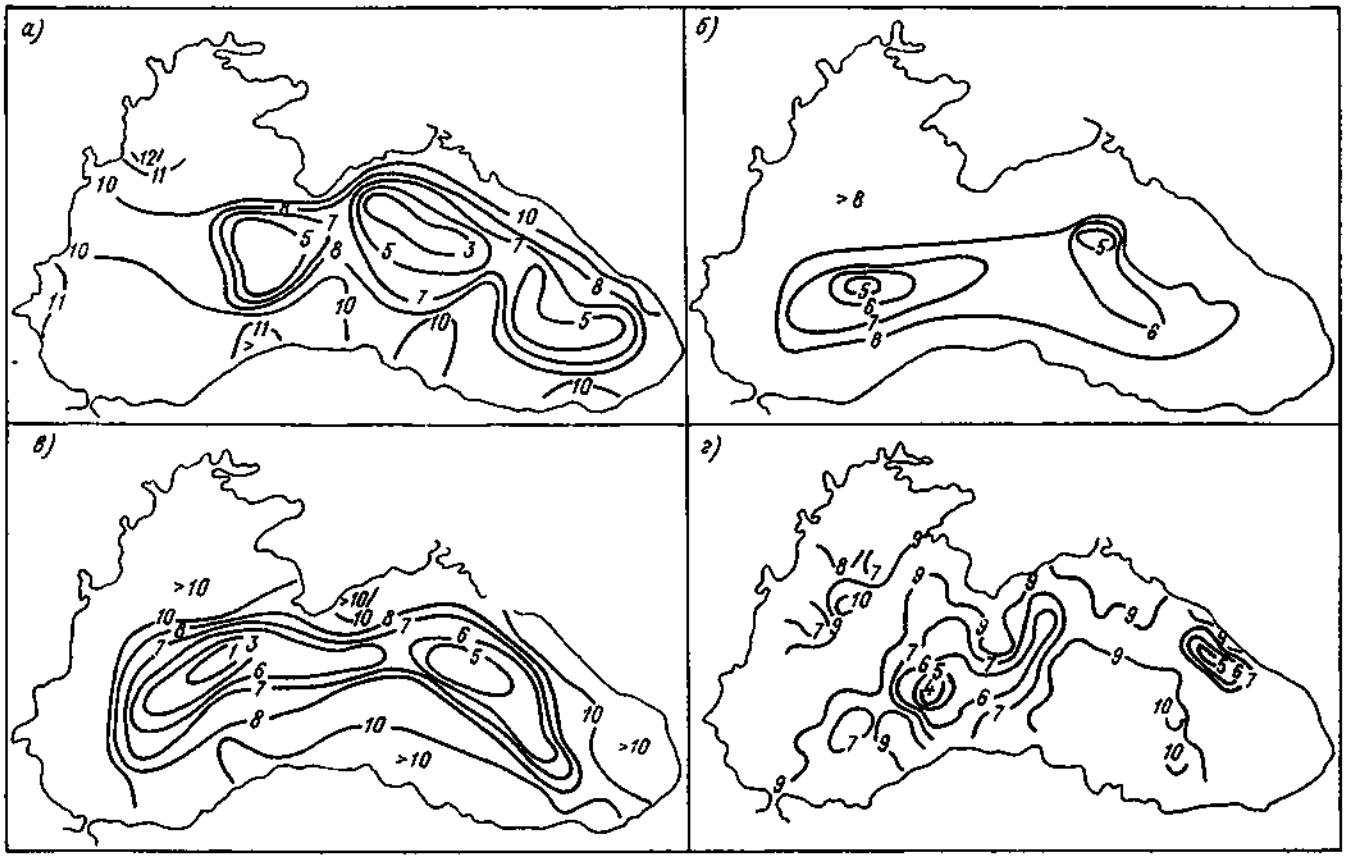

Рис. 41. Поля концентраций кислорода на горизонте 50 м в 1977 г., мг/л.
а — февраль; *б* — август; *в* — апрель; *г* — октябрь.

Изооксигены 8,6 мг/л повторяли изолинию с относительным содержанием кислорода 80 % насыщения. В центре восточного циклонического круговорота наблюдалось минимальное содержание кислорода — 4,44 мг/л (42 % насыщения), температура воды — 7,88 °С, соленость — 19,35 ‰, плотность — 15,04 усл. ед., а в центре западного — концентрация кислорода была несколько выше — 5,77 мг/л (55 % насыщения), температура 7,87 °С, соленость 19,3 ‰, плотность — 15 усл. ед. В центре западного антициклона наблюдалось максимальное содержание кислорода 10,82 мг/л (104 % насыщения). Пересыщение воды кислородом (106 %) на горизонте 50 м наблюдалось в прикрымской зоне напротив м. Херсонес, что, по-видимому, было связано с происходившим здесь опусканием вод (температура воды была повышенной 10,22 °С, а соленость — пониженной 18,48 ‰, плотность 14,07 усл. ед.). В поверхностном горизонте пересыщение достигало 110,2 %, что свидетельствует об активности процессов фотосинтеза.

Ровно через 3 года структура поля кислорода в феврале 1977 г. (рис. 41) значительно изменилась по сравнению с февралем 1974 г. Распределение кислорода в феврале 1977 г. было более неравномерным и немонотонным. На месте небольшой по площади зоны пониженных концентраций кислорода 7,0 мг/л в западной части моря в феврале 1974 г., в феврале 1977 г. появилась обширная зона с содержанием $<4{,}0$ мг/л.

В прибосфорском районе в феврале 1977 г. уже не существовала зона пониженных концентраций кислорода, а в северо-западной части моря появилась зона с содержанием $>11{,}0$ мг/л (>106 % насыщения). На периферии западной части моря в феврале 1977 г. концентрации кислорода несколько повысились по сравнению с февралем 1974 г. и колебались от 10,0 до 11,4 мг/л (94—107 % насыщения). В восточной части моря в феврале 1977 г., как и в феврале 1974 г., наблюдалось два циклонических круговорота, но их местоположение, конфигурация изооксиген и содержание кислорода в них изменились. Так, в центре циклонического круговорота, расположенного в феврале 1977 г. ближе к Крыму, содержание кислорода упало до 2,6 мг/л (25 % насыщения). Конфигурация изоповерхности, ограниченной изооксигеной 3,0 мг/л вытянулась с северо-запада на юго-восток. Второй циклонический круговорот сместился по данным 1977 г. на юго-восток ближе к п. Батуми. Зона повышенных концентраций кислорода ($<4{,}0$ мг/л, 35—40 % насыщения) имела в феврале 1977 г. сложную форму и занимала гораздо большую по сравнению с февралем 1974 г. площадь.

На периферии восточной части моря содержание кислорода колебалось от 8,86 до 10,46 мг/л (84—100 % насыщения). Среднее же содержание кислорода (9,1 мг/л, 88 % насыщения) по акватории моря было зимой одинаковым в оба сравниваемых года.

В апреле 1977 г. (см. рис. 41), так же как и в весенний период 1948—1963 гг. [181], наблюдалось две зоны пониженного содержания кислорода, приуроченных к центрам циклонических круговоротов. Однако местоположение этих зон и концентрации кислорода в них были различными. Характерно, что в 1977 г. циклонические круговороты располагались севернее и ближе к Крымскому полу-

острову, чем в 1948—1963 гг., а содержание кислорода в них к апрелю 1977 г. уменьшилось на 2,8—4,3 мг/л и составляло в центре западного 0,63 мг/л (6,6 % насыщения), а в центре восточного круговорота 3,49 мг/л (33 % насыщения) против 7,14 мг/л (70 % насыщения) в весенний период 1948—1963 гг. по данным Шульгиной [181]. Зона <7,0 мг/л 1977 г. простиралась с запада на восток почти через все море и занимала громадную площадь, тогда как в 1948—1963 гг. это были две небольшие по площади зоны, расположенные лишь в центрах циклонических круговоротов. На периферии же моря концентрации кислорода были в 1977 г. на 0,7 мг/л выше, чем в 1948—1963 гг. и достигали 10,0—10,9 мг/л (100—112 % насыщения) против 9,3—10,1 мг/л (90—95 % насыщения) в 1948—1963 гг. [181]. В результате приведенных данных можно сделать предположение, что динамика вод в апреле 1977 г. была выше, чем весной 1948—1963 гг.: происходил более быстрый подъем вод в центрах циклонических круговоротов и более быстрое опускание вод на периферии моря.

В августе 1977 г. (см. рис. 41) структура поля кислорода несколько изменилась относительно апреля этого же года. Так, западный циклонический круговорот сместился в апреле на юго-запад, а концентрация кислорода в его центре выросла почти на порядок и составила 4,20 мг/л (40 % насыщения), а на периферии упала до 9,3 мг/л. В центральной части моря размах концентраций кислорода в августе также уменьшился по сравнению с апрелем на 3—4 мг/л, однако максимальная концентрация кислорода стала выше на 1,4 мг/л и составляла 11,4 мг/л (111 % насыщения) в прикрымском районе моря (напротив п. Ялты). В восточной части моря циклонический круговорот практически не изменил свое положение, однако концентрация кислорода в его центре упала с 3,49 мг/л в апреле до 1,86 мг/л (17 % насыщения) в августе при температуре воды 8,3 °С, солености 20 ‰. На периферии восточной части моря содержание кислорода стало ниже в августе по сравнению с апрелем на 0,3—0,6 мг/л и составляло 9,4—10,3 мг/л.

В октябре 1977 г. (см. рис. 41) структура поля значительно усложнилась по сравнению с августом 1977 г. и предыдущими годами. Наблюдалось шесть зон пониженных (<7,0 мг/л) и семь — повышенных (>9,0 мг/л) концентраций кислорода при среднем значении по акватории моря 8,20 мг/л. Минимальная концентрация (0,48 мг/л) была в центре циклонического круговорота, расположенного напротив м. Керемпе, а максимальная (10,70 мг/л) — в центре антициклонического круговорота в восточной части моря. Три циклона и три антициклона наблюдались в западной части моря, а также антициклон — у Крымского полуострова напротив м. Херсонес, где содержание кислорода 10,26 мг/л. В восточной части моря наблюдалось две зоны с пониженным содержанием кислорода: у берегов Кавказа напротив Туапсе и напротив Батуми. Там же выявлены четыре зоны повышенного содержания кислорода: напротив Керченского пролива, у Туапсе и у Анатолийского побережья.

В октябре 1979 г. (рис. 42) в центральной части моря структура поля кислорода еще более усложнилась по сравнению с октябрем 1977 г. Только в этой части моря наблюдалось два циклонических круговорота с содержанием кислорода менее 7,0 мг/л (в квадратах 38 и 49) и два — антициклонических (в квадратах 25 и 35). В центре циклонического круговорота в квадрате 38 концентрация кислорода была 1,21 мг/л (11,7 % насыщения), температура 8,20 °С, соленость воды 20,05 ‰, плотность 15,60 усл. ед., водородный показатель pH = = 7,94. Столь высокие соленость и плотность воды

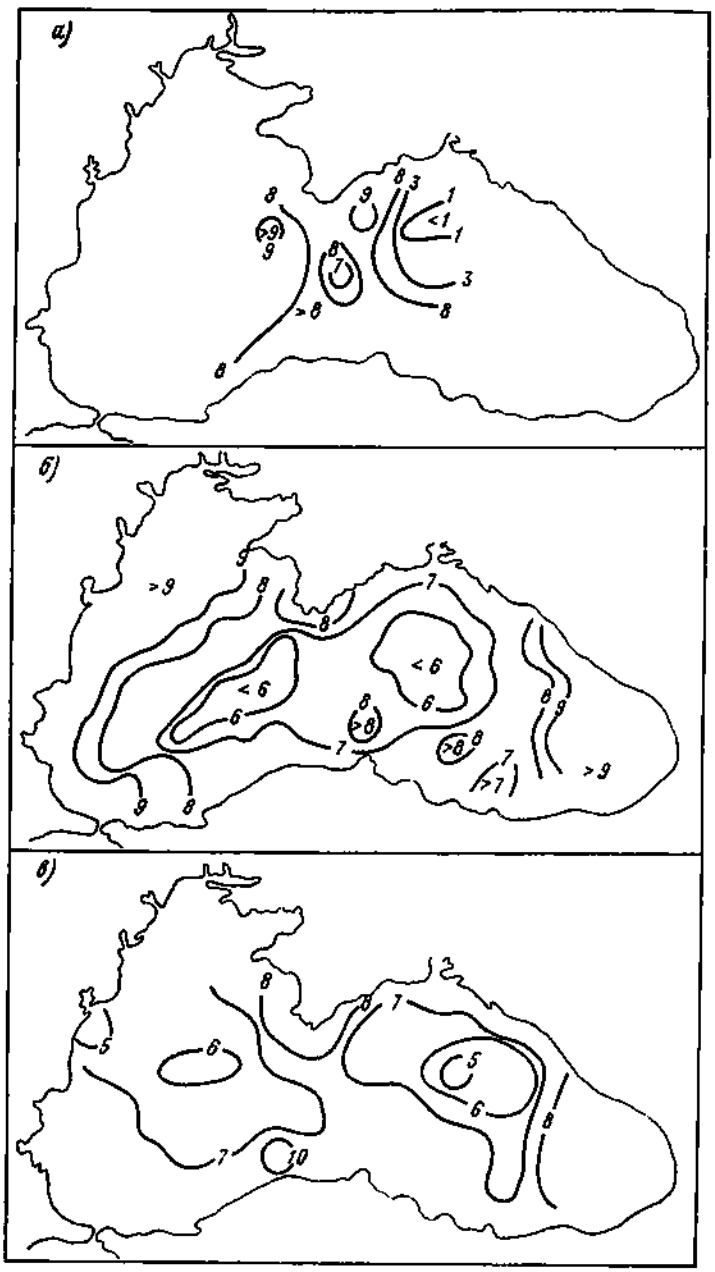

Рис. 42. Поля концентраций кислорода на горизонте 50 м в 1979 г. и 1981 г., мг/л.
а — октябрь 1979 г.; *б* — май 1981 г.; *в* — сентябрь 1981 г.

более свойственны горизонту 100 м, нежели горизонту 50 м, что говорит о подъеме вод в указанном районе моря (квадрат 38). В квадрате 25 (в центре антициклона) содержание кислорода составляло 9,53 мг/л (98,1 % насыщения), температура воды 10,77 °С, соленость 18,30 ‰, плотность 13,90 усл. ед, водородный показатель pH = 8,47. Приведенные данные свидетельствуют об опускании вод в квадрате 25. По осредненным данным 1963—1985 гг. (см. рис. 39) содержание кислорода осенью в квадрате 25 8,44 мг/л, а в квадрате 38 — 6,17 мг/л, что

указывает на относительно устойчивое циклоническое течение в указанном районе в осенний период. Четверть века назад в ноябре 1954 г. в центральной части моря наблюдался только один циклон, расположенный южнее, чем в 1979 г., с содержанием кислорода в нем <6,0 мг/л [72].

В мае 1981 г. (см. рис. 42) структура поля кислорода упростилась по сравнению с 1977—1979 гг. На горизонте 50 м наблюдалось только две зоны пониженного (<6,0 мг/л) содержания кислорода и две — повышенного (>9,0 мг/л). Зоны пониженных (<6,0 мг/л) концентраций кислорода располагались в центрах восточного и западного циклонических круговоротов, а повышенного (>9,0 мг/л) — на периферии моря вдоль его берегов. Минимальная концентрация (3,44, 33 % насыщения) была в центре восточного циклонического круговорота, максимальная — 9,96 (96 % насыщения) — в прибосфорском районе моря, при среднем значении для всей акватории моря 8,23 мг/л (78,3 % насыщения).

В сентябре 1981 г. (см. рис. 42) минимумы концентраций кислорода, так же как и в мае, располагались в центрах восточного (2,93 мг/л, 28 % насыщения) и западного (3,92 мг/л, 37 % насыщения); максимумы — в прибосфорском районе (10,12 мг/л, 104 % насыщения) и у Анатолийского побережья напротив м. Керемпе (10,27 мг/л, 100 % насыщения). Однако конфигурации изооксиген и их местоположения стали другими. Вместо одной обширной зоны, ограниченной изооксигеной 7,0 мг/л и охватывающей оба циклонических круговорота и всю центральную часть моря в мае 1981 г., в сентябре этого же года уже выявились западная и восточная зоны. В западной части моря эта зона распространилась далее на запад вплоть до береговой линии, а в восточной — на восток. Причем центры обоих циклонических круговоротов (с минимумом содержания кислорода) в сентябре были практически на том же месте, что и в мае, однако концентрация кислорода в сентябре стала ниже на 0,3 и на 0,6 мг/л соответственно в западном и восточном. Средняя концентрация кислорода по всей акватории моря в сентябре была также ниже (8,0 мг/л, 74 % насыщения).

Согласно работам [88, 150], продукция фитопланктона прослеживается примерно до 50-метровой глубины и «...больше в прибрежье, нежели в открытой части моря, где ее максимум наблюдался в апреле—мае».

Этот вывод подтверждает распределение кислорода на горизонте 50 м в апреле 1982 г. (рис. 43). Зоны повышенных концентраций кислорода (>10,0 мг/л) расположены в прибрежье с максимумом 11,83 мг/л (136 % насыщения) на границе с северо-западной частью моря вблизи изобаты 50 м. Как видно из табл. 36, столь значительное насыщение вод кислородом на горизонте 50 м наблюдалось ранее лишь дважды — в 1966 и в 1978 гг. Среднее же содержание кислорода в апреле 1982 г. (8,24 мг/л) было ниже среднего годового (8.89 мг/л). Зоны пониженного содержания кислорода (<3,0 мг/л) располагались в западной части моря с минимумом концентрации 1,4 мг/л (15 % насыщения) и в восточной части моря с минимумом 2,69 мг/л (26 % насыщения). Наиболее низкому содержанию кислорода (1,4 мг/л) соответствовали наиболее высокие значения солености (20,04 ‰), плотности воды (15,09), температуры и низкие значения pH (7,82).

В последующие годы структура поля кислорода еще более упростилась. Например, в 1984 г. (июль—сентябрь) и 1985 г. (апрель) (см. рис. 43) можно было выделить только по одной зоне пониженных (<7,0 мг/л) концентраций кислорода, размеры и

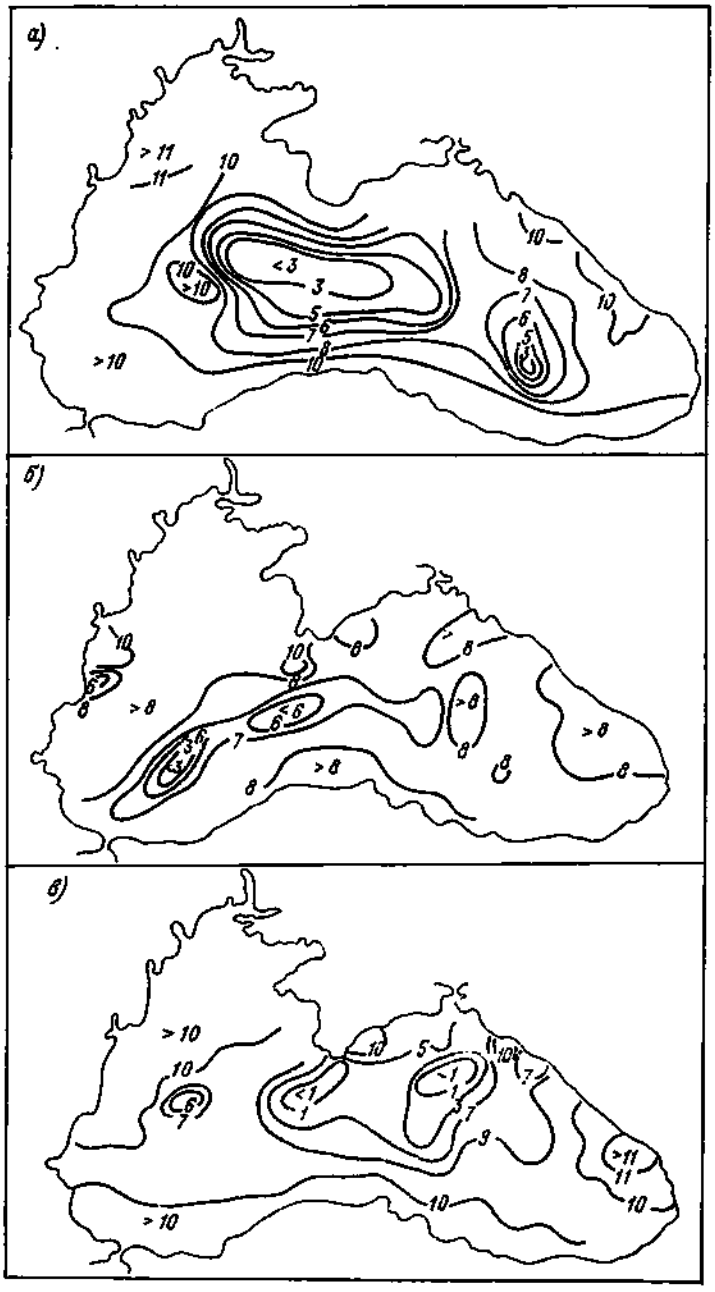

Рис. 43. Поля концентраций кислорода на горизонте 50 м в 1982, 1984 и 1985 гг., мг/л.
а — апрель 1982 г.; *б* — июль — сентябрь 1984 г.; *в* — апрель 1985 г.

местоположение которых различны. Зоны пониженных концентраций кислорода (как и повышенных) различаются между собой конфигурациями и минимальными значениями (максимальными) не только в зависимости от сезона года, но и внутри одного сезона, но в разные годы. Так, в июле—сентябре 1984 г. минимальные концентрации кислорода были в восточной части моря выше более чем в 2 раза (6,36 мг/л, 60 % насыщения), а в западной — только на 0,11 мг/л выше (8,10 мг/л, 39 % насыщения), чем в сентябре 1981 г. Максимальная

концентрация (10,67 мг/л, 98 % насыщения) была также выше в июле—сентябре 1984 г., чем в сентябре 1981 г., и располагалась в 1984 г. на том месте (напротив Потийского гирла), где в 1981 г. наблюдался один из минимумов (5,50 мг/л, 52 % насыщения). Средняя концентрация кислорода по всей акватории моря (8,94 мг/л, 84,5 % насыщения) была в июле—сентябре 1984 г. также выше, чем в сентябре 1981 г. В конфигурации же изоповерхностей 1981 и 1984 гг. было больше различий, чем сходства. Вместо двух изоповерхностей, ограниченных изооксигеной 7,0 мг/л, в восточной и западной частях моря в 1981 г. (см. рис. 42) в сентябре 1984 г. наблюдалась только одна, простирающаяся узкой полосой из западной в восточную часть моря (см. рис. 43).

Выводы, получаемые из сравнения структуры полей кислорода, приуроченных к двум, например, экспедициям, нельзя ни экстраполировать, ни даже интерполировать на значительные периоды времени. Например, в апреле 1982 г. и в апреле 1985 г. характер распределения кислорода в значительной степени различался и его содержание в отдельных районах моря было значительно выше в 1982 г., чем в 1985 г. Так, в восточной области моря, там, где в 1982 г. наблюдались концентрации 5,54—8,12 мг/л, в 1985 г. в центре циклонического круговорота содержание кислорода составляло всего лишь 0,71—2,72 мг/л (7—25 % насыщения). В прикрымском районе моря на одной из станций содержание ингредиента упало с 9,62 мг/л в 1982 г. до 1,57 мг/л (15 % насыщения) в 1985 г., а на другой, соседней, станции наоборот увеличилось с 8,73 до 11,00 мг/л (100 % насыщения). У берегов Кавказа, напротив Гагры и Сухуми, содержание кислорода тоже возросло в 1985 г. до 12,55 мг/л (114—115 % насыщения) против 10,12—10,37 мг/л в 1982 г. В апреле 1982 г. наиболее низкая концентрация кислорода (1,4 мг/л) наблюдалась в западной части моря, а в 1985 г.— в восточной (0,71 мг/л). Обширная зона пониженных концентраций кислорода, ограниченная изооксигеной 3,0 мг/л, расположенная в центральной части моря и вытянутая с запада на восток в апреле 1982 г., в апреле 1985 г. трансформировалась: уменьшилась в размерах и сместилась на север к Крымскому полуострову, а минимальная концентрация кислорода в ней упала до 1,36 мг/л (13 % насыщения). Средневзвешенное содержание кислорода в апреле 1985 г. составляло 7,94 мг/л (79,7 % насыщения) против 8,24 мг/л (80,5 % насыщения) в апреле 1982 г. Отсюда напрашивается суждение, что за данный период времени произошло не только усложнение структуры поля кислорода, но и понижение его концентраций на горизонте 50 м. Нужно отметить, что по данным Е. Ф. Шульгиной [181] в период 1948—1963 гг. на горизонте 50 м наблюдалось два циклонических круговорота с содержанием кислорода в них $<$7,0—9,0 мг/л ($<$70—80 % насыщения), тогда как в период 1963—1985 гг. наблюдались три циклонических круговорота с содержанием в них $<$6,0—9,0 мг/л (60—70 % насыщения). Нами установлено, что между содержанием кислорода и соленостью воды на горизонте 50 м существует хорошая корреляция, описываемая уравнениями регрессии (табл. 37). Из этих данных следует, что наиболее устойчивая связь между содержанием кислорода и соленостью воды на горизонте 50 м в весенне-зимний период (r = —0,6 ... ...—0,99), наименее устойчивая — в осенне-летний период (r = —0,25 ... —0,92), что, по-видимому, объясняется различной динамикой вод в эти периоды года в разных районах моря.

Таблица 37

Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии между содержанием кислорода (C мг/л) и соленостью (S ‰)

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон, номер квадрата
$C = 207 - 46{,}2\sqrt{S}$	—0,99	Зима, 21
$C = 81{,}3 - 3{,}90S$	—0,60	Зима, 60
$C = 133{,}9 - 28{,}9\sqrt{S}$	—0,63	Зима, 36
$C = 88{,}9 - 4{,}29S$	—0,78...—0,96	Весна, 36, 60
$C = 51{,}3 - 39{,}58 \lg S$	—0,98	Весна, 21
$C = 26{,}9 - 20{,}3 \lg S$	—0,82	Лето, 36
$C = 20{,}4 - 15{,}3 \lg S$	—0,85	Лето, 60
$C = 53{,}6 - 41{,}6 \lg S$	—0,92	Лето, 21
$C = 53{,}0 - 32{,}6 \lg S$	—0,54	Осень, 36
$C = 13{,}06 - 15{,}4 \lg S$	—0,62	Осень, 60
$C = 61{,}2 - 2{,}82S$	—0,75	Зима, 23, 24, 25
$C = 70{,}9 - 3{,}34S$	—0,77	Весна, 23, 24, 25
$C = 30{,}7 - 1{,}17S$	—0,25	Лето, 23, 24, 25
$C = 61{,}9 - 2{,}86S$	—0,72	Осень, 23, 24, 25

Наличие устойчивых (с высокими коэффициентами корреляции r = —0,80 ... —0,98) зависимостей содержания кислорода от солености воды существенно отличает состояние его полей на горизонте 50 м от горизонта 0—0,05 м. Причины таких различий объясняются, по-видимому, тем, что на поверхности моря содержание кислорода определяется в большей степени его растворимостью в зависимости от температуры воды [164], а на горизонте 50 м — динамикой вод. По тем же причинам на горизонте 50 м корреляционная связь между содержанием кислорода и температурой воды проявляется слабее (r = —0,12 ... —0,61), что видно из табл. 38. Из приведенных данных следует, что

Таблица 38

Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии между содержанием кислорода (C мг/л) и температурой (T °С)

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон, номер квадрата
$C = 12{,}09 - 0{,}28T$	—0,61	Весна, 36
$C = 19{,}36 - 1{,}19T$	—0,52	Осень, 60
$C = 12{,}06 - 0{,}28T$	—0,56	Весна, 60
$C = 11{,}77 - 0{,}14T$	—0,51	Зима, 60
$C = 9{,}56 - 0{,}08T$	—0,12...—0,13	Все сезоны, 23, 24, 25

на горизонте 50 м между содержанием кислорода и температурой воды связь неустойчивая в прикрымском районе моря (r = —0,12 ... —0,13), что, по-видимому, объясняется особенностью динамики вод. В центральных районах моря (квадраты 36, 60) эта связь более устойчивая (r = —0,51 ... ... —0,61) — с увеличением температуры воды наблюдается уменьшение концентраций кислорода.

Аналогичные вышеприведенным зависимостям, выявлены зависимости между концентрациями кислорода и величинами условной плотности σ_t, которые для разных районов моря имеют вид, представленный в табл. 39. Коэффициенты корреляции

Таблица 39

Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии между содержанием кислорода (C мг/л) и плотностью (σ_t усл. ед.)

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон, номер квадрата
$C = 105{,}17 - 6{,}62\sigma_t$	—0,51	Зима, 60
$C = 85{,}88 - 5{,}29\sigma_t$	—0,71	Весна, 60
$C = 85{,}74 - 5{,}29\sigma_t$	—0,82	Лето, 60
$C = 150{,}04 - 9{,}72\sigma_t$	—0,91	Весна, 36
$C = 32{,}87 - 1{,}63\sigma_t$	—0,51	Осень, 36
$C = 33{,}30 - 2{,}06\sigma_t$	—0,989	Весна, 21
$C = 26{,}15 - 1{,}60\sigma_t$	—0,86	Лето, 21

для этих уравнений в зонах циклонических круговоротов колебались в пределах: от —0,51 до —0,91, а на границе с северо-западной частью моря (квадрат 21) от —0,86 летом до —0,989 весной, что свидетельствует о прочности связи между содержанием кислорода и плотности воды на горизонте 50 м.

Горизонт 75 м. Для этого горизонта каждому сезону года свойственна еще большая неравномерность и немонотонность распределения кислорода, чем для горизонта 50 м. Исследования 1963—1985 гг. показали, что здесь наряду с кислородом периодически обнаруживался и растворенный сероводород [101, 138], а характер изменчивости поля концентраций кислорода, несомненно, зависит от гидрологических характеристик районов моря. Зонам циклонических круговоротов соответствует минимальное содержание кислорода, а зонам антициклонов — максимальное.

Согласно рис. 44, в весенний сезон выделяются четыре зоны низких концентраций кислорода: по одной — в западной и центральной областях моря и две — в восточной. В западной части моря средние концентрации кислорода были несколько выше, чем в центральной и восточной и колебались в следующих пределах: от 3,64 мг/л (20 % насыщения в квадрате 60) до 10,19 мг/л (98 % насыщения в квадрате 20). В центральной части моря среднее содержание кислорода от квадрата к квадрату менялось от 1,23 мг/л (12 % насыщения в квадрате 48) до 8,52 мг/л (80 % насыщения в квадрате 64). В восточной — от 1,31 мг/л (13 % насыщения в квадрате 39) до 9,83 мг/л (93 % насыщения в квадрате 86). Максимально-разовые концентрации на горизонте колебались от 2,27 мг/л (22 % насыщения в квадрате 49) до 12,29 мг/л (114 % насыщения в квадрате 64), а минимально-разовые — от 0,20 мг/л (2 % насыщения в квадрате 38) до 9,69 мг/л (90 % насыщения в квадрате 86). Квадрат 38 примечателен не только тем, что концентрации кислорода в нем варьировали более чем в 20 раз, но и тем, что весной на горизонте 75 м в этом квадрате обнаруживался сероводород до 0,17 мг/л.

В летний период структура поля концентраций кислорода несколько отличалась от весенней (см. рис. 44). Выявлены только три зоны низких концентраций кислорода: одна — в западной и две — в восточной частях моря. В центре западного циклонического круговорота (квадрат 46) средняя концентрация кислорода составляла 0,94 мг/л (9 % насыщения), а на его периферии (квадрат 43) — 7,42 мг/л (72 % насыщения). В центральной части моря среднее содержание кислорода колебалось от 2,86 мг/л (30 % насыщения в квадрате 36) до 8,29 мг/л (80 % насыщения в квадрате 24 — прикрымский район). В центре одного восточного круговорота (квадрат 39) наблюдалось минимальное

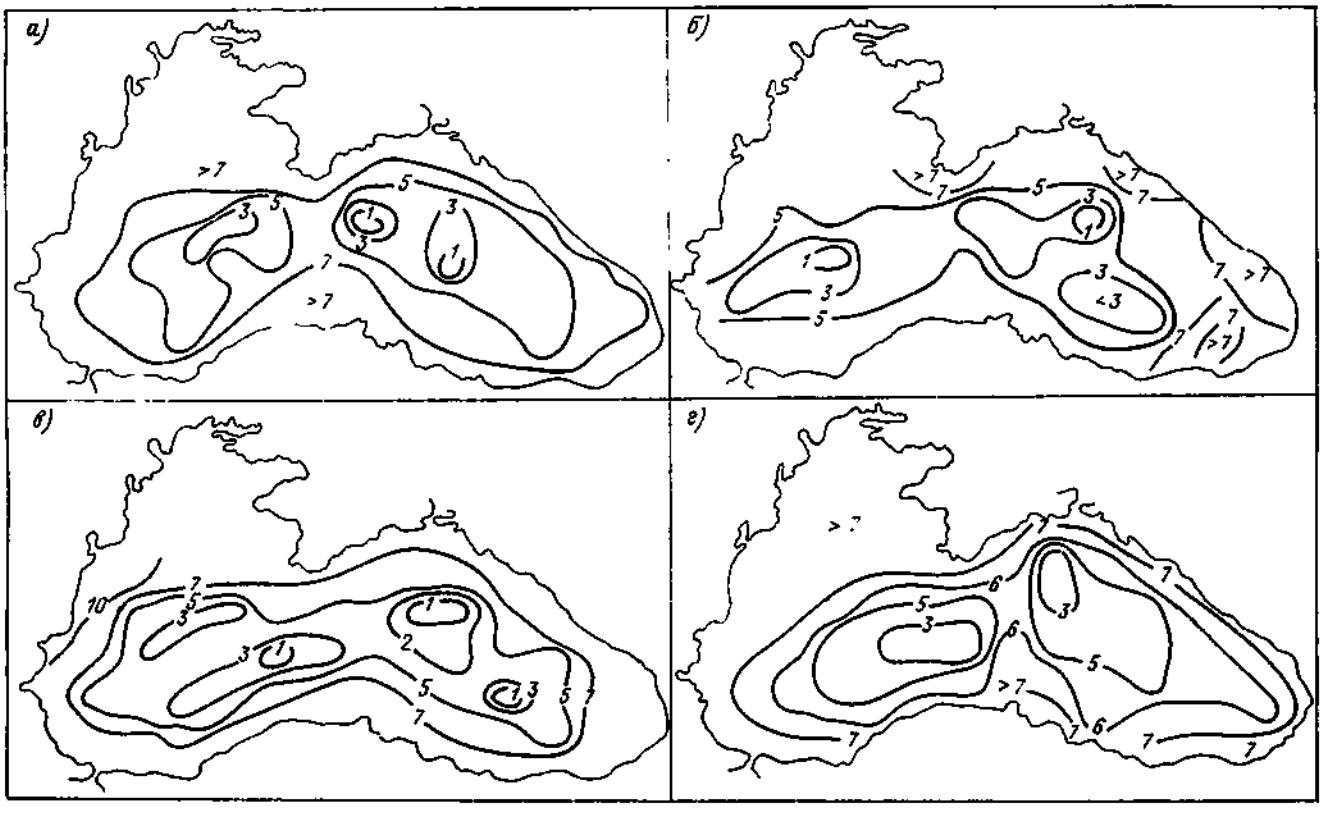

Рис. 44. Сезонные поля концентраций кислорода на горизонте 75 м в период 1963—1985 гг., мг/л.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

по всей акватории моря среднее содержание кислорода (0,83 мг/л, 8 % насыщения), а в центре другого (квадрат 67) — 2,16 мг/л (30 % насыщения). Максимальное содержание кислорода среди его средних значений (9,64 мг/л, 97 % насыщения) наблюдалось у берегов Кавказа (квадрат 56). Максимально-разовые концентрации кислорода летом были несколько меньше, чем весной, и колебались в пределах от 1,13 мг/л, 10 % насыщения (квадрат 39) до 10,76 или 100 % насыщения (квадрат 68), а минимально-разовые — от 0,26 мг/л, 2 % насыщения (квадрат 46) до 8,72 мг/л, 73 % насыщения (квадрат 83).

Осенью (см. рис. 44) структура поля концентраций кислорода отличается от наблюдаемой в весенне-летний период. Так, в осенний сезон выявлены только две зоны низких концентраций кислорода: одна расположена в западной и частично в центральной частях моря, другая — в восточной. Колебания средних концентраций кислорода происходили от 2,23 мг/л (квадрат 48) до 9,10 мг/л (квадрат 93).

Зимой содержание кислорода несколько выше, чем в остальные сезоны (см. рис. 44). Увеличение среднего абсолютного (7,00 мг/л) и относительного (68 % насыщения) содержания кислорода в глубоководной части моря связано со всеобщим охлаждением поверхностных вод и зимней конвекцией. На глубине 75 м в центре западного циклонического круговорота (квадрат 34) среднее содержание кислорода равнялось 1,94 мг/л (20 % насыщения), а минимально-разовая по всей акватории моря — 0,44 мг/л (4 % насыщения). Минимальная (по средним значениям) концентрация растворенного кислорода наблюдалась в центре восточного циклонического круговорота (квадрат 52) и составляла 0,63 мг/л (6 % насыщения). Максимально-разовые концентрации колебались от 0,76 мг/л (8 % насыщения в квадрате 52) до 11,69 мг/л (103 % насыщения в квадрате 25).

Изменчивость средних квадратических отклонений более существенна во все сезоны на горизонте 75 м, чем на 50 м. Так, пределы колебаний этих отклонений составляли в зимний сезон 1,46—3,79 мг/л, в весенний 0,46—3,54 мг/л, в летний 0,26—3,39 мг/л, в осенний 1,14—3,26 мг/л. Характерно, что экстремальные значения средних квадратических отклонений соответствуют минимально-разовым концентрациям зимой, весной и летом.

Межгодовая изменчивость содержания кислорода на горизонте 75 м, рассчитанная из всего массива наблюдений в период 1960—1985 гг. (табл. 40), показывает, что содержание кислорода колебалось в широких пределах: среднее от 5,56 мг/л (50 % насыщения) в 1977 г. до 7,59 мг/л (72 % насыщения) в 1965 и 1980 гг., минимальное от 0,08 (1 % насыщения) в 1977 г. до 2,83 мг/л (28 % насыщения) в 1971 г., максимальное от 8,14 (77 % насыщения) в 1984 году до 12,62 мг/л (125 % насыщения) в 1966 г. Несмотря на значительную изменчивость средних годовых концентраций кислорода на горизонте, пределы их колебаний в каждом году за весь многолетний период близки между собой, и, следовательно, существовала в этот период определенная внутригодовая устойчивость осредненного поля концентраций кислорода.

В более ранний период 1948—1963 гг. по данным Е. Ф. Шульгиной [181] среднее содержание кислорода было несколько выше (7,1 мг/л, 68 % насыщения), а коэффициент изменчивости (8,57 %) — ниже (11,4 % в 1963—1985 гг.). Уменьшение концентраций кислорода (см. табл. 37) и увеличение коэффициентов изменчивости приходятся на годы, предшествовавшие увеличению солнечной активности. В эти годы горизонт 75 м находился под периодическим воздействием сероводородных вод [101, 102, 137, 138], что приводило к уменьшению глубины залегания слоя максимального содержания кислорода по всему морю [86]. В зонах, содержащих сероводород в количестве $<0{,}08$—1,20 мг/л,

Таблица 40

Содержание кислорода на горизонте 75 м

Год	Среднее	Минимальное	Максимальное
1960	6,06/56	0,80/8	9,60/92
1961	6,09/57	0,48/5	10,47/98
1962	7,23/65	0,87/8	9,94/94
1963	6,37/59	1,74/17	10,14/101
1964	6,36/60	1,37/12	10,12/99
1965	7,59/72	0,54/5	9,53/90
1966	6,83/67	1,49/15	12,62/125
1967	6,20/63	1,81/18	10,34/99
1968	7,27/72	1,26/12	9,84/97
1969	7,24/70	0,44/4	10,29/99
1970	7,33/70	1,71/17	10,12/96
1971	7,20/68	2,83/28	9,46/93
1972	7,23/70	1,97/20	10,17/98
1973	6,59/64	0,41/4	10,09/96
1974	6,69/64	0,66/6	12,12/103
1975	6,33/62	0,78/8	10,43/102
1976	4,59/62	0,50/5	10,17/99
1977	5,56/53	0,08/1	10,70/104
1978	6,13/61	0,64/6	11,17/91
1979	6,79/67	0,36/4	11,17/96
1980	7,59/71	0,44/4	9,53/90
1981	5,72/50	0,38/4	9,06/87
1982	5,89/54	0,48/6	10,79/102
1983	5,70/55	0,38/4	10,60/99
1984	5,66/53	0,26/3	8,14/77
1985	5,64/52	0,28/3	12,38/111

Примечание. Числитель — концентрация кислорода мг/л; знаменатель — процент насыщения.

наблюдались пониженные концентрации кислорода (0,1—1,4 мг/л) и повышенные значения солености (19,5—20,7 ‰) и плотности воды (15,0—16,1 усл. ед.), что свидетельствует о происходившем подъеме вод в этих зонах [101].

Немонотонный характер изменчивости как средних годовых, так и экстремальных концентраций кислорода на горизонте определяется не только динамикой вод в различных районах моря в различные периоды времени. Характер указанной немонотонности зависит, естественно, и от техники проведения наблюдений, в частности от смены сети станций наблюдений, длины рядов наблюдений и размеров массивов их. Поэтому для более полного выяснения характера пространственно-временной динамики концентраций кислорода рассмотрим некоторые наиболее характерные результаты экспедиционных исследований.

Распределение кислорода по площади моря на горизонте 75 м, свойственное для рассматриваемого периода времени, характеризуется картой (рис. 45), построенной по данным экспедиционных исследований в январе—феврале 1974 г., из которой четко прослеживаются три области пониженного содержания кислорода, ограниченные изоксигеной 2,0 мг/л

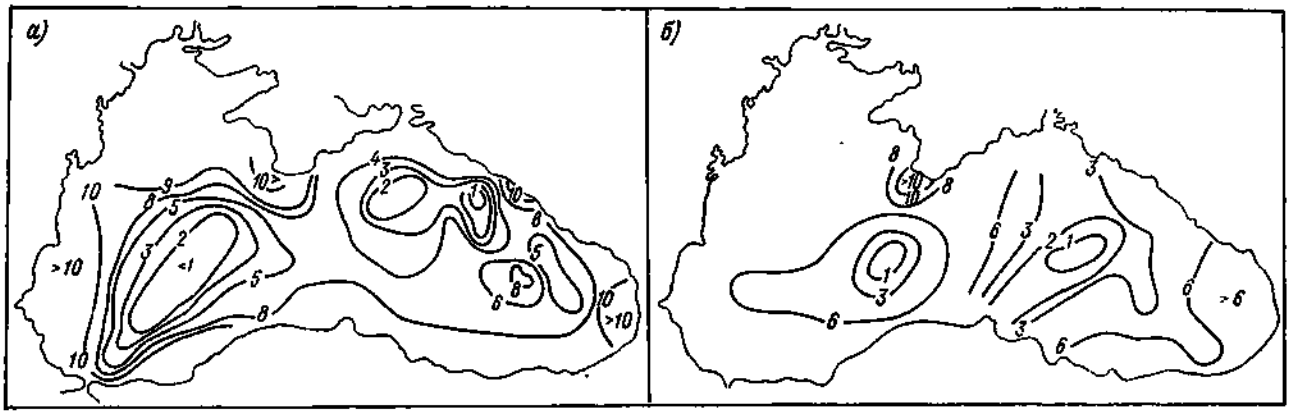

Рис. 45. Поля концентраций кислорода на горизонте 75 м в 1974 г., мг/л.
а — январь — февраль; *б* — ноябрь — декабрь.

и располагающимися одна в западной и две в восточной частях моря с минимумом (0,64 мг/л) в восточной части. Минимумы концентраций кислорода приходились на центры циклонических круговоротов. В них были повышенные значения солености (20,05—20,37 ‰) и температуры (8,32—8,77 °С). В центрах антициклонических круговоротов (два — в восточной части моря и один — в прикрымском районе) содержание кислорода колебалось от 9,57 до 11,69 мг/л. Им были свойственны пониженные значения солености (18,33—18,46 ‰) и температуры воды (6,66—7,88 °С), что может свидетельствовать об опускании вод в указанных зонах. На периферии моря наблюдались также повышенные значения содержания кислорода (>9,0 мг/л), пониженные значения солености (18,24—18,95 ‰) и температуры воды (6,48—7,37 °С). Средневзвешенное содержание кислорода на горизонте 6,67 мг/л (64 % насыщения).

Весьма отличительный характер в структуре поля концентраций кислорода по сравнению с январем—февралем 1974 г. наблюдался в ноябре—декабре 1974 г. (см. рис. 45). Вместо трех зон с пониженным содержанием кислорода (2,0 мг/л), существовавших в январе — феврале, в ноябре — декабре было только две зоны с содержанием кислорода <1,0 мг/л (10—15 % насыщения) при среднем значении по горизонту 6,06 мг/л (58 % насыщения). Максимальная концентрация кислорода (12,12 мг/л, или 103 % насыщения) наблюдалась в прикрымском районе моря напротив м. Херсонес. Это самая высокая концентрация, когда-либо наблюдавшаяся на горизонте 75 м за последние 20 лет. На периферии западной и восточной частей моря концентрации кислорода в ноябре—декабре были ниже, чем в январе—феврале и колебались от 1,97 до 9,70 мг/л (18—93 % насыщения). Таким образом, можно сделать вывод, что на горизонте 75 м наблюдался сезонный ход в колебаниях концентраций кислорода: зимой его среднее содержание в 1974 г. было на 0,61 мг/л (5 % насыщения) выше, чем осенью. Этот вывод подтверждается экспедиционными исследованиями последующих лет.

Так, через два года, в январе—феврале 1976 г. (рис. 46), хотя структура поля концентраций кислорода претерпела значительные изменения по сравнению с январем—февралем 1974 г., средние его концентрации по акватории моря были близки (6,83 мг/л, или 65 % насыщения в 1976 г.) в оба сравниваемых периода. В январе—феврале 1976 г. наблюдалось пять зон пониженных концентраций кислорода (<6,0 мг/л): три — в западной части моря и две — в восточной. В западной части моря обширная зона минимальных концентраций кислорода, ограниченная изооксигеной 2,1 мг/л в 1974 г., в 1976 г. была уже разделена на две сравнительно небольших. Если в 1974 г. она была вытянута в направлении разреза м. Херсонес — пр. Босфор с северо-востока на юго-запад, то в 1976 г. две зоны минимальных концентраций (<2,0 мг/л, или 15—19 % насыщения) были расположены по 43° с. ш. В прикрымском районе моря, где в 1974 г. располагалась зона повышенных концентраций кислорода (>10,0 мг/л), в 1976 г. появилась зона пониженного его значения (<6,0 мг/л). В центральной части моря в январе—феврале 1976 г. появилась зона повышенного содержания кислорода (>9,0 мг/л, или 86 % насыщения), тогда как в 1974 г. его концентрации были <9,0 мг/л. В восточной части моря, там, где в 1974 г. наблюдались зоны минимальных концентраций кислорода (<2,0 и даже <0,7 мг/л), в 1976 г. его содержание превышало 4,3 мг/л, а на месте зоны повышенного содержания (>9,0 мг/л) образовалась зона пониженных концентраций кислорода (<4,0 мг/л). На периферии моря в январе — феврале 1976 г. концентрации кислорода были ниже на 0,7—2,1 мг/л, чем в январе — феврале 1974 г. и колебались от 6,17 мг/л (59 % насыщения) в прибосфорском районе до 10,06 мг/л (95,5 % насыщения) в прикрымском районе моря.

К апрелю 1976 г. (см. рис. 46) структура поля кислорода значительно упростилась по сравнению с январем — февралем: наблюдались только две зоны низких концентраций кислорода (одна — в западной и частично в центральной частях моря с минимумом концентрации 0,50 мг/л, или 5 % насыщения, другая — в восточной). В центре восточного циклонического круговорота содержание кислорода было выше (3,27 мг/л, или 32 % насыщения), чем в центре западного. На периферии моря и близ берегов концентрации кислорода в апреле в результате процессов фотосинтеза возросли на 0,3—1,4 мг/л по сравнению с январем — февралем этого же года и колебались от 7,72 (76 % насыщения) до 10,33 мг/л (96 % насыщения) с максимумом у болгарского побережья при средней на горизонте 7,20 мг/л (68 % насыщения).

В августе 1976 г. (см. рис. 46) поле концентраций кислорода было более равномерным, чем в предыдущие месяцы этого же года. Минимум кон-

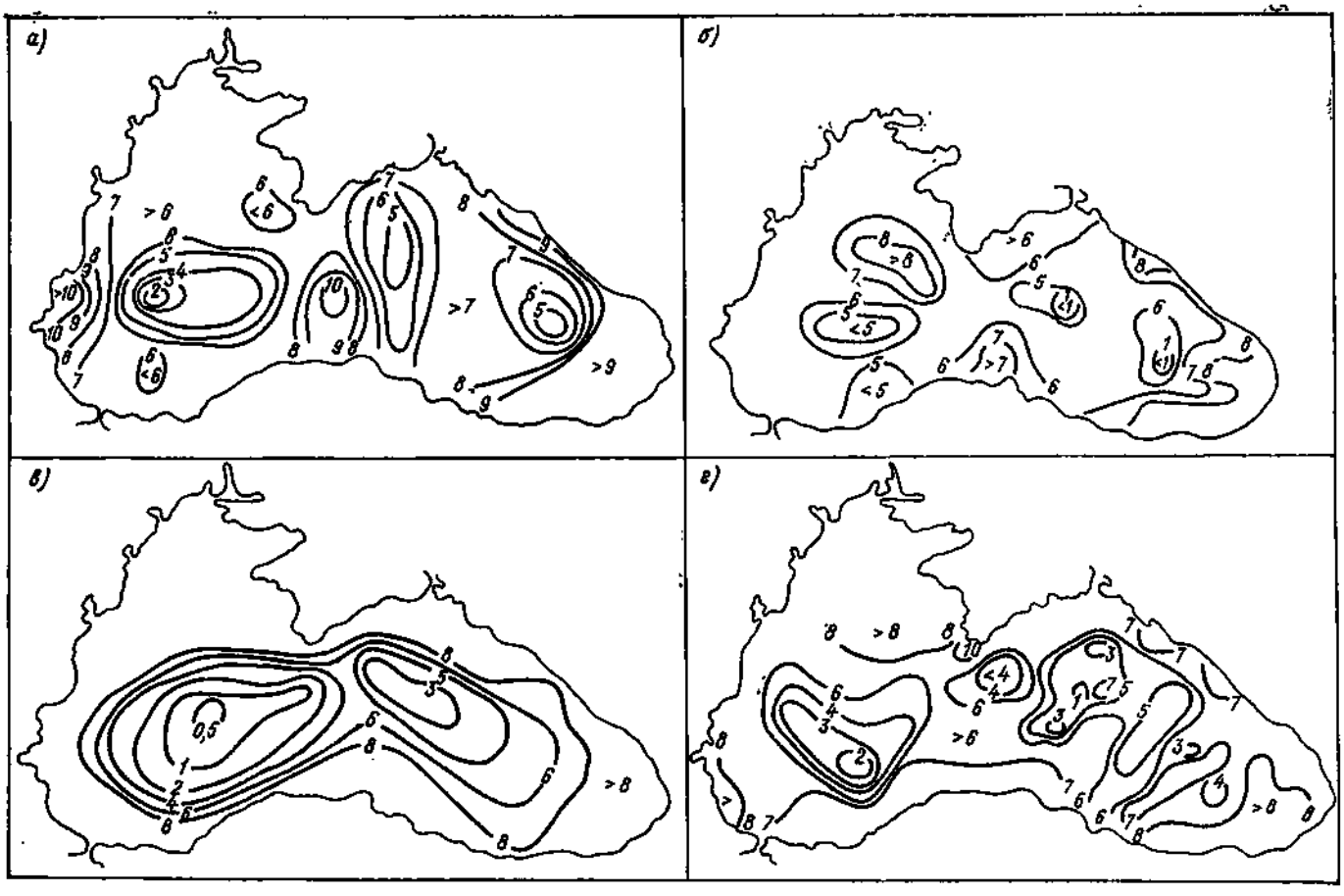

Рис. 46. Поля концентраций кислорода на горизонте 75 м в 1976 г., мг/л.
а — январь — февраль; *б* — август; *в* — апрель, *г* — октябрь — ноябрь.

центрации (0,54 мг/л, или 5 % насыщения) располагался в центре восточного циклонического круговорота, а максимум (9,94 мг/л, или 94 % насыщения) — в западном антициклоне напротив Крымского полуострова при среднем значении по акватории моря 6,36 мг/л (57 % насыщения).

К октябрю — ноябрю 1976 г. структура поля кислорода значительно усложнилась по сравнению с августом. Так, по акватории моря наблюдались восемь изолированных зон пониженных концентраций кислорода, ограниченных изооксигенами 0,7—4,3 мг/л (6—40 % насыщения). Одна из отмеченных зон располагалась в западной части моря, одна — в центральной и шесть — в восточной с минимумом содержания, равным 0,54 мг/л, или 5,3 % насыщения. Зоны пониженных и повышенных концентраций кислорода чередовались в пространстве. Так, рядом с зоной минимальной концентрацией $<0,7$ мг/л в восточной части моря располагалась зона повышенного содержания кислорода ($>7,0$ мг/л, 69,7 % насыщения). В центральной части моря рядом с зоной пониженного содержания кислорода ($<4,0$ мг/л) располагалась зона с максимальным его содержанием ($>10,0$ мг/л, 96 % насыщения) при средней по акватории моря 5,74 мг/л (55 % насыщения).

Резкое усложнение структуры поля концентраций кислорода от лета к осени с одновременным уменьшением его средних концентраций по акватории моря наблюдалось и в последующие годы, совпадавшие с усилением солнечной активности. Так, в октябре — ноябре 1977 г. (рис. 47) можно было насчитать восемь зон с пониженным содержанием кислорода, ограниченных изооксигенами 0,7—2,8 мг/л и столько же — с повышенными ($>7,0$ мг/л). Среднее же содержание кислорода на горизонте (5,24 мг/л 50 % насыщения) было самым низким за все годы рассматриваемого периода времени. В ноябре 1977 г. на одной из станций в прикрымском районе моря наблюдалась минимальная концентрация кислорода 0,08 мг/л, или 1 % насыщения — за весь период исследований. В пробе воды, отобранной на этой станции, содержание сероводорода 0,61 мг/л, температура воды была 8,06 °С, соленость 20,14 ‰, условная плотность 15,68 усл. ед. Приведенные данные указывают на происходивший в этом районе моря подъем вод. Весьма необычные четыре зоны минимальных концентраций кислорода (0,36—1,4 мг/л, 4—14 % насыщения) сформировались под действием циклонов в центральной (частично в западной) и восточной областях моря в октябре — ноябре 1979 г. (см. рис. 47). Одновременно с кислородом в пробах воды обнаруживался и сероводород в количестве 0,08—1,22 мг/л [101]. В результате подъема вод в указанных зонах соленость воды достигала 19,5—20,7 ‰, температура воды 8,0—8,81 °С, плотность 15,0—16,1 усл. ед. Среднее содержание кислорода на горизонте было самым низким за весь рассматриваемый период наблюдений (4,84 мг/л, 44 % насыщения). Рядом с зонами пониженных концентраций кислорода располагались зоны повышенного его содержания ($>7,0$ мг/л): одна — в западной (ближе к центру моря), две —

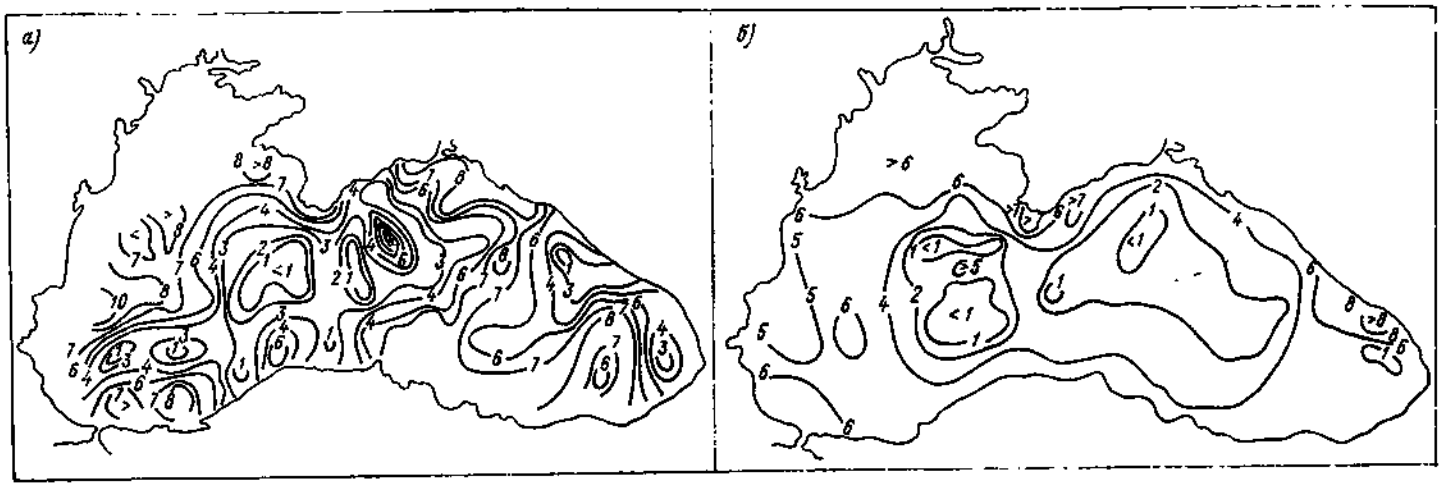

Рис. 47. Поля концентраций кислорода на горизонте 75 м в октябре — ноябре 1977 г. (*а*) и 1979 г. (*б*), мг/л.

в прикрымском районе моря и одна — у Кавказского побережья (напротив Сухуми). На периферии моря, как правило, концентрации кислорода были выше, чем в его центральной глубоководной части, но и здесь в ноябре 1979 г. наблюдались достаточно низкие для этих районов концентрации (1,0 мг/л, 13,8 % насыщения), например, у Анатолийского побережья напротив м. Инеболу.

В последующие годы структура моря концентраций кислорода вновь упростилась, а средние его концентрации возросли. Например, в августе 1981 г. и в апреле 1985 г. (рис. 48) можно было выделить только по две зоны пониженных концентраций кислорода (<1,0 мг/л), размеры и местоположение которых различны при сравнении с данными рис. 47. Зоны повышенных концентраций различаются между собой также уровнями и максимальными значениями концентраций кислорода. В августе 1981 г. максимальное значение содержания кислорода 9,80 мг/л (76 % насыщения) было выше, чем в октябре — ноябре 1979 г. (9,14 мг/л, или 86 % насыщения), а в апреле 1985 г. 12,29 или 111 % насыщения. По средневзвешенным значениям концентраций для всей акватории моря содержание кислорода было больше в апреле 1985 г. (6,17 мг/л, или 60,1 % насыщения), нежели в августе 1981 г. (5,66 мг/л, 53 % насыщения). Размеры и формы зон, ограниченных изооксигенами 1,0 мг/л, также значительно отличались во все сравниваемые периоды. Например, в апреле 1985 г. (см. рис. 48) одна из зон пониженных концентраций кислорода простиралась почти по всей акватории моря с запада на восток, занимая очень обширную площадь; размеры же другой зоны, расположенной у Кавказского побережья, были относительно малы. Концентрация кислорода в центре этого циклона равнялась 0,73 мг/л (4 % насыщения).

Таким образом, в структуре поля кислорода на горизонте 75 м наблюдается не только сезонная, но и межгодовая динамика. С увеличением солнечной активности (внутри одного сезона, например, осенью) происходило уменьшение средневзвешенного содержания кислорода и, наоборот, с ее уменьшением (после 1979 г.) произошло увеличение его содержания. Одновременно с увеличением содержания кислорода структура его поля упростилась. Так, например, в октябре — ноябре 1985 г. (см. рис. 48) можно было выделить только две зоны пониженного содержания кислорода, ограниченных изооксигеной 1,0 мг/л, тогда как в октябре — ноябре 1979 г. их было четыре, и в трех зо-

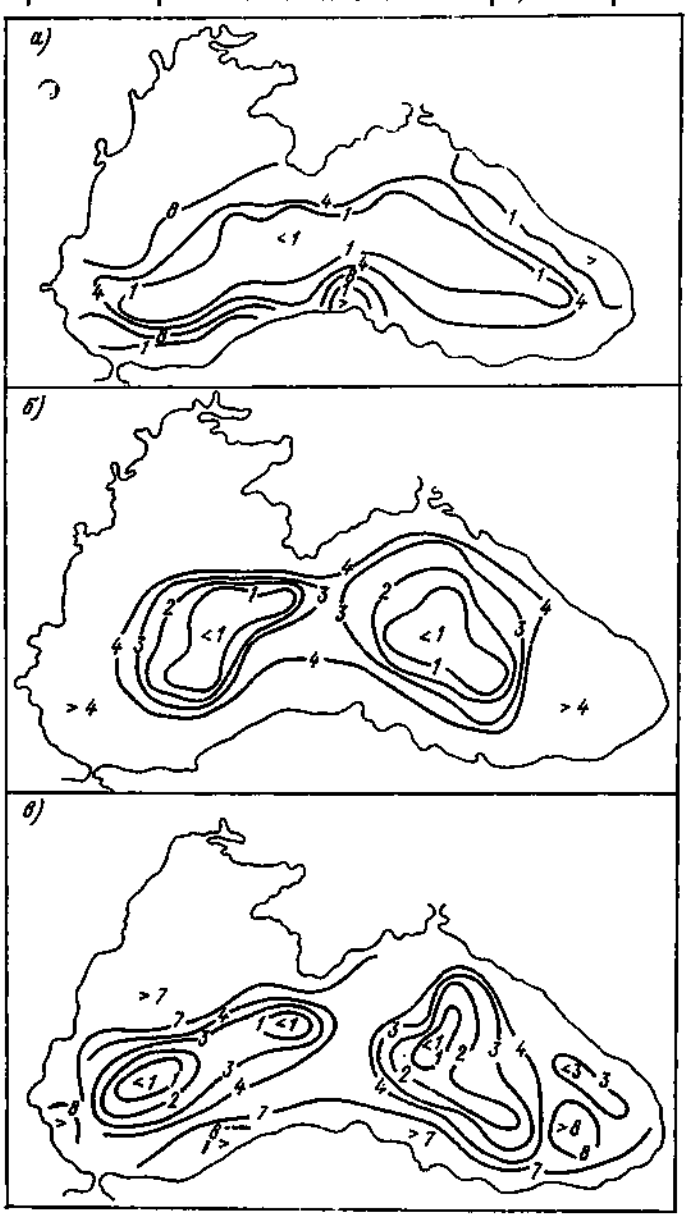

Рис. 48. Поля концентраций кислорода на горизонте 75 м в апреле (*а*) и октябре — ноябре (*б*) 1985 г., в августе 1981 г. (*в*), мг/л.

ниях концентрации кислорода были <0,7 мг/л. Средневзвешенное содержание кислорода на горизонте было больше в октябре — ноябре 1985 г. (5,64 мг/л, 52 % насыщения), нежели в октябре — ноябре 1979 г. (4,84 мг/л, 44 % насыщения).

Представленные данные позволяют сформулировать следующие выводы:

— поля концентраций кислорода изменяются от сезона к сезону;

— содержание растворенного кислорода подвержено многолетней изменчивости с цикличностью, близкой к циклам солнечной активности;

— между содержанием кислорода и физическими характеристиками морской воды (температурой, соленостью, плотностью) существует хорошая корреляционная связь, описываемая характерными уравнениями регрессии (табл. 41—43).

Коэффициенты корреляции между содержанием кислорода и соленостью воды, представленные в табл. 41, свидетельствуют, что для различных сезонов года в разных квадратах их значения были достаточно высокие и колебались от —0,6 до —0,98. В центрах восточного (квадрат 60) и центрального (квадрат 36) циклонических круговоротов коэффициенты корреляции наиболее высоки

Таблица 41

Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии между содержанием кислорода (C мг/л) и соленостью (S ‰) на горизонте 75 м в 1963—1985 гг.

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон и номер квадрата
$\lg C = 7{,}58 - 0{,}52S$	—0,73	Осень, 23, 24, 25
$\lg C = 6{,}38 - 0{,}44S$	—0,80	Лето, 23, 24, 25
$C = 147 - 110 \lg S$	—0,60	Весна, 23, 24, 25
$\lg C = 6{,}41 - 0{,}46S$	—0,68	Зима, 23, 24, 25
$C = 103{,}6 - 5{,}10S$	—0,90	Зима, 60
$C = 77{,}7 - 3{,}79S$	—0,70	Весна, 60
$C = 106{,}2 - 80{,}0 \lg S$	—0,82	Лето, 60
$C = 186 - 140 \lg S$	—0,60	Осень, 60
$\lg C = 30{,}8 - 23{,}6 \lg S$	—0,98	Зима, 36
$C^{1/2} = 13{,}78 - 0{,}62S$	—0,64	Весна, 36
$C = 81{,}4 - 17{,}7S^{1/2}$	—0,70	Лето, 36
$C^{1/2} = 14{,}22 - 0{,}60S$	—0,60	Осень, 36
$\lg C = 1{,}24 - 0{,}18S$	—0,64	Весна, лето, 21

Таблица 42

Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии между содержанием кислорода (C мг/л) и температурой воды (T °С) на горизонте 75 м в 1963—1985 гг.

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон, номер квадрата
$C = 12{,}13 - 0{,}47T$	—0,97	Весна, 60
$C = 12{,}23 - 0{,}26T$	—0,93	Зима, 36
$C = 12{,}10 - 0{,}38T$	—0,97	Лето, 36
$C = 11{,}69 - 0{,}18T$	—0,60	Осень, 36
$C = 11{,}59 - 0{,}76 \lg T$	—0,73	Весна, 21
$C = 11{,}10 - 0{,}93 \lg T$	—0,72	Лето, 21
$C = 32{,}01 - 27{,}2 \lg T$	—0,40	Год, 23, 24, 25

Таблица 43

Коэффициенты корреляции и уравнения регрессии между содержанием кислорода (C мг/л) и плотностью воды (σ_t усл. ед.) на горизонте 75 м в 1963—1985 гг.

Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Сезон, номер квадрата
$C = 106{,}9 - 6{,}79\sigma_t$	—0,85	Зима, 60
$C = 39{,}0 - 2{,}31\sigma_t$	—0,82	Лето, 60
$\sqrt{C} = 21{,}78 - 1{,}32\sigma_t$	—0,73	Весна, 60
$\sqrt{C} = 11{,}51 - 0{,}62\sigma_t$	—0,50	Осень, 60
$C^{1/2} = 24{,}5 - 1{,}47\sigma_t$	—0,78	Зима, 36
$C = 39{,}9 - 2{,}43\sigma_t$	—0,61	Весна, 36
$C = 99{,}0 - 42{,}4\sigma_t$	—0,88	Лето, 36
$C^{1/2} = 14{,}52 - 0{,}73\sigma_t$	—0,46	Осень, 36
$C^{1/2} = 3{,}18 - 0{,}02\sigma_t$	—0,30	Весна, лето, 21

зимой (—0,90...—0,98), а весной, летом и осенью —0,60...—0,82. По-видимому, на содержание кислорода на горизонте 75 м зимой значительное влияние оказывает зимняя конвекция, а в остальные сезоны года, особенно весной, оказывают процессы фотосинтеза, что в какой-то мере снижает коэффициенты корреляции в указанные сезоны года.

Хорошая корреляционная связь была обнаружена на горизонте 75 м между содержанием кислорода и температурой воды (см. табл. 42). Уравнения регрессии между содержанием кислорода и плотностью воды σ_t представлены в табл. 43. Низкие коэффициенты в квадрате 36 осенью (r = = —0,46) и в квадрате 21 (r = —0,30) объясняются, по-видимому, недостаточным числом наблюдений (<10) в этих квадратах в указанные сезоны.

Горизонт 100 м. Весной 1963—1985 гг. среднее содержание кислорода от квадрата к квадрату колебалось от 0,34 до 8,63 мг/л; максимально-разовые концентрации — от 0,53 до 10,59 мг/л; минимально разовые — от 0,06 до 5,74 мг/л. Минимальные концентрации (по средним значениям) приурочены к центрам циклонических круговоротов, а максимальные — к их периферийным участкам (рис. 49). Всего весной можно выделить четыре зоны низких содержаний кислорода: по одной в западной и центральной областях моря (квадраты 45, 46, 60 и 48, 49) и две в восточной (квадраты 38, 39 и 51, 52, 67). Среднее взвешенное содержание кислорода 3,54 мг/л.

Летом 1963—1985 гг. (рис. 49) среднее содержание кислорода от квадрата к квадрату колебалось от 0,41 до 8,17 мг/л. Минимумы его содержания приходятся на центры циклонических круговоротов в квадратах 37, 51 и 67 (восточная часть моря), 59, 60 (западная часть моря). Таким образом, по расположению изооксиген на горизонте 100 м в летний сезон можно выделить только две зоны низких содержаний кислорода (одна в восточной и частично центральной, а другая — в западной частях моря) и одну зону повышенного его содержания — в восточной части моря (напротив Сухуми).

Максимально-разовые концентрации кислорода колебались в пределах 0,61—11,80 мг/л (6—111 %

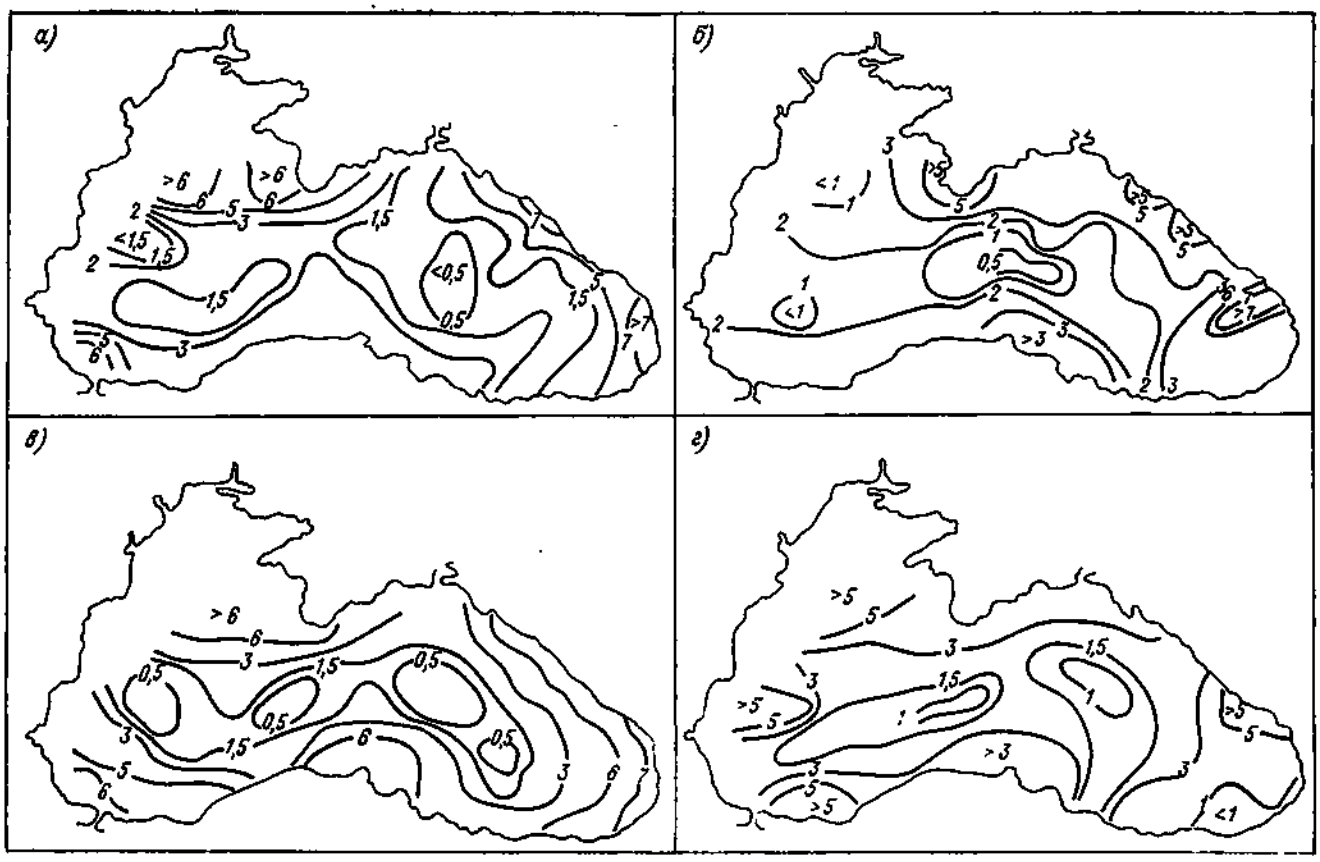

Рис. 49. Сезонные поля концентраций кислорода на горизонте 100 м в период 1963—1985 гг., мг/л.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

насыщения) в квадратах 36 и 41 соответственно, а минимально-разовые в пределах 0,18—1,37 мг/л (2—13 % насыщения) в квадратах 32 и 91.

Неравномерность и немонотонность распределения кислорода на горизонте 100 м характеризуется значительной изменчивостью его содержания в отдельных квадратах. Так, отношение максимальной концентрации к минимальной в квадрате 41 равнялось 48,6, а подобное отношение максимальной на горизонте 100 м (11,80 мг/л) к минимальной (0,18 мг/л) — 63,5. Если минимально-разовые концентрации кислорода на горизонте отличаются в квадратах в 7 раз, то максимально-разовые в 20 раз. Среднее взвешенное содержание кислорода по акватории моря летом было ниже, чем весной, и равнялось 2,64 мг/л.

Осенью (см. рис. 49) размах колебаний в содержании кислорода на этом горизонте меньше, чем летом. Так, средние концентрации колебались в пределах 0,81—8,02 мг/л (8—73 % насыщения) в квадратах 49 и 20 соответственно; максимально-разовые — от 0,91 до 9,20 мг/л (6,8—73 % насыщения) в квадратах 49 и 85; минимально-разовые — от 0,0 до 6,69 мг/л (0—55 % насыщения) в квадратах 53 и 88. В этот сезон года по расположению изооксиген можно выделить два циклонических круговорота с содержанием кислорода меньше 1 мг/л; в западной (квадраты 46—49) и в восточной (квадраты 37—49 и 66, 67, 81) частях моря. Среднее взвешенное содержание кислорода по акватории моря было ниже, чем весной, но выше летнего и достигало 3,33 мг/л.

Зимой (см. рис. 49) структура поля концентраций кислорода несколько отличается от осенней, хотя и наиболее близка к таковой, чем в остальные сезоны года. В восточной части моря сохраняется обширная зона пониженного содержания кислорода (< 1 мг/л в квадратах 26, 37—40, 51, 52 и 67, 83). В западной части моря образовались две зоны пониженного содержания кислорода (< 1 мг/л) в квадратах 32 и 59—61. Сохранилось с осени пониженное содержание кислорода в центральной части моря (квадрат 48). Среднее содержание кислорода от квадрата к квадрату колебалось в пределах 0,60—8.30 мг/л, максимально-разовые концентрации от 0,43 до 10,47 мг/л, минимально-разовые — от 0.14 до 6,73 мг/л. Среднее взвешенное содержание кислорода на горизонте 3,53 мг/л.

Несмотря на значительную изменчивость средних сезонных концентраций кислорода, свойственных каждому квадрату, пределы их колебаний в каждом сезоне за весь многолетний период 1963—1985 гг. близки между собой и, следовательно, существовала в этот период определенная внутригодовая устойчивость осредненного поля концентраций кислорода.

В период 1939—1962 гг. пределы колебаний средних концентраций растворенного кислорода, свойственные каждому квадрату и сезону, были практически теми же, что и в 1963—1985 гг.: весной 0,60—8,66, летом 0,43—7,57, осенью 0,66—9,03, зимой 0,43—7,30 мг/л.

Максимально-разовые значения концентраций кислорода: весной 1,66—10,23, летом 1,50—10,60, осенью 0,74—9,73, зимой 0,76—10,36 мг/л.

Летом 1963—1985 гг. размах максимальных концентраций кислорода (0,61—11,80) был на

2,09 мг/л больше, чем в тот же сезон 1939—1962 гг.; в зимний же период наоборот, в 1963—1985 гг. размах значений концентраций кислорода (0,60—8,34 мг/л) был на 1,8 мг/л меньше, чем зимой 1939—1962 гг.

Минимально-разовые концентрации кислорода в 1939—1962 гг. колебались в следующих пределах: весной — 0,10—8,3; летом 0,18—5,62; осенью — 0,07—8,26; зимой — 0,0—4,40 мг/л.

Верхний предел колебаний минимальных концентраций кислорода в 1939—1962 гг. был выше, чем в 1963—1985 гг.: весной на 2,54, летом на 4,24, осенью на 1,6 мг/л. Зимой в результате конвекции наблюдались достаточно высокие минимально-разовые концентрации (6,76 мг/л в квадрате 70) и в период 1963—1985 гг.

Средние квадратические отклонения концентраций от среднего во второй период были несколько выше, чем в первый. Так, например, в 1939—1962 гг. в различных квадратах они изменялись в пределах (мг/л): весной — 0,23 — 3,39; летом — 0,11—3,42; осенью — 0,28—1,61; зимой — 0,54—3,34, а в 1963—1985 г.: весной — 0,14—3,52; летом 0,68—3,04; осенью — 0,57 — 3,32; зимой — 0,20—3,69. Как правило, наибольшие значения коэффициентов вариации приходятся на квадраты, расположенные в прибрежных районах моря, а наименьшие — в центральных, что, по-видимому, связано с повышенной динамикой вод у берегов.

Таким образом, на горизонте 100 м так же, как и на горизонте 75 м, наблюдалась сезонная изменчивость в колебаниях осредненных по акватории моря концентраций кислорода. Максимальное его содержание (3,54 мг/л) было весной, минимальное (2,64 мг/л) — летом, что, по-видимому, связано как с динамикой вод в указанные периоды времени (конфигурации изооксиген на рис. 49 соответствуют системе течений на горизонте [21, 70, 94, 150]), так и с различной интенсивностью процессов фотосинтеза в различные сезоны года [69, 72, 150].

Межгодовую изменчивость содержания кислорода на горизонте 100 м целесообразно, по ранее указанным причинам, проследить по результатам ряда конкретных экспедиционных исследований.

Характерное распределение растворенного кислорода для осеннего периода (ноябрь — декабрь 1974 г.) представлено на рис. 50. По распоряжению изооксиген 0,07 мг/л можно выделить две зоны низких содержаний кислорода: одна в западной части моря, другая — в восточной (минимум концентрации кислорода — в центре восточной части моря 0,27 мг/л, или 3 % насыщения). К периферии моря содержание кислорода возрастало и достигло максимума 8,54 мг/л (81 % насыщения) в прибосфорском районе моря. Минимальным значениям содержания кислорода соответствовали повышенные значения солености (20,3—20,8 ‰) и температуры (8,4—8,6 °С), что свидетельствует о подъеме вод в указанных зонах. Среднее взвешенное содержание кислорода на горизонте по всей акватории моря 3,39 мг/л (32 % насыщения) близко к осредненному за весь осенний период 1963—1985 гг. (3,33 мг/л).

Ровно через два года, в ноябре — декабре 1976 г. (см. рис. 50), структура поля несколько усложнилась. По распоряжению изооксиген 0,7 мг/л можно выделить уже три циклонических круговорота: один в западной части моря и частично

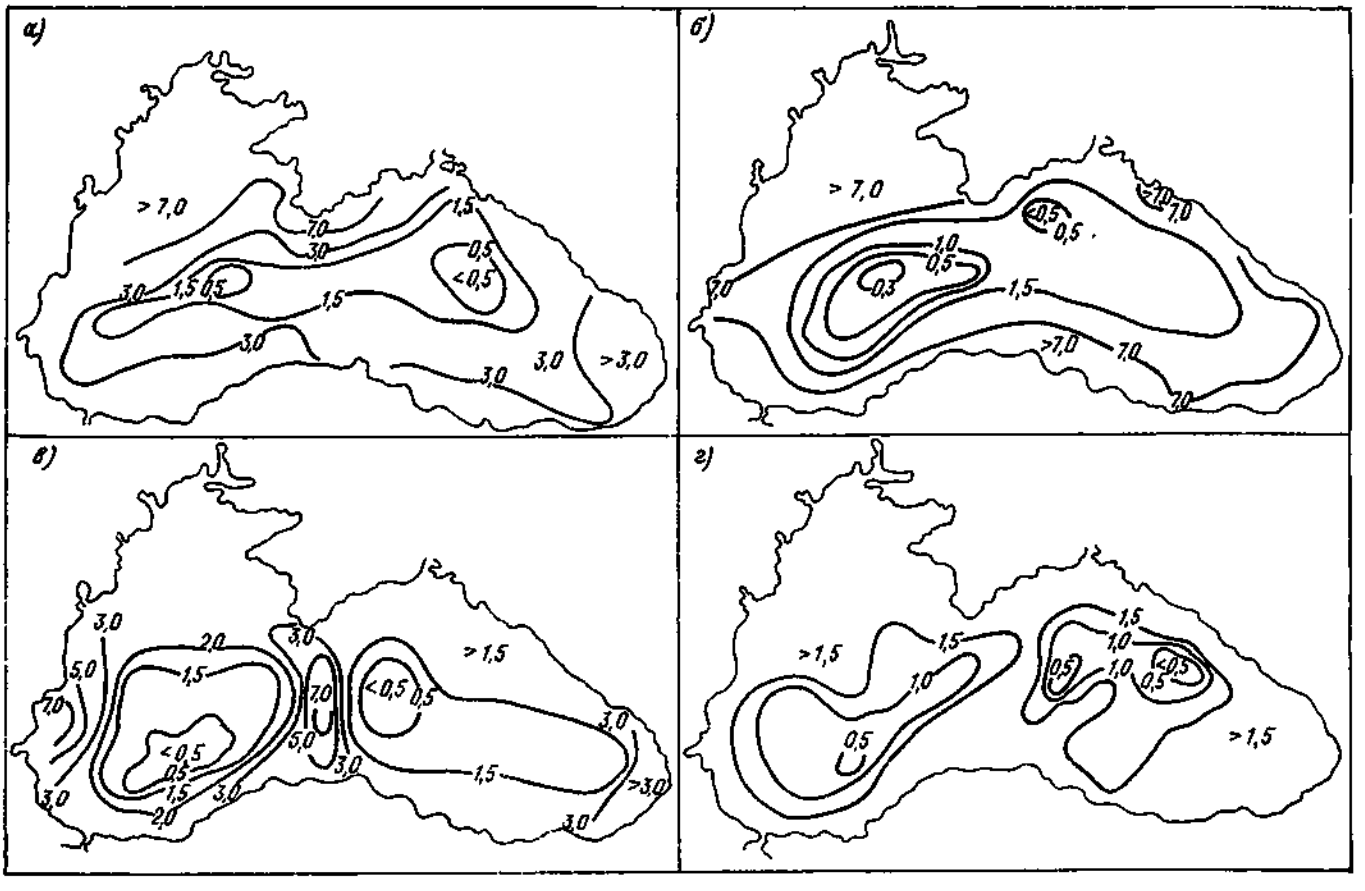

Рис. 50. Поля концентраций кислорода на горизонте 100 м,мг/л.

а — ноябрь — декабрь 1971 г.; *б* — апрель 1976 г.; *в* — январь — февраль 1976 г.; *г* — ноябрь — декабрь 1976 г.

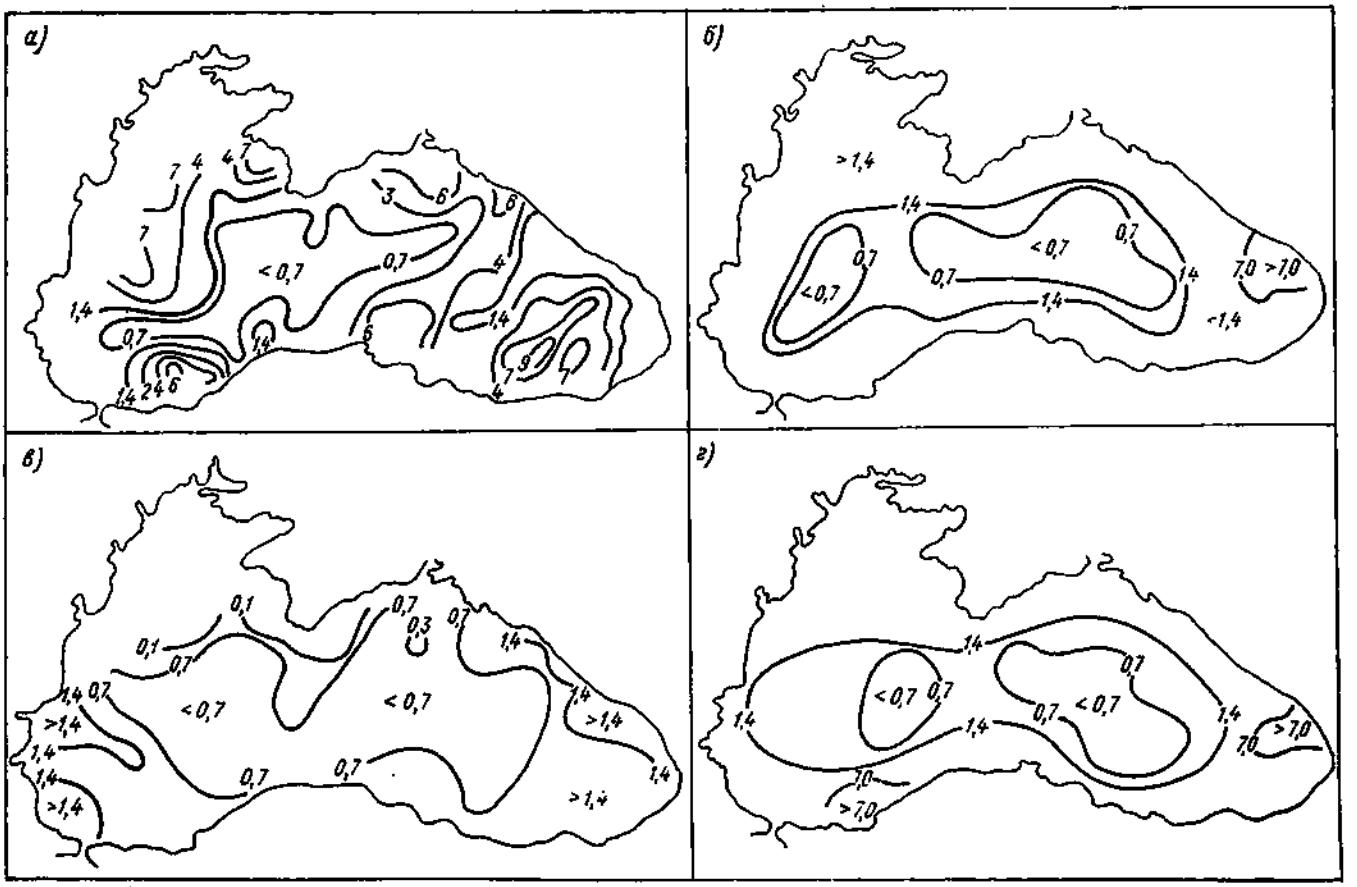

Рис. 51. Поля концентраций кислорода на горизонте 100 м, мг/л.
а — октябрь — ноябрь 1977 г.; *б* — май 1981 г.; *в* — октябрь — ноябрь 1979 г.; *г* — сентябрь 1981 г.

центральной, два других — в восточной. Минимум содержания кислорода — 0,27 мг/л (2,7 % насыщения) — в западной части моря. К периферии моря концентрации кислорода, как и в 1974 г., возрастали, достигая максимума 8,37 мг/л (79,3 % насыщения). Однако у Анатолийского побережья наблюдались пониженные концентрации кислорода (1,20—1,21 мг/л, 12 % насыщения). Среднее взвешенное содержание кислорода по акватории моря 1,43 мг/л (14 % насыщения). Это одно из самых низких средних содержаний кислорода на горизонте в осенний период.

Зимой и весной этого же года (см. рис. 50) средний уровень концентраций кислорода был выше (2,97 и 4,64 мг/л, или 30 и 44 % насыщения соответственно), а структура его поля менее сложна. В обоих частях моря наблюдалось только по одному циклоническому круговороту с содержанием кислорода в их центрах менее 0,7 мг/л. Зимой 1974 г. область повышенных концентраций кислорода (>7,0 мг/л), как бы «антициклонов», наблюдалась в центральной части моря и у болгарского побережья напротив Варны.

В октябре — ноябре 1977 г. (рис. 51) зона с пониженным содержанием кислорода (<0,7 мг/л) занимала обширное пространство в восточной, центральной и западной частях моря. В восточной части моря напротив м. Нерос наблюдались рядом циклон и антициклон. В центре циклона содержание кислорода 1,14 мг/л (10 % насыщения), а в центре антициклона — 9,40 мг/л (91 % насыщения), среднее взвешенное же содержание кислорода по акватории моря составляло 2,80 мг/л (27 % насыщения) и было ниже осредненного за осенний период 1963—1985 гг. (3,33 мг/л).

В последующие годы средний уровень концентраций кислорода на горизонте продолжал понижаться, например, в 1979 г. (рис. 51). В весенне-летний период 1981—1982 гг. понизился с 2,70 и 2,29 мг/л (26 и 23 % насыщения) в мае и сентябре 1981 г. соответственно до 1,51 мг/л (15 % насыщения) в апреле 1982 г. (рис. 52). Отличительной особенностью этих полей является то, что почти на всей акватории открытой части моря концентрации кислорода не превышали 1,4 мг/л и лишь у берегов его содержание было выше и колебалось от 1,30 до 6,30 мг/л (18—85 % насыщения) в мае 1981 г.; от 1,35 до 7,67 мг/ (17—73 % насыщения) в сентябре того же года и от 1,64 до 10,43 мг/л (12—96 % насыщения) в апреле 1982 г. Другой особенностью полей концентраций кислорода в мае и сентябре 1981 г. было то, что в центрах циклонических круговоротов в эти месяцы его содержание снижалось до 0,07—0,10 мг/л (1,0 % насыщения).

Самый низкий средний уровень содержания кислорода по всей акватории моря (1,16 мг/л, 10,8 % насыщения) наблюдался в июле — сентябре 1984 г. (см. рис. 52). По всей открытой части моря концентрации кислорода не превышали 1,0 мг/л (14 % насыщения) и лишь у берегов Крыма и Кавказа его содержание колебалось от 1,46 до 5,52 мг/л (14—53 % насыщения). Почти всю западную глубоководную часть моря, половину центральной и восточной части моря занимала зона пониженных концентраций кислорода

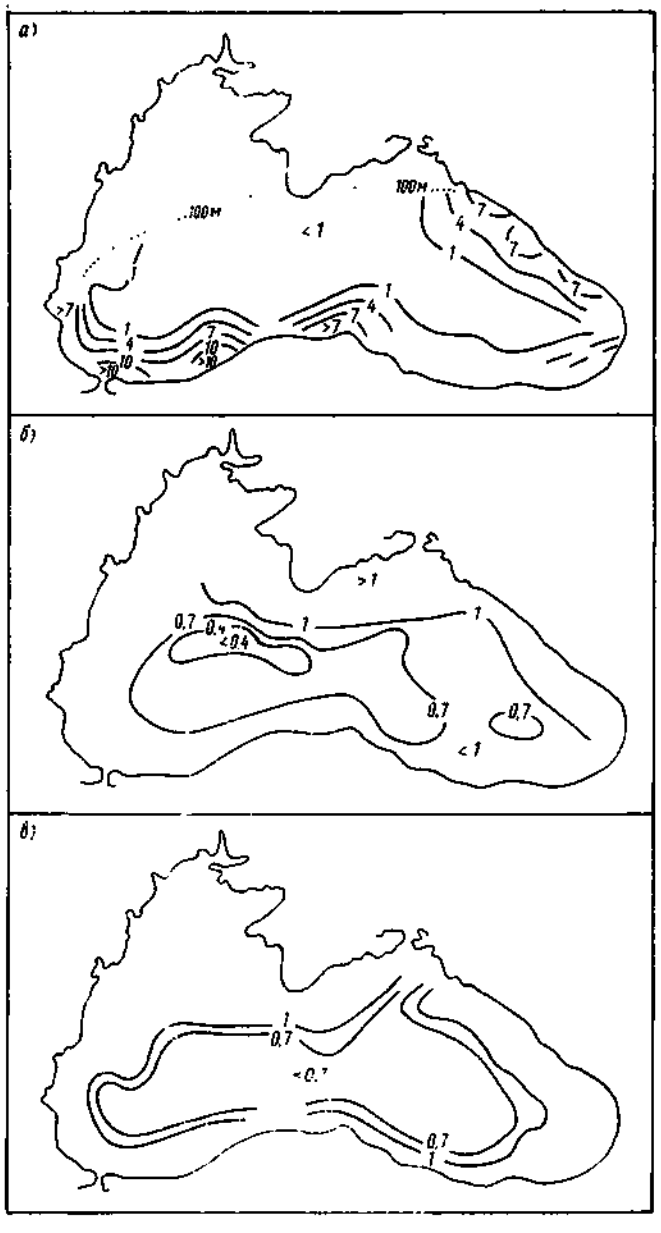

Рис. 52. Поля концентраций кислорода на горизонте 100 м, мг/л.
а — апрель 1982 г.; *б* — июль — сентябрь 1984 г.; *в* — апрель 1985 г.

(<0,7 мг/л). В восточной части моря напротив Батуми располагался второй циклонический круговорот, в центре которого содержание кислорода было 0,56 мг/л (5 % насыщения). По центру моря узкой полосой с запада на восток простиралась зона с содержанием кислорода менее 0,4 мг/л с минимумом 0,18 мг/л (2 % насыщения) в западной части моря.

К апрелю 1985 г. (см. рис. 52) средний уровень концентраций кислорода несколько повысился по сравнению с апрелем 1982 г., был выше, чем в 1984 г., и достигал 3,33 мг/л (30,9 % насыщения). Однако и в апреле 1985 г. в открытой части моря обширную площадь занимала зона пониженного содержания кислорода (менее 0,7 мг/л, или 4—7 % насыщения). У берегов Кавказа и Анатолийского побережья концентрация кислорода колебалась в широких пределах: 0,43—10,57 мг/л (4—96 % насыщения).

Таким образом, из представленных данных можно сделать вывод, что изменчивость содержания кислорода на горизонте 100 м велика как в пространстве, так и во времени. Однако пределы колебаний как средних, так и экстремальных концентраций кислорода близки между собой в отдельные годы, что свидетельствует об определенной степени устойчивости содержания кислорода на горизонте. Для подтверждения вышесказанной

Таблица 44

Содержание кислорода на горизонте 100 м

Год	Среднее	Минимальное	Максимальное
1960	4,26/41	0,31/4	9,73/94
1961	3,95/38	0,56/6	9,69/94
1962	3,57/34	0,57/6	9,33/93
1963	4,57/—	—	—
1964	4,57/55	0,50/5	9,26/92
1965	4,46/45	0,53/5	8,67/86
1966	4,99/43	0,50/4	10,46/102
1967	4,29/36	0,28/3	9,56/92
1968	4,30/40	0,26/3	9,42/93
1969	3,96/38	0,26/3	9,70/93
1970	5,07/50	0,27/3	10,32/99
1971	4,34/42	0,56/6	9,17/90
1972	6,90/62	0,53/5	10,00/97
1973	4,09/42	0,08/1	8,80/94
1974	3,26/30	0,11/1	8,54/81
1976	2,90/26	0,20/2	9,73/93
1977	2,87/25	0,18/2	9,40/91
1979	2,99/30	0,08/1	9,13/87
1980	3,03/34	—	—
1981	2,72/28	0,07/1	9,00/85
1982	2,87/33	0,28/3	10,43/96
1984	2,34/22	0,18/2	5,52/53
1985	2,72/24	0,43/4	10,50/96

Примечание. Числитель — концентрация кислорода, мг/л; знаменатель — процент насыщения.

мысли в табл. 44 приведена межгодовая изменчивость содержания кислорода на горизонте 100 м в 1960—1985 гг., из которой видно, что среднегодовое содержание кислорода на горизонте 100 м колебалось от 2,34 мг/л (22 % насыщения) в 1984 г. до 6,90 мг/л (62 % насыщения) в 1972 г.; минимальное — от 0,07 мг/л (1 % насыщения) в 1981 г. до 0,57 мг/л (6 % насыщения) в 1962 г. и максимальное — от 5,52 мг/л (53 % насыщения) в 1984 г. до 10,50 мг/л (96 % насыщения) в 1985 г. Следует отметить, что в 1966 г. на одной из станций у Крымского побережья наблюдалось самое высокое насыщение кислородом (102 %) на горизонте 100 м за весь рассматриваемый период наблюдений. В изменчивости средних и экстремальных концентраций кислорода выявляется некоторая межгодовая периодичность: уменьшение их в годы роста солнечной активности (1969, 1977—1981), а в годы уменьшения солнечной активности (1963—1966, 1970—1972) [101] наблюдался их рост.

Данные табл. 45 свидетельствуют о том, что на станциях, на которых содержание кислорода было меньше 1,4 мг/л, как правило, обнаруживался сероводород. Однако на отдельных станциях, расположенных в основном на периферии моря, «следовые» концентрации сероводорода (<0,08—0,29 мг/л) обнаруживались при высоких значениях содержания растворенного кислорода (4,75—11,20 мг/л).

В районах обнаружения сероводорода весьма существенно колебалось содержание растворенного

го кислорода (<0,07—10,56 мг/л). Применение корреляционного анализа не дало возможности выявить устойчивую зависимость между средними концентрациями сероводорода и растворенного кислорода как по результатам отдельных экспедиций, так и по средним значениям для отдельных районов. Вместе с тем для ряда отдельных конкретных случаев (на отдельных станциях и районах в отдельных экспедициях) наблюдалась обратная зависимость между содержанием сероводорода и растворенного кислорода. Например, в период 1964—1966 гг. наблюдалось уменьшение содержания растворенного кислорода на «вековом» разрезе м. Херсонес — прол. Босфор при одновременном росте концентраций сероводорода.

В районах совместного обнаружения растворенного кислорода и сероводорода были значительны и колебания температуры воды 6,19—9,90 °С за весь период наблюдений. Как правило, высоким концентрациям сероводорода и низким значениям содержания кислорода соответствовали высокие значения температуры воды. Коэффициенты корреляции для сероводорода 0,63 и для кислорода —0,60, а уравнения регрессии имели вид:

$$\lg C_{H_2S} = 11{,}55 \lg T - 11{,}81;$$

$$C_{O_2} = 72{,}59 - 8{,}90T,$$

Таблица 45

Некоторые гидрохимические характеристики на станциях, воды которых содержали сероводород в период 1964—1986 гг. на горизонте 100 м

Дата	O_2 мг/л	H_2S мг/л	$pH_в$
V 1964	0,50	0,11	7,82
VIII 1964	2,47—2,86	< 0,08—0,24	8,11—8,37
XI 1964	2,74—9,53	0,08—0,56	6,67—8,44
V 1965	—	< 0,08—0,33	—
VIII 1965	0,28; 1,74	< 0,08	7,94; 8,01
XI 1965	—	0,14	8,31
III 1966	0,60—5,16	< 0,08—0,35	8,02—8,34
V 1966	1,23	0,12	8,07
IX 1966	1,27—4,47	0,26—1,37	8,00—8,30
II 1968	0,34—8,79	< 0,08—0,23	—
VIII 1968	0,67—10,26	0,12—1,22	8,01—8,41
II 1969	0,14—9,52	< 0,08—1,05	8,02—8,42
V 1969	0,43—8,59	0,08—0,38	7,80—8,41
VIII 1969	0,41—6,49	0,08—0,53	8,17—8,46
XI 1969	1,41—6,50	0,08—0,91	8,12—8,28
III 1970	0,80—2,86	0,12—0,29	8,26—8,27
VIII 1970	1,83—8,27	0,11—0,47	8,02—8,45
VIII 1971	0,81—4,66	< 0,08—0,18	7,87—8,21
II 1972	0,90—9,86	< 0,08—0,17	8,01—8,56
VII 1972	8,79	< 0,08	8,44
XI 1972	1,81	< 0,08, 0,14	7,84; 7,87
III 1973	0,27	< 0,08	—
X 1973	0,28—2,82	< 0,08—0,15	7,80—8,17
XI 1973	—	< 0,08	8,03
II 1974	0,14—1,23	< 0,08—0,15	7,93—8,10
IV 1974	0,83—3,02	< 0,08—0,47	7,82—8,04
XI 1974	0,91—8,54	0,08—1,31	7,75—8,22
V 1975	0,38—8,07	0,08—0,17	7,75—8,49
VII—VIII 1975	0,27—4,21	0,08—0,24	—
IV 1976	0,37—9,90	0,08—0,30	—
IX 1976	—	0,08—0,52	—
II 1977	—	0,14	—
IV 1977	0,06—9,19	< 0,08—0,53	—
VIII 1977	0,24—7,52	< 0,08—0,30	—
XI—XII 1977	—	0,08—1,20	—
VI—VIII 1978	0,14—10,56	0,08—0,77	—
II 1979	0,27—2,21	0,08—0,38	—
IX 1979	0,13—4,34	0,08—1,53	—
XI—XII 1979	0,33—5,74	0,08—0,76	—

Продолжение табл. 45

Дата	O_2 мг/л	H_2S мг/л	$pH_в$
XII 1980	0,26—0,71	0,08—0,15	—
V 1981	0,10—2,00	0,08—0,49	—
VII 1981	0,14—5,57	0,08—0,35	—
VII 1982	0,07—2,23	0,08—0,73	—
XI 1982	0,44—7,29	0,08—0,42	—
IV—V 1983	0,44—8,09	0,08—0,26	—
VII 1983	0,21—3,50	0,08—0,46	—
VII 1984	0,18—1,86	0,08—0,53	—
IX 1984	1,30; 2,13	0,09; 0,18	—
I—II 1985	0,43—2,43	0,08—0,30	—
IV 1985	0,43—0,64	0,09—0,35	—
XI 1985	0,43—2,79	0,08	—
II 1986	0,71—1,50	0,08—0,23	—

где C_{H_2S} — концентрация сероводорода, мг/л; C_{O_2} — концентрация кислорода, мг/л; T — температура воды, °С.

Для районов моря, где обнаруживалось присутствие сероводорода, была свойственна также изменчивость солености в пределах 18,22—21,62 ‰.

Прослеживается зависимость роста концентраций сероводорода и уменьшение содержания кислорода с повышением солености вод. Например, на многосуточной станции 24 ноября — 4 декабря 1977 г. коэффициент корреляции 0,65, а уравнение регрессии имело вид

$$C = 37{,}12 - 1{,}77S,$$

где C — концентрация растворенного кислорода, мг/л; S — соленость воды, ‰.

Колебания условной плотности воды в районах, содержащих растворенный кислород и сероводород, за весь период наблюдений 14,20—16,60 усл. ед. Значимая корреляция между средними концентрациями кислорода, сероводорода и условной плотности не выявлена. Вместе с тем при рассмотрении отдельных экспедиционных наблюдений в ряде случаев прослеживается зависимость уменьшения содержания кислорода, роста концентраций сероводорода с повышением условной плотности.

По данным наблюдений за водородным показателем pH в период по 1975 г. видно (см. табл. 45), что на горизонте 100 м значения pH менялись весьма существенно (6,67—8,44). Корреляционные зависимости между содержанием растворенного кислорода и pH по предоставленному массиву наблюдений (табл. 45) не выявлены.

Горизонт 150 м. Средние концентрации растворенного кислорода в квадратах, как правило, не превышали 1 мг/л. Исключение составляли квадраты 23 и 24, расположенные у берегов Крыма, 28 и 41 — у берегов Кавказа, 64, 80, 81, 85 и 94— у Анатолийского побережья, 73 и 74 — в прибосфорском районе моря, в которых средние концентрации кислорода весной 1963—1985 гг. были > 1,0 мг/л, а в квадрате 23 достигали 5,57 мг/л (26 % насыщения). Минимумы средних концентраций кислорода (0,06—0,20 мг/л, или 0,5—2 % насыщения) приходились на центры циклонических круговоротов (квадраты 45, 37, 51). Максимально-разовые концентрации кислорода весной колебались от 0,27 мг/л (квадрат 36) до 10,20 мг/л (квадрат 58), что соответствует 3 и 96 % насыщения, а минимально-разовые — от 0,0 до 1,03 мг/л

(квадрат 24), что не превышает 10 % насыщения.

Летом средние значения концентраций кислорода были несколько ниже, чем весной, и от квадрата к квадрату колебались от 0,07 мг/л (квадраты 46, 59, 58) до 1,94 (квадраты 23, 32, 33). Максимально-разовые (0,16—8,14 мг/л), так и минимально-разовые концентрации кислорода (0,0—0,67 мг/л) ниже, чем в остальные сезоны года. Так, зимой эти значения колебались соответственно в пределах 0,06—9,94 мг/л и 0,0—1,20 мг/л при средних в квадратах 0,03—2,89 мг/л, а осенью — 0,33—7,73 мг/л и 0,0—0,64 мг/л при средних 0,17—2,49 мг/л.

Неравномерность и немонотонность распределения кислорода на горизонте 150 м характеризуется существованием зон повышенных и пониженных его содержаний. Зонам повышенных содержаний кислорода соответствуют повышенные средние квадратические отклонения (1,8—3,40 мг/л). Например, в весенний сезон такое положение наблюдалось в квадратах 23, 41, 58, 74; в летний — в квадратах 24, 25, 38; в осенний в квадратах 27, 58, 74; в зимний в квадратах 23, 25, 27, 41, 74. Максимально-разовые концентрации кислорода в них на порядок выше, чем в квадратах с пониженным средним квадратическим отклонением (0,07—0,28 мг/л). Последние приходятся на центры циклонических круговоротов (квадраты 46—48, 59, 60 в западной части моря и 68 — в восточной для весеннего и летнего сезонов; квадраты 26, 36, 37, 48, 52, 62—64, 67, 70 — для осеннего и квадраты 46, 48, 51, 53, 59, 60, 68 — для зимнего сезонов). Пространственно-временная изменчивость содержания кислорода на горизонте 150 м по сравнению с его изменчивостью в слое 0—50 м сравнительно высока.

Характерно, что на станциях с содержанием растворенного кислорода 1,4 мг/л, как правило, обнаруживался и сероводород.

Временная изменчивость появления растворенного кислорода в районах, расположенных между зонами повышенных концентраций, более значительна по сравнению с периферийными районами анаэробных вод, в которых плотность расположения станций, содержащих только растворенный кислород, выше (табл. 46). Только растворенный кислород особенно часто обнаруживается в прибосфорском районе и в водах, прилегающих к Крыму. Расположение этих станций подтверждает куполообразное строение изооксиген [150] и свидетельствует о том, что в этот период среднее положение куполов было выше в западной и центральной областях моря, чем в восточной. По данным табл. 46 содержание растворенного кислорода в 1973—1978 гг. на горизонте 150 м колебалось от 0,10 до 8,03 мг/л, значение солености — 18,63—21,39 ‰, а температуры воды — 7,38—8,88 °С. Наиболее высокие значения концентраций растворенного кислорода (8,03 мг/л) и температуры воды (8,88 °С) наблюдались в прибосфорском районе, а наиболее высокая соленость (21,39 ‰) и низкая температура (7,45 °С) вод с высоким содержанием растворенного кислорода (6,34 мг/л) — в центре восточного циклонического круговорота в октябре 1977 г. Наиболее низкая соленость (18,68 ‰) и температура воды (7,39 °С) наблюдались у Керченского пролива в октябре 1977 г., что можно объяснить поступлением распресненных холодных

Таблица 46

Некоторые гидролого-гидрохимические характеристики на станциях, воды которых не содержали сероводород на горизонте 150 м в период 1973—1986 гг.

Дата	O_2 мг/л	S ‰	T °С
III 1973	2,57	20,16; 20,42	8,15; 8,42
X—XI 1973	—	20,80—21,52	8,55—8,88
I—II 1974	0,16—2,16	20,17—21,04	8,41—8,70
IV 1974	0,36	20,82	8,52
XI 1974	0,17—5,84	20,08—21,06	8,00—8,75
III 1975	0,38—6,03	19,67—20,61	7,95—8,71
V—VI 1975	0,50—2,11	20,03—21,06	8,22—8,60
VIII—IX 1976	0,10—2,56	20,08—21,40	8,25—8,68
XI 1976	0,28	20,08	8,58
X—XI 1977	0,40—5,44	19,40—20,92	7,62—8,52
X—XI 1977	0,08—7,73	18,68—21,39	7,38—8,64
VIII 1978	0,14—8,03	18,77—21,23	7,96—8,72
II 1979	0,30—8,09	18,86—21,12	7,54—8,62
IX 1979	0,07—0,64	20,36—21,14	8,03—8,67
XI—XII 1979	0,33—2,17	20,36—21,11	8,00—8,69
XII 1980	0,21—6,50	18,88—21,44	7,39—8,67
II 1981	0,86	20,41	8,30
V 1981	0,43—2,44	19,69—20,99	8,00—8,57
VII 1982	—	19,62—20,65	8,35—8,53
X—XI 1982	0,34—1,40	18,94—21,06	7,34—8,97
III 1983	0,40—0,68	20,32—21,58	7,28—8,73
VII 1983	0,40—3,43	19,84—21,08	8,16—8,60
VII 1984	—	20,95—21,09	8,53—8,57
IX 1984	0,41; 0,74	20,40; 20,54	8,79; 8,87
I 1985	0,36; 0,43	20,48; 20,82	8,54; 8,63
IV 1985	0,28—2,80	19,38—21,48	7,97—8,49
X—XI 1985	0,28—1,29	19,80—21,02	8,02—8,55
II 1986	0,50—0,81	20,53—20,84	8,45—8,58

азовских вод через Керченский пролив. Наиболее высокое содержание растворенного кислорода (8,09 мг/л), низкая соленость (18,85 ‰) и температура воды (7,54 °С) наблюдались в феврале 1979 г. Летом же этого года (в сентябре) концентрации растворенного кислорода на горизонте 150 м колебались от 0,07 до 0,64 мг/л, солености — от 20,35 до 21,14 ‰, а температуры воды — от 8,03 до 8,67 °С. Такое состояние формируется, очевидно, под влиянием активной зимней конвекции вод. Максимальные концентрации растворенного кислорода приходятся на 1978—1980 гг., соответствующие пику солнечной активности [101, 120]. Значительное содержание растворенного кислорода (5,84 мг/л) в апреле 1974 г. наблюдалось лишь в прибосфорском районе моря и связано с проникновением сюда средиземноморских вод. Это предположение подтверждается и наличием высоких значений солености (21 ‰) и температуры воды (8,75 °С) по сравнению с водами других станций, на которых содержание растворенного кислорода не превышало 1,53 мг/л.

В августе 1978 г. высокое содержание кислорода (8,03 мг/л) в западной части моря сформировалось, очевидно, под воздействием поверхностных вод, так как пробы воды имели низкие значения солености (18,77 ‰) и температуры (7,96 °С) по сравнению с водами других станций, в которых соленость составляла 20,45—21,23 ‰ и температура — 8,24—8,72 °С.

В феврале 1979 г. высокая концентрация растворенного кислорода (8,09 мг/л) наблюдалась в прикрымском районе моря, где соленость 18,36 ‰, температура 7,54 °С, т. е., очевидно, происходил процесс опускания поверхностных вод. Низкие уровни концентраций растворенного кислорода,

наблюдавшиеся в 1979 г. (0,07—1,43 мг/л) определялись относительно высоким содержанием сероводорода (0,46—2,28 мг/л) на этом горизонте [102, 138]. Максимальная концентрация растворенного кислорода (6,50 мг/л), а также минимальные значения солености (18,88 ‰) и температуры воды (7,39 °С) наблюдались в декабре 1980 г. в прикрымском районе моря, что, очевидно, свидетельствует о протекании здесь процессов опускания вод.

С 1981 по 1986 г. (см. табл. 46) максимальные концентрации растворенного кислорода на горизонте 150 м снизились и в феврале 1986 г. не превышали 0,81 мг/л в западной части моря у Анатолийского побережья. Между содержанием растворенного кислорода и сероводорода на горизонте 150 м существует хорошая корреляция ($r = -0{,}7$), описываемая уравнением регрессии

$$\lg C_{O_2} = 0{,}76 - 3{,}28 C_{H_2S},$$

где C_{O_2} — концентрация растворенного кислорода, мг/л; C_{H_2S} — концентрация сероводорода, мг/л.

Наличие такой зависимости существенно отличает состояние поля растворенного кислорода на горизонте 150 м от его состояния на горизонте 100 м. Причины таких различий лежат, по-видимому, в различиях между степенями динамики вод на обоих горизонтах и в различиях между значениями концентраций сероводорода на этих горизонтах. По тем же причинам на горизонте 150 м не удалось получить корреляционных зависимостей между средними концентрациями растворенного кислорода и физическими характеристиками воды (температура, соленость, плотность) по акватории моря.

Однако на многосуточной станции, расположенной в прикрымском районе моря 24 ноября — 4 декабря 1977 г. [137] наблюдалась хорошая корреляция ($r = -0{,}67$) между содержанием растворенного кислорода и соленостью воды, а уравнение регрессии имело вид

$$C = 21{,}79 - 1{,}03S,$$

где C — концентрация растворенного кислорода, мг/л; S — соленость воды, ‰.

Хорошая корреляция ($r = -0{,}64$) была и с температурой воды:

$$C = 11{,}02 - 1{,}26T,$$

где T — температура воды, °С.

Горизонт 200 м. На этом горизонте растворенный кислород присутствует совместно с сероводородом и в основном на периферии моря. В центрах циклических круговоротов кислород, как правило, отсутствует. Так, весной в 1939—1962 гг. он не был обнаружен в квадратах 27, 31, 33, 49, 50, 53. В остальных квадратах его среднее содержание колебалось от 0,08 до 0,90 мг/л. Максимально-разовые концентрации кислорода колебались от 0,18 до 4,00 мг/л, а минимально-разовые были равны нулю за исключением квадратов 17, 36, 40, 64 и 66, в которых они колебались от $<0{,}07$ до 0,41 мг/л.

В летний сезон в 1939—1962 гг. в отдельных квадратах (25, 30, 36, 41—43, 47, 48, 63) растворенный кислород также не обнаруживался на горизонте 200 м, а в остальных квадратах его среднее содержание колебалось практически в тех же пределах, что и весной ($<0{,}07$—0,63 мг/л). Минимально-разовые концентрации кислорода были равны нулю за исключением квадратов 16, 18, 21 и 56, в которых они были близки к 0,04—0,33 мг/л.

В осенний сезон структура поля концентраций растворенного кислорода мало отличалась от структуры поля, характерной для летнего и весеннего сезонов. Среднее содержание кислорода колебалось от «не обнаружено» (квадраты 21, 33, 36, 45) до 2,84 мг/л (квадрат 65). В подавляющем большинстве квадратов минимально-разовые концентрации кислорода были равны нулю, кроме квадратов 18, 28, 52, 63, 65, в которых они колебались от 0,07—1,67 мг/л. Максимально-разовые концентрации кислорода колебались по акватории моря в пределах 0,14—4,19 мг/л. Столь высокое содержание кислорода (4,19 мг/л) в восточной части моря (квадрат 65) на горизонте 200 м объясняется существованием здесь антициклонического круговорота в это время года.

В зимний сезон 1939—1962 гг. лишь в шести квадратах (33, 34, 42, 49, 50, 63) кислород не обнаруживался, в других же квадратах его среднее содержание колебалось от 0,04 до 6,14 мг/л. Высокое содержание кислорода (6,14 мг/л) на горизонте 200 м было зафиксировано только в квадрате 21, расположенном напротив Керченского пролива. Поступление сильно охлажденных (до 2—4 °С), богатых кислородом вод Азовского моря в Черное, по-видимому, может объяснить это явление. Минимально-разовые концентрации кислорода в подавляющем числе квадратов равнялись нулю за исключением квадратов, 17, 19, 21, 43, 48, 52, 54, 55, 56, 16, 62, 66, в которых они колебались от $<0{,}07$ до 2,59 мг/л. Максимально-разовые концентрации варьировали в широких пределах: 0,11—9,72 мг/л с максимумом в квадрате 21. Относительно высокие концентрации, как средняя (1,31 мг/л), так и максимальная (9,06 мг/л), наблюдались в квадрате 66 (напротив Батуми), что, по-видимому, связано с перемещением осеннего антициклонического вихря из квадрата 65 в квадрат 66 зимой.

Из рис. 53, содержащего осредненные сезонные содержания кислорода на горизонте 200 м в 1963—1985 гг., видно, что весной в большинстве квадратов центральной и восточной частей моря кислород не обнаруживался. В прикрымской области, у берегов Кавказа и у Анатолийского побережья западной и восточной частей моря его среднее содержание колебалось от 0,07 до 0,64 мг/л. В центре западного циклонического круговорота (квадраты 58 и 60) кислород в указанный период практически не обнаруживался, а в квадратах 34, 46, 61 его среднее содержание равнялось 0,26 мг/л.

Летом 1963—1985 гг. (см. рис. 53) кислород обнаруживался лишь в прикрымском, прибосфорском и прикерченском районах моря, а также у берегов Кавказа, а его среднее содержание в этих районах моря колебалось от 0,14 до 0,86 мг/л. По всей остальной акватории моря оно было практически близко к нулю.

Осенью 1963—1985 гг. (см. рис. 53) наблюдалось заметное увеличение средних концентраций кислорода, которые от квадрата к квадрату колебались от 0,01 мг/л в центре моря до 1,11 мг/л у берегов Кавказа напротив Пицунды. В центре восточной части моря (квадраты 39, 40, 53, 68) его среднее содержание было близко к нулю.

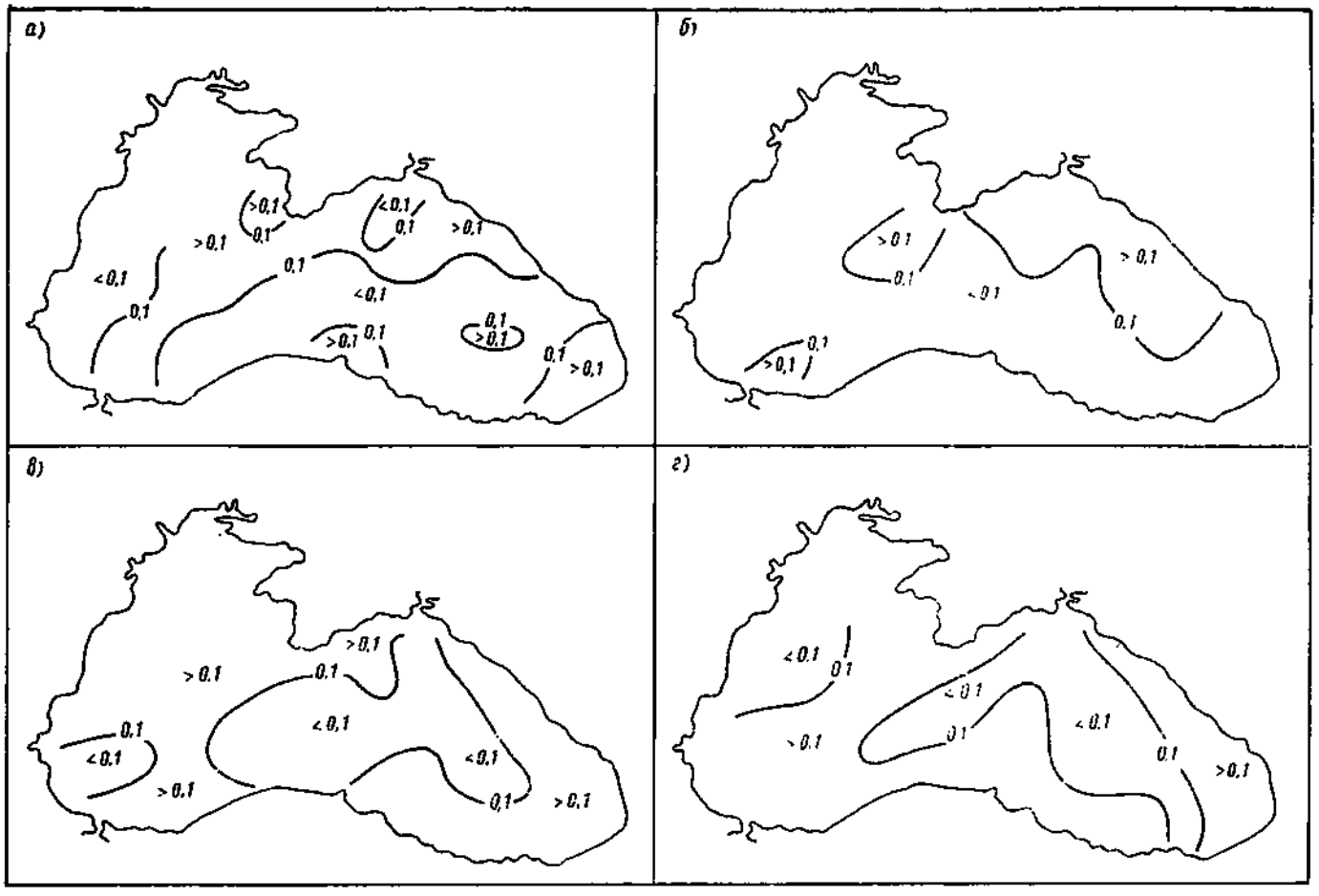

Рис. 53. Сезонные поля концентраций кислорода на горизонте 200 м в период 1963—1985 гг., мг/л.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

Зимой 1963—1985 гг. в отдельных районах моря происходит увеличение среднего содержания кислорода по сравнению с осенью, например, в прибосфорском районе до 1,39 мг/л, а в других — уменьшение до нуля в центральных районах моря и до 0,10 мг/л у берегов Кавказа напротив Сухуми и Пицунды.

Среднее содержание кислорода в периоды 1939—1962 гг. и 1963—1985 гг. соотносятся между собой соответственно: весной — 1,8, летом — 1,0, осенью — 1,4, зимой — 1,8.

Размах средних квадратических отклонений кислорода в квадратах свидетельствует о более высокой динамике вод во второй период, чем в первый. Особенно заметно это зимой: 0,07—2,83 мг/л — в первый и 0,07—3,36 мг/л — во второй. Весной второго периода кислород не обнаруживался в 14 квадратах, а в остальных средние квадратические отклонения колебались от 0,07 до 0,96 мг/л против 0,07—0,99 мг/л в первом; осенью — 0,026—1,26 мг/л против 0,07—0,51 мг/л; летом — 0,11—0,94 мг/л во втором против 0,07—0,90 мг/л в первом.

Тренды содержания кислорода в 1960—1986 гг. Тренды для концентраций кислорода (угловые коэффициенты и размах, критерии Фишера) на горизонтах 0—0,5, 10, 25, 50, 75, 100 и 150 м для разных сезонов 1960—1986 гг. представлены в табл. 47 для ряда квадратов. Для остальных квадратов тренды рассчитать было невозможно из-за отсутствия необходимого массива наблюдений.

Статическая достоверность присутствия линейного тренда оценивалась с помощью F-критериев Фишера (за статистически значимый принимался тренд при критерии Фишера $>2{,}09$) [100, 121].

В зимний сезон горизонт 0—0,5 м имеет следующие характеристики. В центрах западного (квадраты 46 и 60), восточного (квадрат 52) и центрального (квадрат 37) циклонических круговоротов тренды хотя и были положительными, но незначимыми. На периферии моря в прикрымском районе (квадраты 23 и 24), в прибосфорском районе (квадрат 74) и у Кавказского побережья (квадрат 41) существуют положительные тренды содержания кислорода, угловые коэффициенты 0,04—0,08 мг/(л·год). В квадрате 36 (центральная часть моря) наблюдался положительный тренд содержания кислорода 0,10 мг/(л·год). В квадрате 25 (прикрымский район) тренд был значительно меньше, хотя критерий Фишера незначим. Отрицательных трендов кислорода ни в одном квадрате не наблюдалось.

Таким образом, в поверхностном горизонте 0—0,5 м имеет место постоянное нарастание содержания кислорода за исследованный период времени. В большей степени это касается периферии моря, в меньшей — его центральной части.

На горизонтах 10 и 25 м происходило аналогичное явление — нарастание концентраций кислорода. Угловые коэффициенты трендов для квадратов 24, 23, 46, 74, 36, 60 имели значения 0,021—0,11 мг/(л·год).

Таблица 47

Тренды концентраций растворенного кислорода в период 1960—1986 гг.

Квадрат	Горизонт, м	Средняя концентрация, мг/л	$\sigma_{тр}$ мг/л	Угловой коэффициент тренда, мг/(л·год)	Размах тренда, мг/л	Критерий Фишера
			Зима			
24	0—0,5	10,14	0,44	0,07	1,53	32
	10	10,00	0,48	0,08	1,49	23
	25	9,69	1,11	0,08	1,49	8,20
	50	9,37	1,10	0,06	1,20	7,62
	75	8,89	1,47	—0,04	—0,97	1,27
	100	6,74	2,56	—0,03	—1,24	0,33
	150	2,40	2,53	—0,06	—1,24	0,34
23	0—0,5	10,23	0,57	0,06	1,26	7,27
	10	10,49	2,46	0,07	1,76	0,81
	25	10,19	0,51	0,04	0,66	2,43
	50	9,89	0,48	0,06	0,90	5,15
	75	9,59	0,66	0,06	1,00	3,70
	100	8,17	1,97	0,07	2,60	2,58
	150	4,13	9,92	0,13	2,96	2,45
46	0—0,5	10,53	0,58	0,006	0,07	0,02
	10	10,32	0,67	0,021	0,57	0,90
	25	10,36	0,36	0,021	0,53	2,73
	50	7,92	2,72	0,037	0,90	0,13
	75	3,07	2,80	0,047	1,13	0,19
	100	1,07	1,20	0,021	0,51	0,21
	150	0,41	0,31	0,003	0,06	0,04
74	0—0,5	10,06	0,68	0,07	1,27	5,40
	10	10,55	0,51	0,11	2,04	19,37
	25	10,56	0,36	0,10	1,20	13,20
	50	9,29	1,67	0,08	1,27	0,68
	75	5,27	3,77	0,08	3,54	1,10
	100	2,06	2,00	0,07	1,16	0,38
	150	0,41	0,26	—0,001	—0,01	0,00
41	0—0,5	10,12	0,63	0,04	0,78	2,32
	10	10,02	0,56	0,06	0,97	4,64
	25	9,89	0,49	0,06	1,03	6,58
	50	9,73	0,66	0,03	0,43	0,65
	75	7,99	2,01	—0,08	—1,39	0,72
	100	5,54	2,67	—0,10	—1,14	3,36
	150	1,39	1,34	—0,10	—1,61	2,07
52	0—0,5	10,70	0,38	0,04	0,66	2,49
	10	10,57	0,43	0,04	0,40	0,75
	25	10,06	1,14	0,001	0,01	0,00
	50	5,67	2,23	—0,46	—3,83	8,17
	75	3,07	2,42	—0,58	—5,36	4,46
	100	1,33	1,46	—0,26	—3,67	5,38
	150	0,47	0,54	—0,06	—0,54	0,91
37	0—0,5	9,92	0,77	0,07	0,66	0,66
	10	10,04	0,88	0,196	1,37	1,77
	25	9,96	0,54	0,004	0,03	0,00
	50	4,42	2,93	—0,08	—0,88	3.10
	75	2,27	2,72	—0,034	—0,24	0,01
	100	1,01	0,54	—0,123	—0,86	1,82
	150	1,23	2,67	—0,66	—5,26	3,17
36	0—0,5	10,39	0,51	0,10	1,74	9,20
	25	10,50	0,50	0,06	1,19	6,02
	50	9,24	2,83	—0,06	—1,27	0,22
	75	6,36	3,96	—0,06	—1,37	0,13
25	0—0,5	10,62	0,61	0,020	0,34	0,47
	10	10,32	0,74	0,017	0,33	0,32
	25	9,53	1,81	0,040	0,61	0,16
	50	7,40	3,17	0,053	0,80	0,09
	75	4,39	3,67	0,126	2,33	1,39
	100	1,96	1,73	0,132	2,20	1,87
	150	1,00	0,96	0,131	1,84	4,94

Продолжение табл. 47

Квадрат	Горизонт, м	Средняя концентрация, мг/л	$\sigma_{тр}$ мг/л	Угловой коэффициент тренда, мг/(л·год)	Размах тренда, мг/л	Критерий Фишера
			Весна			
23	0—0,5	9,24	0,77	0,003	0,54	1,14
	10	10,00	0,64	0,04	0,91	3,50
	25	10,28	0,61	0,04	0,81	2,91
	50	9,70	0,83	—0,020	—0,57	1,24
	75	9,01	1,24	—0,008	—0,20	0,03
	100	7,12	1,83	—0,013	—0,37	0,06
	150	3,79	3,02	—0,04	—1,04	0,17
24	0—0,5	9,97	0,51	—0,01	—0,31	2,92
	10	10,02	0,58	—0,003	—0,71	2,82
	25	10,03	0,43	—0,003	—0,70	3,65
	50	9,67	0,38	—0,003	—0,07	0,33
	75	7,13	2,21	—0,010	—0,17	0,04
	100	4,37	3,04	—0,07	—0,67	0,63
	150	1,37	1,71	—0,01	—0,26	0,03
46	0—0,5	9,92	0,91	0,03	0,91	1,56
	10	10,00	0,80	0,010	0,18	0,08
	25	10,07	2,26	0,21	3,93	19,56
	50	8,16	3,32	0,20	3,29	6,27
	75	5,02	1,61	0,010	0,16	0,01
	100	1,69	0,40	—0,01	—0,30	0,80
	150	0,68	0,43	—0,01	—0,36	1,10
74	0—0,5	10,10	0,93	0,10	2,01	5,52
	10	10,09	1,07	0,13	2,53	5,94
	25	10,17	0,81	0,07	0,88	1,38
	50	9,43	1,71	0,08	1,36	0,68
	75	6,06	2,76	1,13	2,89	3,95
	100	1,94	1,54	0,07	0,96	0,35
	150	0,93	1,20	0,07	1,60	1,46
41	0—0,5	9,80	0,76	0,08	1,46	6,02
	10	10,16	0,61	0,08	1,56	15,87
	25	10,32	0,87	0,07	1,10	2,00
	50	9,92	0,90	0,01	0,17	0,65
	75	8,59	1,71	0,03	0,48	0,11
	100	5,99	2,80	—0,01	—0,30	0,02
	150	1,49	1,84	—0,013	—0,18	0,01
52	0—0,5	10,14	0,68	0,11	1,14	2,30
	10	10,44	0,74	0,07	0,71	2,36
	25	10,67	0,23	0,08	0,86	6,45
	50	5,87	2,26	—0,27	—2,97	12
	75	2,83	1,37	—0,18	—3,92	22
	100	0,96	0,66	—0,21	—1,76	5,98
	150	0,47	0,41	—0,07	—0,47	0,82
37	0—0,5	10,34	0,88	0,06	0,56	0,33
	10	10,40	1,21	0,08	0,54	0,13
	25	10,23	0,70	0,27	2,19	8,03
	50	7,54	3,17	—0,17	—3,46	1,17
	75	3,34	2,83	—0,18	—3,93	1,74
	100	2,66	3,46	—0,13	—1,30	0,14
	150	1,09	2,13	—0,17	—2,37	1,02
25	0—0,5	10,04	0,68	0,06	0,77	1,46
	10	20,09	0,54	0,11	1,10	3,78
	25	9,69	1,70	0,17	2,77	2,41
	50	6,07	3,62	—0,08	—0,93	0,06
	75	3,03	2,62	—0,13	—2,27	0,61
	100	2,04	2,77	—0,17	—3,36	1,33
	150	0,41	0,20	—0,06	—0,54	6,24
36	0—0,5	10,00	0,76	0,13	2,23	7,27
	25	10,65	0,44	0,001	0,01	0,0
	50	7,00	2,94	—0,17	—2,33	2,55
	75	1,86	1,21	—0,17	—2,16	2,31
60	0—0,5	9,83	0,91	0,010	0,13	0,02
	25	10,44	0,58	0,07	1,19	5,14
	50	8,52	2,76	—0,04	0,63	0,06
	75	3,33	3,53	—0,03	—0,47	2,02
21	0—0,5	10,22	—	—	—	—
	25	10,22	0,64	0,17	1,83	5,23
	50	8,62	1,99	—0,28	—4,56	3,40
	75	8,10	2,82	—0,31	—6,30	2,81

Продолжение табл. 47

Квадрат	Горизонт, м	Средняя концентрация, мг/л	$\sigma_{тр}$ мг/л	Угловой коэффициент тренда, мг/(л·год)	Размах тренда, мг/л	Критерий Фишера
			Лето			
23	0—0,5	8,02	0,28	0,03	0,63	8,27
	10	8,13	0,51	0,03	0,71	3,04
	25	9,89	0,99	0,04	0,74	0,85
	50	9,39	0,84	—0,06	—1,40	6,69
	75	7,80	1,67	—0,08	—1,73	1,66
	100	5,09	2,43	—0,23	—3,56	7,90
	150	2,04	2,14	—0,06	—0,90	1,25
24	0—0,5	7,84	0,28	0,01	0,26	1,08
	10	8,26	1,16	0,04	0,80	0,67
	20	9,79	1,04	0,03	0,68	0,76
	50	9,76	0,54	—0,03	—0,51	1,16
	75	8,17	2,03	—0,14	—3,37	3,89
	100	4,37	3,30	—0,14	—3,16	1,29
	150	1,89	2,66	—0,04	—0,74	0,11
46	0—0,5	7,60	0,47	0,04	0,70	3,21
	10	7,79	0,51	0,03	0,51	1,95
	25	9,67	1,21	—0,04	—0,77	0,54
	50	7,22	2,30	—0,03	—0,71	0,30
	75	4,42	3,49	—0,14	—4,40	2,38
	100	3,14	2,21	—0,10	—1,67	1,89
	150	1,94	2,72	—0,18	—5,57	5,86
74	0—0,5	8,06	0,84	0,03	0,51	0,29
	10	8,19	1,10	0,07	0,91	0,74
	25	8,69	1,47	0,06	0,68	0,15
	50	8,83	1,77	0,03	0,41	0,24
	75	5,24	2,20	0,06	1,36	0,38
	100	1,54	0,90	0,06	0,68	0,44
	150	0,38	0,14	0,006	0,06	0,12
41	0—0,5	8,03	0,68	0,05	0,96	2,96
	10	8,19	0,99	0,17	2,73	10
	25	10,00	1,13	0,06	0,84	0,60
	50	9,22	0,99	0,03	—0,47	0,32
	75	7,53	2,14	—0,06	—1,01	0,32
	100	3,99	2,53	—0,23	—3,57	0,80
	150	1,37	1,41	—0,003	—0,06	0,00
52	0—0,5	8,43	0,43	0,04	0,51	0,78
	10	8,63	1,04	0,07	0,56	0,21
	25	9,77	1,33	0,03	0,20	1,12
	50	7,47	2,37	—0,01	—0,17	0,02
	75	3,39	2,37	—0,20	—1,54	1,05
	100	1,21	1,04	—0,08	—0,74	1,42
37	0—0,5	8,17	0,51	0,08	1,21	7,11
	10	8,13	0,54	0,008	0,08	0,63
	25	10,33	1,40	—0,11	—2,09	2,02
	50	8,09	1,91	—0,10	—1,21	0,43
	75	4,00	2,52	—0,03	—0,33	0,02
	100	0,90	0,61	—0,10	—1,21	4,18
	150	0,31	0,17	—0,013	—0,13	0,47
25	0—0,5	8,00	0,47	0,11	1,40	10
	10	7,74	0,43	0,10	1,09	6,89
	25	9,79	1,09	0,08	1,01	0,92
	50	8,24	1,66	0,07	0,97	0,40
	75	5,13	2,76	0,17	2,00	0,57
	100	2,94	2,64	0,14	1,77	0,52
	150	1,50	1,80	0,17	0,34	0,03
36	0—0,5	8,20	0,31	0,07	0,93	5,46
	25	10,72	1,60	0,008	0,06	0,60
	50	8,10	1,16	0,26	—3,13	4,71
	75	3,84	1,24	—0,38	—4,69	9,33
60	0—0,5	7,79	0,18	0,034	0,68	14
	25	10,42	0,91	0,011	0,11	0,61
	50	8,49	1,76	—0,020	—0,37	0,05
	75	2,52	1,34	—0,008	—0,24	0,03
21	0—0,5	8,29	0,24	0,061	0,54	1,97
	25	9,30	1,21	0,07	0,68	0,15
	50	9,20	0,99	0,06	0,54	0,14
	75	6,29	3,49	0,18	2,00	0,15

Продолжение табл. 47

Квадрат	Горизонт, м	Средняя концентрация, мг/л	$\sigma_{тр}$ мг/л	Угловой коэффициент тренда, мг/(л·год)	Размах тренда, мг/л	Критерий Фишера
			Осень			
23	0—0,5	9,29	0,61	0,03	0,68	1,84
	10	9,20	0,50	0,06	1,09	6,45
	25	9,20	1,29	—0,00	—0,00	0,00
	50	9,20	1,17	—0,06	—1,14	1,56
	75	7,47	2,54	—0,01	—0,38	0,42
	100	5,42	2,84	—0,14	—4,29	3,63
	150	1,54	1,19	—0,07	—1,09	1,20
24	0—0,5	9,09	0,60	0,06	1,21	7,91
	10	9,20	0,40	0,03	0,83	5,95
	25	9,17	0,53	0,03	0,83	5,90
	50	8,90	0,97	0,04	1,17	2,73
	75	6,92	2,09	0,07	1,54	2,41
	100	4,59	2,20	0,04	0,80	0,88
	150	2,03	2,89	—0,04	—1,14	0,82
46	0—0,5	9,33	0,48	0,03	0,48	1,44
	10	9,00	0,57	0,07	1,31	7,79
	25	9,53	0,91	0,04	0,77	1,08
	50	8,94	1,73	0,0004	0,08	0,00
	75	3,96	2,11	—0,21	—3,14	2,98
	100	1,29	1,44	—0,08	—1,43	1,47
	150	0,76	0,99	—0,04	—0,71	0,89
74	0—0,5	9,17	0,86	0,06	1,11	1,31
	10	8,73	0,58	0,08	1,31	5,89
	25	8,79	0,78	0,07	1,07	2,07
	50	9,37	0,70	—0,03	—0,43	1,42
	75	6,29	2,42	—0,06	—0,97	0,14
	100	3,00	2,46	—0,01	—0,24	0,69
	150	1,03	0,57	—0,03	—0,87	6,14
41	0—0,5	8,92	1,01	0,11	1,41	2,25
	10	9,24	1,03	0,03	0,40	0,18
	25	9,84	1,04	0,03	0,43	0,11
	50	9,77	1,00	—0,11	—1,44	2,44
	75	6,46	2,04	—0,11	—1,50	1,78
	100	3,32	2,49	—0,10	—1,54	0,96
	150	0,77	0,81	—0,04	—0,51	0,48
52	0—0,5	9,09	0,53	—0,07	1,03	2,77
	10	9,14	0,37	0,03	0,41	0,92
	25	9,30	0,57	0,03	0,43	0,41
	50	6,14	2,19	—0,18	—3,17	4,99
	75	2,39	2,40	—0,18	—3,22	2,09
	100	2,33	3,07	—0,18	—3,16	1,64
	150	0,43	0,44	—0,07	—0,53	1,05
37	0—0,5	9,14	1,04	0,01	0,17	0,02
	10	8,99	0,91	—0,04	0,36	0,11
	25	9,07	0,67	—0,07	—0,53	0,48
	50	7,52	1,29	—0,24	—1,46	0,83
	75	5,54	1,60	—0,18	—3,30	3,12
	100	1,49	0,67	—0,17	—2,24	8,32
	150	0,23	0,08	—0,03	—0,23	4,24
25	0—0,5	9,19	0,40	0,03	0,48	1,91
	10	9,22	0,40	0,00	0,50	1,98
	25	9,06	1,53	—0,04	—0,56	0,16
	50	7,93	2,40	—0,03	—0,50	0,06
	75	4,14	2,97	—0,11	—1,66	0,39
	100	1,64	1,40	—0,08	—1,23	1,02
	150	7,37	3,36	—0,01	—0,13	0,09
36	0—0,5	9,77	0,43	0,06	—0,78	2,43
	25	9,66	0,41	0,06	1,00	4,18
	50	9,43	0,76	—0,07	—1,04	1,38
	75	4,40	2,19	—0,07	—0,44	0,02
60	0—0,5	9,13	0,56	—0,01	—0,40	0,47
	25	9,10	0,51	—0,01	—0,16	0,09
	50	9,19	1,03	0,13	1,81	2,84
	75	5,57	2,17	0,03	1,20	0,04

Горизонт 50 м характеризуется следующими данными. В прикрымском районе (квадраты 23, 24) тренды содержания кислорода были положительными и значимыми, а в квадрате 25 тренд незначим. В прибосфорском районе моря (квадрат 74) и у Кавказского побережья (квадрат 41) были также положительные тренды концентраций кислорода при низком значении коэффициента Фишера.

В центрах восточного (квадрат 52) и центрального (квадраты 36 и 37) циклонических круговоротов существовали отрицательные тренды содержания кислорода, солености [6], плотности воды. Следовательно, выявленный ход изменения указанных характеристик воды показывает, что на горизонте 50 м в этих районах акватории моря существовал постоянно нарастающий подъем вод с нижележащих горизонтов.

В западной части моря (квадраты 46 и 60 на горизонте 50 м, как и в вышележащем слое, тренды оставались положительными при низких значениях критериев Фишера.

В слое 75—150 м отмечались отрицательные тренды не только в центрах восточного и центрального циклонических круговоротов (квадраты 52, 36 и 37), но и в некоторых квадратах на периферии моря (квадрат 24 в прикрымском районе и квадрат 41 у Кавказского побережья). Тренды в указанных квадратах — 0,03...—0,58 мг/(л·год) с максимумом в квадрате 42 на горизонте 75 м. В квадратах 23 и 25 тренды содержания кислорода в слое 75—150 м оставались, как и в вышележащем слое 0—50 м, положительными (0,06—0,13 мг/л). Такие разнонаправленные значения трендов содержания кислорода в прикрымском районе моря могут свидетельствовать о разнонаправленности вертикального движения водных масс в этом районе.

В весенний сезон по всей акватории моря в слое 0—25 м (за исключением квадрата 24) существовали положительные тренды, значения которых в разных районах лежали в пределах 0,01—0,27 мг/(л·год). В квадрате 24 значения трендов были отрицательными —0,01...—0,03 мг/л, что, по-видимому, связано с подъемом вод в этом квадрате. Положительные тренды концентраций кислорода в слое 0—25 м на всей остальной исследованной акватории моря, по-видимому, связаны с усилением процессов фотосинтеза в этом слое. Как показано в работе [49], с усилением солнечной активности происходит рост биомассы. Максимум средней концентрации кислорода (10,00—10,65 мг/л) был на горизонте 25 м.

Горизонт 50 м характеризуется следующими данными. В центрах западного (квадрат 60), восточного (квадрат 52) и центрального (квадрат 36 и 37) циклонических круговоротов тренды содержания кислорода были отрицательными (—0,020...0,34 мг/(л·год)) и значимыми в квадратах 21, 36, 37, 52. В прибосфорском районе (квадрат 74) при низком значении критерия Фишера тренд концентраций кислорода был положительным. Если в центре западного циклонического круговорота (квадрат 60) наблюдался подъем вод и тренды содержания кислорода были отрицательными, то на его окраине (квадрат 46) тренды этого ингредиента были положительными. Следовательно, на окраине циклонического круговорота происходило непрерывное опускание вышележащих кислородосодержащих слоев воды.

На горизонте 75 м лишь в отдельных периферийных районах моря (прибосфорский квадрат 74) тренды содержания кислорода оставались положительными, в центрах же западного (квадрат 60), восточного (квадрат 52) и центрального (квадрат 36) циклонических круговоротов, а также на границе западной и северо-западной частей моря тренды содержания ингредиента были отрицательными. В других же районах (квадраты 23, 24, 25, 37, 41, 46) критерии Фишера были низкими, а, следовательно, тренды содержания кислорода незначимыми.

В слое 100—150 м значимые отрицательные тренды содержания кислорода были в центре восточного циклонического круговорота (квадрат 52) и прикрымском районе моря (квадрат 25). В других квадратах (23, 24, 37, 41) тренды содержания кислорода были также отрицательными, но при низких значениях критериев Фишера. Лишь в прибосфорском районе моря (квадрат 74) тренды ингредиента были положительными.

Таким образом, можно заключить, что весной 1960—1986 гг. в слое фотосинтеза 0—25 м происходило накопление содержания кислорода, а в слое 75—100 м его убыль.

В летний сезон в слое 0—25 м тренды содержания кислорода были положительными в прикрымском районе моря (квадраты 23, 24, 25), в центрах западного (квадрат 60), восточного (квадрат 52) и центрального (квадрат 36) циклонических круговоротов, а также у Кавказского побережья (квадрат 41). Их значения лежали в пределах 0,01—0,17 мг/(л·год). В квадратах 37 и 46 уже на горизонте 25 м тренды концентраций кислорода поменяли свой знак на противоположный.

В прибосфорском районе моря (квадрат 74) тренды содержания кислорода были положительными в слое 0—150 м (0,03—0,07 мг/(л·год), хотя и при низких значениях критериев Фишера.

В слое 50—75 м во всех исследованных квадратах (за исключением квадратов 21 и 25) тренды содержания кислорода были отрицательными и изменялись от квадрата к квадрату от —0,011 до —0,38 мг/(л·год) с максимумом в центральной части моря (квадрат 36).

На горизонте 100 м наибольшего значения тренды уменьшения содержания кислорода (—0,23 мг/(л·год), $F = 2{,}8 \ldots 7{,}9$) достигали в прикрымском районе моря и у берегов Кавказа (квадраты 23 и 41). В центральной части моря (квадрат 37) также наблюдался значимый отрицательный тренд этого ингредиента.

В августе 1957—1981 гг. на горизонте 100 м в центральной части моря происходило увеличение солености, а в годы максимальной солнечной активности (1969, 1977—1979) одновременно с кислородом присутствовал и сероводород [101, 138]. Представленные данные свидетельствуют о происходившем подъеме вод в центральной части моря в рассматриваемый период времени.

В центре восточного циклонического круговорота (квадрат 52) существовали отрицательные тренды содержания кислорода, а по данным работы [139] положительные тренды концентраций сероводорода, солености, температуры и плотности воды и отрицательный тренд pH.

Следовательно, выявленный ход изменения обсуждаемых характеристик воды показывает, что на горизонте 100 м в центрах циклонических круговоротов (восточного, центрального и западного) существует постоянный подъем вод с нижележащих горизонтов.

Таким образом, хотя горизонт 100 м и представляет собой совокупность зон с постоянно разнонаправленными потоками вод путем вертикальной конвекции, в водах каждой из которых в течение 1960—1985 гг. происходило непрерывное обеднение или накопление кислородом, а также повышение или понижение солености, температуры, плотности воды [139], интегральный для всей акватории моря тренд содержания кислорода поимеющемуся массиву наблюдений был отрицательный (—0,06 мг/(л·год), $F = 5{,}94$).

На горизонте 150 м на большей части акватории моря присутствовал сероводород [139, 150]. Поле кислорода было прерывистым, поэтому значимый тренд уменьшения его концентраций (—0,04 мг/(л·год), $F = 5{,}86$) был лишь в центре западного циклонического круговорота (квадрат 46).

Осенью 1960—1986 гг. в слое воды 0—10 м во всех исследуемых квадратах (кроме квадрата 60, расположенного в центре западного циклонического круговорота) происходило непрерывное увеличение концентраций кислорода. Значения угловых коэффициентов тренда менялись от квадрата к квадрату.

В центре восточного циклонического круговорота (квадрат 52) значимый положительный тренд содержания кислорода (0,07 мг/(л·год)) существовал на горизонте 0—0,5 м, а на горизонте 10 м он был уже незначим (0,03 мг/(л·год)). В центральном «циклоне» (квадрат 36) наблюдалось непрерывное увеличение концентраций кислорода (0,06 мг/л·год)) в слое 0—25 м.

На горизонте 25 м значимый тренд увеличения содержания кислорода (0,03 мг/(л·год)) существовал также в квадрате 24 прикрымского района моря. В других квадратах рассчитанные значения угловых коэффициентов трендов были как положительными (в квадратах 46, 74, 41, 52), так и отрицательными (в квадратах 25, 37, 60), но при малых критериях Фишера.

Горизонт 50 м имеет следующие характеристики. В прикрымском районе моря (квадрат 24) существовал значимый положительный тренд содержания кислорода (0,03 мг/(л·год)), а в квадратах 23 и 25 — отрицательный (—0,04 ... ... —0,006 мг/(л·год)), но и при низких значениях критерия Фишера.

В центре восточного циклонического круговорота (квадрат 52) и у берегов Кавказа (квадрат 41) существовал значимый отрицательный тренд концентраций кислорода (—0,11 ... —0,18 мг/(л × × год)), а в западном (квадрат 60) — положительный (0,13 мг/(л·год)). В других квадратах тренды были незначимы.

Таким образом, горизонт 50 м представляет собой совокупность зон с разнонаправленными вертикальными потоками вод, в каждой из которых с разной скоростью протекают процессы фотосинтеза. Представленные данные важны не только тем, что дают количественные оценки степени увеличения или понижения значений характеристик кислородосодержания, но и выявление местоположения этих зон на акватории моря.

Горизонт 75 м характеризуется следующими данными. В прикрымском районе моря, как и на горизонте 50 м, в квадрате 24 был положительный значимый тренд увеличения содержания кислорода, а в квадратах 23 и 25 — отрицательный, но при низких значениях критериев Фишера.

В центрах западного (квадрат 46), восточного (квадрат 52) и центрального (квадрат 37) циклонических круговоротов существовали отрицательные тренды концентраций кислорода. В других квадратах тренды содержания кислорода были незначимы.

На горизонте 100 м значимые отрицательные тренды содержания кислорода существовали в прикрымском районе (квадрат 23) и центральной части (квадрат 37). В других исследованных квадратах тренды были как положительными (квадрат 24), так и отрицательными (квадраты 25, 41, 46, 52, 74), но значения критериев Фишера для них были малы.

На горизонте 150 м лишь в прибосфорском и центральном районах моря (квадраты 37 и 74) существовали значимые тренды уменьшения концентраций кислорода. Во всех остальных исследуемых районах моря тренды были также отрицательными, но при низких значениях критериев Фишера.

Таким образом, осенний сезон 1960—1986 гг. в слое вод 0—25 м происходило непрерывное накопление растворенного кислорода. В слое 50—75 м в одних районах концентрации кислорода увеличивались, в других — уменьшались. В слое 100—150 м происходило непрерывное убывание содержания кислорода по всем исследованным районам акватории моря.

Увеличение содержания кислорода в слое 0—25 м связано, по-видимому, с усилением процессов фотосинтеза в годы максимальной солнечной активности [10], а уменьшение его в слое 100—150 м и на горизонте 75 м в центрах циклонических круговоротов — с подъемом сероводородных вод [102]. Однако, как показано выше, на фоне выявленных средних характеристик временной и пространственной динамики поля концентраций растворенного кислорода имеет место их немонотонная изменчивость за определенные и различные промежутки времени.

Выводы и обобщения по распределению растворенного кислорода

В период 1963—1985 гг. в структуре поля кислорода произошли существенные изменения по сравнению с периодом 1939—1962 гг.:

— увеличился размах вариаций концентраций кислорода;

— количество зон пониженных и повышенных концентраций кислорода в период 1963—1985 гг. наблюдалось больше, чем в 1939—1962 гг., а сами зоны пониженных концентраций кислорода в период 1963—1985 гг. располагались севернее и ближе к Крымскому полуострову;

— толщина кислородного слоя в центральной глубоководной части моря и глубина залегания максимального его содержания уменьшилась;

— в период 1963—1985 гг. слой 75—200 м характеризовался совместным сосуществованием

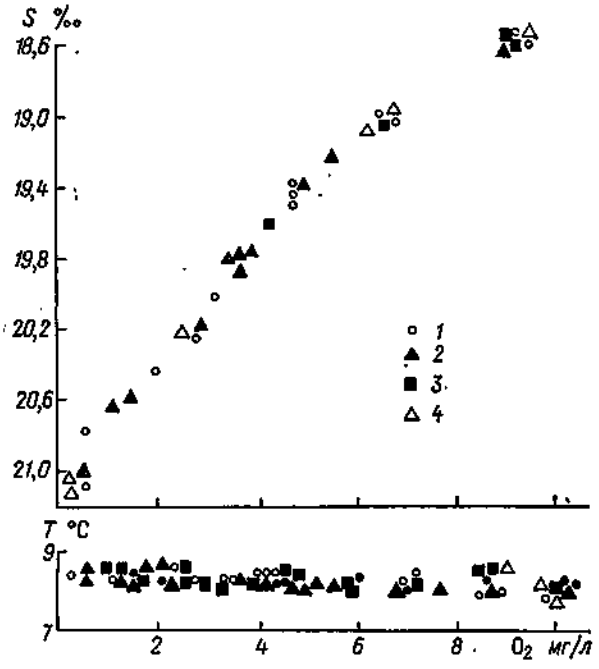

Рис. 54. Зависимость средних сезонных концентраций растворенного кислорода от солености и температуры в период 1965—1979 гг.
1 — зима; *2* — весна; *3* — лето; *4* — осень.

растворенного кислорода и сероводорода [138]; на горизонте 150 м эти ингредиенты хорошо коррелируют между собой ($r = -0{,}7$), а по мере приближения к границам слоя значения коэффициентов корреляции падают; ослабление этой корреляции происходит вследствие, вероятно, большой изменчивости в пространстве и во времени как рельефа границ слоя сосуществования, так и ингредиентов на этих границах.

Корреляционная связь между содержанием кислорода и температурой ($r = -0{,}8 \ldots 0{,}95$) наблюдалась в верхнем 10-метровом слое, наиболее подверженном сезонным изменениям вследствие влияния температуры, колеблющейся в большом диапазоне в течение года.

В слое воды 50—200 м в 1965—1979 гг. наиболее тесная корреляционная связь ($r = -0{,}97 \ldots -1{,}00$) по данным работы [10] наблюдалась между содержанием кислорода и соленостью. На рис. 54 показана зависимость средних сезонных концентраций растворенного кислорода от солености и температуры воды в 1965—1979 гг. [10]. Из этих данных следует, что в слое воды 50—200 м есть хорошая корреляция между содержанием растворенного кислорода и температурой. Например, в западной части моря (квадраты 36 и 60) на горизонте 75 м в весенне-летний период 1963—1985 гг. коэффициент корреляции между содержанием кислорода и температурой воды —0,97.

Сезонным изменениям содержание кислорода подвержено не только в верхнем 10-метровом слое, где оно проявляется наиболее сильно, но и до глубин 150 м (рис. 55). Из рис. 55 [181] следует, что если в слое 0—10 м максимум содержания кислорода приходится на зимние месяцы (январь, февраль), то в слое 75—150 м — на весенний (апрель).

Содержание кислорода в море подвержено и межгодовой изменчивости. По нашим данным в глубоководной части моря для горизонта 75 м вы-

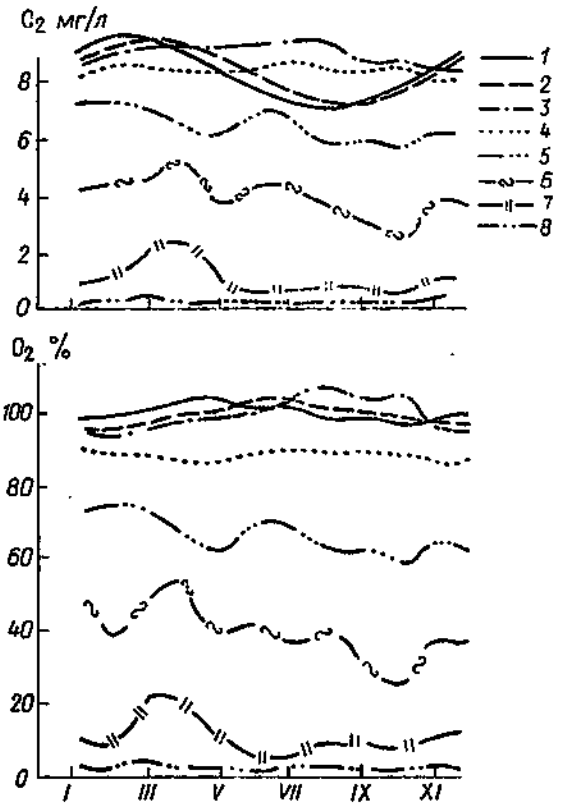

Рис. 55. Средние значения абсолютного (мкг/л) и относительного (% насыщения) содержания растворенного кислорода.
1 — 0 м; *2* — 10 м; *3* — 25 м; *4* — 50 м; *5* — 75 м; *6* — 100 м; *7* — 150 м; *8* — 200 м.

явлена отличная от определенной в работе [86] тенденция. На этом горизонте в 1960—1985 гг. (см. табл. 40) в годы усиления солнечной активности происходило уменьшение среднего содержания кислорода. Эти данные более надежно, чем в работе [86], свидетельствуют о влиянии солнечной активности. Под действием подъема сероводородных вод до глубины 75 м в годы усиления солнечной активности [101, 120, 139] происходит уменьшение содержания кислорода на горизонте 75 м; суммарные же объемы кислорода в слое 0—50 м возрастают, по-видимому, под действием усиления процессов фотосинтеза.

По данным работы [147] интегральная скорость окисления сероводорода и потребления кислорода Ri ммоль/(м²·ч) в слое их совместного сосуществования пропорциональна отношению эффективного коэффициента вертикального обмена K_z^{-1} (см²/с) к толщине этого слоя h (м), взятому в степени 1,2:

$$Ri = a\left(\frac{K_z^{-1}}{h}\right)^{1,2}.$$

Эта формула дает определенную возможность объяснить наличие отрицательных трендов как содержания кислорода, так и сероводорода [139] в слое их совместного сосуществования, например, в летний сезон 1960—1986 гг. По-видимому, увеличение динамики вод в годы увеличения солнечной активности [6, 102] приводило к увеличению коэффициента вертикального обмена (K_z^{-1}), что приводило к росту скорости окисления сероводорода и потребления кислорода, а следовательно, к уменьшению их концентраций в слое.

4.3. Элементы баланса

4.3.1. Оценка продукции кислорода в отдельных районах моря

Оценка выполнена на базе результатов наблюдений за суточным ходом растворенного кислорода в различные сезоны года в устьевой области Дуная, в районе побережья Одессы, Ялты, Туапсе и прибосфорском районе по методике, изложенной в работе [91].

В северо-западной шельфовой зоне большая часть наблюдений за растворенным кислородом выполнена в весенний и летний сезоны в период 1967—1978 гг. (619 наблюдений), в водах Южного берега Крыма — в осенний сезон 1968 и 1969 гг. (360 наблюдений), в прибосфорском районе (1966, 1974 и 1981 гг., 400 наблюдений) и в прибрежных водах района Туапсе — во все сезоны 1966—1978 гг. (1880 наблюдений).

Для оценки суточной продукции кислорода на исследованных многосуточных станциях были рассчитаны средние взвешенные значения пересыщения кислородом всего слоя фотосинтеза. По этим значениям насыщения вод слоя фотосинтеза кислородом и толщине слоя фотосинтеза [91] определялась их принадлежность к той или иной градации трофности с учетом сезона года.

В весенний сезон в северо-западной части моря максимальные значения суточной продукции кислорода приходятся на 0 и 12 ч. В летний сезон максимальная суточная продукция кислорода приходится на 4, 16 и 20 ч. Минимальные значения суточной продукции кислорода приходятся на 6, 10, 18 и 22 ч, причем эти значения не превышают 0,15 г/(м²·сут).

Толщина пересыщенного кислородом слоя фотосинтеза в летний сезон максимальна в 4 и 16 ч.

В осенний сезон в 2 и 20 ч насыщенность кислородом слоя фотосинтеза — менее 100 %, суточная продукция кислорода в эти сроки отсутствует. Среднее взвешенное суточное значение растворенного кислорода в сроки 0, 6, 8, 12, 14, 18 ч достигает только 100—101 % насыщения. Максимальная суточная продукция кислорода приходится на 18 ч.

В прибосфорском районе в весенний период суточная продукция кислорода максимальна в 4 ч. В осенний сезон в этом районе моря среднее взвешенное количество растворенного кислорода во все сроки наблюдений достигало 102—103 % насыщения. Толщина пересыщенного кислородом слоя фотосинтеза в 0, 6, 12, 18 ч изменялась в малых пределах (23—28 м). Суточная продукция кислорода в утренние сроки (6 ч) 1,77 г/(м²·сут), в остальные сроки (0, 12, 18 ч) продукция кислорода варьировала от 2,00 до 2,16 г/(м²·сут).

В зимний сезон пересыщение кислородом (102—109 % насыщения) слоя фотосинтеза наблюдалось в сроки 0, 6, 12, 18 ч. В остальные сроки среднее взвешенное содержание растворенного кислорода не превышало 95—98 % насыщения (суточная продукция достигала максимума в 12 и 0 ч).

В районе Туапсе в весенний сезон максимальная суточная продукция кислорода обнаружена в 2, 14, 18, 22 ч.

В летний период в сроки наблюдений 1, 5, 9, 10, 13, 17, 21 ч суточная продукция кислорода не рассчитывалась из-за отсутствия пересыщения кислородом слоя фотосинтеза. Значения продукции кислорода в этом районе очень малы в сравнении с продукцией в северо-западной части и в прибосфорском районе.

В зимний сезон толщина пересыщенного кислородом слоя фотосинтеза была максимальной (50 м) в течение всего периода наблюдений в сравнении со всеми вышеперечисленными районами наблюдений, а также со всеми сезонами.

Такая устойчивость толщины слоя фотосинтеза в течение всего многолетнего периода наблюдений не способствовала, однако, равной продукции кислорода во все сроки наблюдений. Максимальная суточная продукция кислорода обнаружена в ночное и дневное время.

В водах у Южного берега Крыма в зимний сезон за весь период наблюдений не обнаружено пересыщение кислородом слоя фотосинтеза. Среднее взвешенное значение растворенного кислорода достигало 98 % насыщения. Максимальная суточная продукция кислорода для осеннего сезона наблюдалась в сроки 5, 7, 19 ч, в остальные часы наблюдений пересыщение кислородом слоя фотосинтеза не наблюдалось.

Средняя суточная продукция кислорода (г/(м² × × сут)) составила в северо-западном районе весной 2,7, летом — 0,8, осенью — 0,12; в прибосфорском районе зимой — 0,8, весной — 3,6, осенью — 1,0; у Южного берега Крыма осенью — 1,0; в районе Туапсе зимой — 0,6, весной — 0,6, летом — 0,16 и осенью — 0,4.

Северо-западный район Черного моря в среднем за год эвтрофен особенно весной и летом. Район Южного берега Крыма и прибосфорский район относятся к мезотрофным водам. По нашим наблюдениям, проведенным во все сезоны года, этот район мезотрофен.

4.3.2. Оценка поступления кислорода в атмосферу и его переноса в водной толще

Оценка выполнена по методике, изложенной в работе [91], по уравнению

$$\downarrow\uparrow O_2 = \alpha_э n_t n_v \cdot \Delta O_2,$$

где $\alpha_э$ — коэффициент эвазии кислорода, равный 11,5 л/(м²·ч); n_t — температурный коэффициент, учитывающий отличие растворимости кислорода в воде при температуре in situ и при температуре 20 °С; n_v — интегральный ветровой коэффициент, учитывающий скорость ветра (при скорости ветра меньше 10 м/с $n_v = 1 + 0{,}125v^2$, при ветре больше 10 м/с $n_v = -4 + 0{,}175v^2$); ΔO_2 — разность между фактической и насыщающей (при данной температуре и солености) концентрациями кислорода на поверхности.

Полученные результаты свидетельствуют, что в прибосфорском районе максимальное количество выделяющегося в атмосферу кислорода наблюдается в весенний сезон (до 0,29 л/(м²·ч)) в 04, 10, 16 ч. В то же время у Южного берега Крыма в осенний сезон в атмосферу поступает кислорода несколько больше, чем в прибосфорском районе. Среднее количество кислорода, который поступает в атмосферу в северо-западной части моря (0,20 л/(м²·ч)) в весенний сезон, совпадает с таковым в прибосфорском районе и является наибольшим.

В Туапсинском районе максимальное среднее количество кислорода, выделяющегося в атмосферу (0,13 л/(м²·ч)), обнаружено в зимний сезон, а минимальное — в весенний (0,09 л/(м²·ч)) сезон.

Таким образом, в северо-западном районе моря в атмосферу выделяется кислорода больше, чем в шельфовых зонах прибосфорского, Туапсинского районов и у Южного берега Крыма.

Турбулентный перенос кислорода из слоя фотосинтеза в подстилающие его глубины равен произведению коэффициента турбулентной диффузии на вертикальный градиент кислорода у нижней границы слоя фотосинтеза [111].

Перенос кислорода рассчитан по формуле

$$O_2\downarrow = K \operatorname{grad} O_2;$$

Коэффициенты турбулентной диффузии взяты из работы [111].

Из полученных данных для северо-западной части моря и района Южного берега Крыма сделаны выводы, заключающиеся в следующем. Турбулентный перенос кислорода в нижележащие слои в осенний сезон больше в северо-западной части моря, чем у Южного берега Крыма. Кроме того, в северо-западной части моря в послеполуденное время (14 ч) растворенного кислорода переносится больше, чем в ночное, а у Южного берега Крыма максимум турбулентного переноса приходится на предвечернее время (19 ч). В дневное время содержание растворенного кислорода не достигало полного насыщения в период наблюдений (09, 11, 13, 15, 17 ч).

Таким образом, в период интенсификации фотосинтеза турбулентный перенос кислорода из слоя фотосинтеза в нижележащие слои усиливается.

5. СЕРОВОДОРОД

5.1. Результаты океанографических исследований в период 1890—1965 гг.

Приоритет обнаружения сероводорода в глубинных водах Черного моря принадлежит российским исследователям (цит. по [139]). В июне 1890 г. в экспедиции на канонерской лодке русского военно-морского флота «Черноморец», проводившейся Русским географическим обществом по инициативе Н. И. Андрусова, были подняты пробы воды и донного ила (с глубины более 183 м), которые имели запах сероводорода.

Первые количественные данные по содержанию сероводорода в анаэробной зоне моря были получены А. А. Лебединцевым [139] в период экспедиций в 1891 г., который применил иодометрический метод анализа, а также медный батометр Буханана (внутренняя поверхность батометра покрывалась инструментальным лаком) и латунный батометр системы Виля — Тимченко с позолоченной внутренней поверхностью. А. А. Лебединцев показал, что с ростом глубины содержание сероводорода увеличивается.

Если принять современные представления о верхней границе анаэробной зоны моря, на которой концентрация сероводорода примерно 0,08 мг/л, то в 1891—1892 гг. она располагалась в отдельных районах исследования на горизонтах не ниже 140—190 м.

Со времени первых исследований Н. И. Андрусова и А. А. Лебединцева за период до 1960 г. основной вклад в изучение анаэробной зоны внесли российские и советские исследователи Н. Д. Зелинский, Е. М. Брусиловский, М. А. Егунов, П. Т. Данильченко, Н. И. Чигирин, Н. М. Книпович, И. А. Равич-Щербо, Б. А. Исаченко, А. А. Егорова, Б. А. Скопинцев, Я. К. Гололобов, В. Г. Дацко, В. Н. Никитин, В. С. Бруевич, М. В. Иванов, Ф. А. Губин, П. А. Киткин, Е. А. Крисс, М. А. Добржанская, Э. А. Остроумов, Л. С. Фомина, И. И. Волков, Э. В. Смирнов, А. П. Виноградов, Ю. И. Сорокин. Известна только одна работа того периода, выполненная зарубежным исследователем (цит. по [139]).

Работы по детальному изучению пространственно-временного распределения концентраций сероводорода были выполнены экспедициями под руководством Н. М. Книповича и Ю. М. Шокальского. Отбор проб проводился в экспедициях батометрами с позолоченными внутренними стенками.

В этот период исследований было установлено, что верхняя граница распространения сероводорода находилась в слое выше 150 м, а в районах циклонических круговоротов сероводород обнаруживался в заметных концентрациях на глубинах 125 м. Одновременно В. Н. Никитин и Н. М. Книпович (цит. по [139]) констатировали границу жизнедеятельности на глубинах 87,5—100 м в восточной и центральной частях моря, на 187 м — в районе Ялты, на 212,5 м — у побережья Кавказа. Полученные данные позволили сформулировать представления о непостоянстве верхней границы распространения сероводорода во времени и пространстве, которое обусловливается системой течений и вертикальной циркуляции вод.

К 1932 г. Н. М. Книповичем был подведен итог этого периода изучения анаэробной зоны моря, согласно которому изосульфиды имеют куполообразное строение вплоть до глубин 300 м, а вершины куполов располагаются в центрах циклонических круговоротов вод.

Итогами черноморских океанографических экспедиций 1923—1935 гг., включавших 53 рейса, продолжительностью от 15 до 60 сут, было выполнено более 1600 океанографических станций и около 2000 биологических и грунтовых станций. Столь массовые наблюдения позволили Н. И. Чигирину сделать вывод о расположении верхней границы сероводорода на глубине 150 м, а нижней границы растворенного кислорода — до глубин 150—225 м. Рельеф указанных границ сложен и отражает структуру циркуляции вод в разных районах моря.

Следующим этапом изучения анаэробной зоны был период до начала 50-х годов. В этот период Я. К. Гололобов исследовал пробы воды, отобранные в экспедициях 1938—1949 гг. Отбор проб при

этом проводился металлическими батометрами серии Кнудсена без антикоррозийных покрытий (цит. по [139]).

В августе 1938 г. была проведена экспедиция на судне «Тбилиси» в восточной и юго-восточной частях моря, в которых исследовано распределение сероводорода до глубин 400—500 м на основе 154 анализов проб, отобранных на станциях ряда разрезов. Наиболее глубоко верхняя граница сероводородной зоны находилась в тот период времени в прибрежной зоне моря в районе, ограниченном изолиниями 150 — 175 — 200 м. Менее глубокое положение эта граница занимала в других исследованных районах. Разность между глубинами наиболее низкого и наиболее высокого положения верхней границы сероводородной зоны составляла 100 м [139].

Я. К. Гололобов [139] пришел к выводу, что «динамические факторы оказывают весьма существенное влияние на глубину положения верхней границы сероводородной зоны в море, нижней границы кислорода и жизни (исключая анаэробных бактерий). Глубина ее положения изменяется, что по-видимому, обусловливается изменением мощности постоянных течений в результате изменения скоростей господствующих ветров в этой части моря в остальные сезоны года».

Несколько более поздние исследования Г. Неймана по содержанию и распределению сероводорода позволили ему отметить, что верхняя граница сероводородной зоны расположения немного выше, чем нижняя граница проникновения кислорода, но обе показывают заметный параллелизм в горизонтальном распределении. Приняв за верхнюю границу сероводородной области значение его концентрации 0,8 мг/л, он установил, что в центральных частях моря граница поднимается до 150—175 м и может даже на некоторых изолированных участках подниматься выше, а вблизи побережья эта граница располагается на глубинах 250 м и ниже.

Период начало 50-х — середина 60-х годов характеризуется резким подъемом темпов изучения океанографических характеристик анаэробной зоны. Это изучение проводилось в основном Б. А. Скопинцевым с сотрудниками, М. А. Добржанской с сотрудниками, В. С. Бруевичем, Я. К. Гололобовым. Сводка и обобщение научных результатов исследований этого периода даны Б. А. Скопинцевым в фундаментальной монографии, посвященной гидрохимии Черного моря [150].

По данным М. А. Добржанской (1954), вся центральная часть моря на глубине 150 м характеризовалась повышенным (более 0,4 мг/л) его содержанием, а в прибрежных водах значения концентраций уменьшались до «не обнаружено». На горизонте 300 м максимальные концентрации сероводорода приурочены к центрам восточного, западного и центрального циклонических круговоротов. В юго-восточном районе моря области антициклонического круговорота соответствовали минимальным концентрациям сероводорода (0,8 мг/л). В феврале 1956 г. содержание сероводорода в слое 150—300 м было ниже, чем в октябре — ноябре 1954 г. Так, на горизонте 150 м в преобладающей части центрального района моря концентрация сероводорода немногим превышала 0,1 мл/л. Лишь в западной части моря на небольших участках его концентрации были выше 0,4 мг/л.

На горизонте 300 м содержание сероводорода в центрах восточного и западного циклонических круговоротов не превышало 2,7 мг/л, в центральном — 1,8 мг/л, а по мере приближения к Крымскому побережью снижалось до аналитического нуля. Расположение изосульфид в октябре — ноябре 1954 г. и в феврале 1956 г. было также различным. На основании этих данных М. А. Добржанской были сделаны выводы о сезонной изменчивости содержания сероводорода в слое 150—300 м. Уменьшение же концентраций сероводорода в эти сезоны позволяет предполагать, что сезонным колебаниям подвержена большая толща вод (не менее 300 м), чем это считалось раньше (80—100 м).

В сентябре 1963 г. по данным Я. К. Гололобова наиболее высокое залегание верхней границы сероводородной зоны в восточной части моря было отмечено на границе 130 м, а наиболее низкое — на границе 180 м. В июне 1965 г. в этой же части моря верхняя граница сероводорода располагалась в слое 120—226 м, а в западной части моря — в слое 120—240 м. Мощность промежуточного слоя сосуществования растворенного кислорода и сероводорода составляла от 6—10 м в зонах подъема вод и до 30—35 м в зонах их опускания. Максимальная мощность слоя сосуществования этих соединений в июне 1965 г. равнялась 79 м и располагалась в юго-западной части моря против м. Амасра.

Работы Л. М. Алексеевой (цит. по [139]) подтвердили впервые обнаруженное Б. А. Скопинцевым и Киткиным в 1951 г. присутствие сероводорода на горизонте 100 м на 5 станциях из 32 исследованных в восточной и центральной частях моря. Л. М. Алексеева обнаружила в пробах воды, отобранных на станциях разреза м. Херсонес — прол. Босфор, содержание сероводорода на горизонте 100 м до 0,56 мг/л.

Особенно значителен вклад в изучение анаэробной зоны моря в этот период времени Б. А. Скопинцева с сотрудниками. В основных чертах получены следующие результаты и выводы этой группы исследователей. Существует один механизм (вертикальное перемешивание вод), управляющий распределением основных компонентов солевого состава и сероводорода по вертикали морской толщи. Изосульфиды примерно до глубин 1750 м имели куполообразное строение. Конфигурация изосульфид на горизонтах близка к конфигурации береговых линий. Максимумы концентраций сероводорода приурочены к центрам циклонических круговоротов в западной, центральной и восточной областях моря, обусловленных подъемом вод. Минимумы концентраций формируются в областях опускания вод. «Куполы четче вырисовываются на горизонте 300 м по сравнению с нижележащими, что объясняется повышенным водообменом на этой глубине» [139]. Верхняя граница сероводородной зоны в море находится в слое 100—200 м.

Выделяются четыре типа распределения сероводорода в море. В первом, наиболее распространенном, наблюдается постоянный рост концентраций сероводорода с глубиной и максимумом у дна.

Второй тип вертикального распределения сероводорода характеризуется повышением содержания сероводорода от верхней границы ко дну моря с некоторым его уменьшением в слое 1500—2000 м. Третий тип распределения сероводорода встречается сравнительно редко и характеризуется наличием максимума в промежуточных слоях сероводородной зоны с последующим понижением у дна. Для четвертого типа распределения сероводорода характерно наличие двух максимумов в содержании сероводорода, при этом один располагается в слое 1000—1200 м, второй — в слое 1700—1800 м с последующим уменьшением его ко дну.

Концентрация сероводорода также изменяется в результате его окисления в слое сосуществования сероводорода и кислорода. Ход вертикального распределения сероводорода в его верхней части (в слое 120—150 м, где градиент уменьшения концентрации сероводорода минимален) «дает основание говорить о его поступлении в воду в этом слое».

Наиболее значимым был вывод о том, что концентрации сероводорода в Черном море за период с 1924—1927 гг. до середины 1960-х гг. остались близкими, что и может свидетельствовать о существовании динамического равновесия концентраций сероводорода в водной толще за 25-летний период (цит. по [139]).

5.2. Материалы наблюдений и состояние изученности

Материалы наблюдений, положенные в основу оценок современного состояния сероводородной зоны моря, получены в экспедиционных исследованиях с 1960 г. и находятся в гидрометфонде ГОИНа (г. Севастополь). Перечень экспедиционных исследований представлен в табл. 47а. Систематические наблюдения за содержанием сероводорода Госкомгидрометом осуществляются на горизонте 100 м с 1963 г., на горизонте 75 м — с 1969 г. В период 1960—1973 гг. Госкомгидрометом осуществлялись наблюдения в основном на станциях вековых разрезов. С 1974 г. эти наблюдения проводились в рамках Общегосударственной службы наблюдения и контроля за загрязнением среды на Черном море (ОГСНК).

Материалы наблюдений, полученные в экспедиционных исследованиях научно-исследовательских судов других ведомств, например АН СССР, АН УССР, Министерства рыбного хозяйства СССР, Министерства высшего и среднего специального образования СССР (МГИ АН УССР, ИнБЮМ АН УССР, АзЧерНИРО и т. д.) в период с 1960 г., в гидрометфонд ГОИНа не поступали, поэтому они непосредственно не использованы в оценках современного состояния сероводорода в Черном море. Использованы только материалы научных публикаций специалистов МГИ АН УССР, ИнБЮМ АН УССР, АзЧерНИРО при обсуждении полученных авторами выводов (цит. по [139]).

Состояние изученности поля сероводорода и содержащих материалы исследований за указанный период характеризуется более чем 2 300 станциями с количеством наблюдений более 16 000. Несмотря на имеющийся, казалось бы, внушительный массив данных и значительный временной ряд (более 25 лет), не все квадраты моря имеют одинаковую изученность. Поэтому наряду с методом расчета средних квадратических отклонений были использованы другие математические методы анализа материалов наблюдений, позволившие восполнить пробелы в фактическом материале.

Таблица 47а

Перечень экспедиционных исследований

Исследовательское судно	Дата	Количество	
		станций	проб
«Горизонт»	V 1960; V, VI, VII, VIII, IX, X 1963	43	152
	V 1960	2	15
	IV, VI 1961; II, III, IV, V, VI, VIII, XII 1963; IX, X, XI 1962; I, II, III, IV, VII, VIII, IX 1964; VI 1965	103	281
	VIII 1964	15	32
	IX 1964	8	22
«Мгла»	I, III, V 1963; VIII, XI 1963; VIII, XI 1964; III 1966; II 1968; II, V 1969; XI 1971; II 1972	178	1236
	III, V 1961	11	38
	IV 1963; II 1968; VII 1972; II, V, VIII 1969	51	449
	XI 1963; XI 1964	10	59
	XI 1966; II 1969; VIII 1971; II 1972	18	178
	II, V 1969	12	80
	III—IV 1975	27	264
	V—VI 1975	39	126
	VII—VIII 1975	21	224
	VIII 1977	87	1131
«Риф»	V 1963	12	63
	V 1964; V, VIII, XI 1965; XI 1969	22	124
	V, VIII 1965; XI 1966; V, VIII, XI 1969; III 1970	39	247
	II 1969	2	12
«Александр Власов»	XII 1965; II, XI 1966; VIII 1967	29	79
«Прибой»	VIII 1968	4	18
	VIII 1968	5	33
«Пассат»	XI 1972	14	161
	VII, XI 1972	9	84
	XI 1972	64	372
«Академик Вернадский»	III—IV 1973	41	360
«Муссон»	I—II 1974	98	369
	IV 1977	61	584
	XI 1979	110	596
«Эрнст Кренкель»	IV 1974	35	235
«Виктор Бугаев»	XI—XII 1974	72	452
«Яков Гаккель»	IV, VIII, XI 1976; II, IV, VII—VIII, X—XI 1977; II, VI—VII, VIII 1978; XII 1980; II, V, VII—VIII 1981; VII, X—XI 1982; III, VII, XI 1973; II, IV, XI 1985; II 1986	966	6951
	VII 1984	17	108
«Георгий Ушаков»	II 1979	41	349
«Тантал»	IX 1979	41	365
	X 1974	26	128

5.3. Сероводород в слое 75—250 м в 1964—1986 гг.

5.3.1. Горизонт 75 м

Впервые по данным экспедиционных отсчетов [142] сероводород на этом горизонте был определен в количестве 0,14 мг/л на двух станциях Л. М. Алексеевой.

Характер расположения и размеры площади поля сероводорода в акватории моря на глубине 75 м были достаточно подвижны и изменчивы. Данные показывают, что период 1981—1985 гг. характеризовался обнаружением сероводорода на этом горизонте на более обширной площади моря, особенно в западной его части, чем в предыдущий период. Такой характер изменчивости поля концентраций сероводорода, несомненно, зависит от гидрологических характеристик районов моря. Например, еще С. В. Бруевич писал о подъеме глубинных вод у южных берегов Крыма, называемом им «океанографической загадкой Черного моря».

Повышенное содержание сероводорода соответствовало повышенному значению солености и плотности воды и пониженному значению ее температуры (например, в ноябре 1977 г., в сентябре 1979 г. концентрация сероводорода на ряде станций составляла 0,61—1,21 мг/л, а соленость — 19,06—20,68 ‰, плотность — 15,00—15,68). Максимальные концентрации сероводорода наблюдаются с периодичностью 10—11 лет. Так, если в 1969 г. максимальная концентрация сероводорода составляла 0,36 мг/л, то в 1970 г.— только 0,23 мг/л (количество станций, на которых обнаруживался сероводород, составляло в эти годы соответственно 7 и 1). С 1971 по 1976 г. сероводород вообще не обнаруживался в пробах воды, поднятых с глубины 75 м.

Аналогичное явление описано в работе [139], выполненной в марте — апреле 1969 г. Верхняя граница сероводородной зоны в этот период проходила в слое 75—250 м. Наиболее высоко она наблюдалась в центральной части моря, а наиболее низко — у берегов. По этим данным в 1970—1974 гг. сероводород на горизонте 75 м не обнаруживался. Но в 1977 г. сероводород был уже обнаружен на 28 станциях из 105 исследованных на всей акватории моря. При этом в прикрымском районе на 16 станциях из 19 исследованных содержание сероводорода 0,08—1,06 мг/л, а в восточной части моря — на 7 станциях из 27 исследованных — менее 0,08—0,15 мг/л. Максимальные концентрации сероводорода пришлись на 1979 г (1,21 мг/л), а в последующие годы значения максимальных концентраций сероводорода уменьшились до менее 0,08 мг/л (1986).

Отмеченная динамика содержания сероводорода и его зависимость от концентрации растворенного кислорода особенно четко прослеживается по средним значениям.

5.3.2. Горизонт 100 м

Характерно, что в ноябре 1964 г. в пробах воды, в которых был обнаружен сероводород на горизонте 100 м, были высокие концентрации растворенного кислорода 2,74—9,53 мг/л. В последующие годы сероводород обнаруживался на этом горизонте во всех экспедициях в различных областях моря. На отдельных станциях наблюдалась так называемая сероводородная инверсия [139]: в пробах воды этих станций на горизонте 75 м сероводород обнаруживался, а на более низких горизонтах (100 и 150 м) таковой отсутствовал.

Максимальные концентрации сероводорода (0,8 мг/л и более) были характерны для ряда лет: 1966—1969, 1974, 1977—1979 гг. Ареалы содержания сероводорода менялись во времени во все периоды исследований. Так, например, с 1964 по 1966 г. на вековом разрезе м. Херсонес — прол. Босфор наблюдалось увеличение как содержания сероводорода, так и количества станций, на которых он обнаруживался.

Значения максимальных концентраций сероводорода, определявшиеся в каждой экспедиции, лежат в пределах 0,14—1,52 мг/л, что свидетельствует о широком диапазоне изменчивости концентраций сероводорода во времени в период экспедиционных исследований, так как значения минимальных концентраций сероводорода во всех случаях представлялись как его отсутствие («не обнаружено»).

В районах обнаружения сероводорода весьма существенно колебалось содержание растворенного кислорода. Для всего периода исследований концентрации растворенного кислорода 0,07—10,56 мг/л. При этом минимальные концентрации, обнаруживаемые в каждой экспедиции, лежали в пределах 0,07—2,74 мг/л, а максимальные — 0,71—10,56 мг/л. Применение корреляционного анализа не дало возможности выявить устойчивую зависимость между средними концентрациями сероводорода и растворенного кислорода как по результатам отдельных экспедиций, так и по средним значениям для отдельных районов. Вместе с тем для ряда отдельных конкретных случаев (на отдельных станциях и районах в отдельных экспедициях) наблюдалась обратная зависимость между концентрациями сероводорода и растворенного кислорода.

В районах обнаружения сероводорода были значительны и колебания температуры воды (6,19—9,90 °С) за весь период наблюдений. Минимальные значения, обнаруживаемые в каждой экспедиции, находились в диапазоне 6,19—8,40 °С, а максимальные — 8,27—9,90 °С. Как правило, высоким концентрациям сероводорода соответствовали высокие значения температуры воды. Коэффициент корреляции 0,63, уравнение регрессии имеет вид

$$\lg C = 11{,}55 \lg T - 11{,}81,$$

где C — концентрация сероводорода, мг/л; T — температура воды, °С.

Отсутствие статистически обоснованных зависимостей распределения концентраций сероводорода от основных гидролого-гидрохимических параметров водной среды на горизонте 100 м (солености, условной плотности, водородного показателя и концентрации растворенного кислорода) свидетельствует о существовании других океанографических факторов, свойственных водам Черного моря и оказывающих значительное влияние на характер распределения и содержания сероводорода на горизонте 100 м.

5.3.3. Горизонт 150 м

В течение всего периода исследований в 1960—1986 гг. сероводород систематически обнаруживался на горизонте 150 м на всей акватории. Данные по средним сезонным концентрациям сероводорода, их экстремальные значения и средние квадратические отклонения для всех квадратов свидетельствуют, что, хотя общий массив наблюдений на горизонте 150 м достаточно велик, но плотность числа наблюдений в одних и тех же сезонах года по акватории моря весьма различна. Поля сезонных концентраций сероводорода достаточно объективно по сравнению с ранее описанными в литературе характеризуют пространственную их изменчивость в каждом сезоне за 26-летний период наблюдений. Изменчивость этих полей по акватории моря достаточно существенна: весной средние концентрации сероводорода, свойственные каждому квадрату, 0,06—0,52 мг/л, летом — 0,08—0,56 мг/л, осенью — 0,08—0,44 мг/л, зимой — 0,04—0,46 мг/л. Последние численные данные также свидетельствуют о весьма важном интересном выводе: несмотря на значительную изменчивость средних сезонных концентраций сероводорода, свойственных каждому квадрату, пределы их колебаний в каждом сезоне за весь многолетний период близки между собой, и, следовательно, существовала в этот период определенная внутригодовая устойчивость осредненного поля концентраций сероводорода. Таким образом, процессы изменчивости полей концентраций сероводорода по горизонту 150 м во все сезоны года протекали хотя и в значительных, но практически в одинаковых рамках. Неравномерность и немонотонность изменчивости структур сезонных полей концентраций сероводорода характеризуются существованием областей максимальной концентрации, обладающих различными размерами и местоположением в каждом сезоне года. Например, в центрах западного, центрального и восточного циклонических круговоротов (квадраты 37, 60, 68) средние концентрации сероводорода гораздо выше, чем в прибрежных районах моря. Так, летом 1960—1985 гг. в квадрате 37 средняя концентрация 0,56 мг/л, максимальная — 2,28 мг/л, а в прибрежных районах моря средняя концентрация 0,03—0,15 мг/л, а максимальная достигала 1,34 мг/л (квадрат 44).

Осенью средние и максимальные концентрации на горизонте 150 м могут быть несколько ниже, чем летом, для одних и тех же квадратов. Например, в квадрате 37 средняя концентрация 0,44 мг/л, а максимальная — 1,3 мг/л. Максимальная концентрация в квадрате 35 достигала 1,85 мг/л при средней 0,26 мг/л. В центре восточной части моря (например, квадрат 53) средняя концентрация сероводорода была 0,61 мг/л, а максимальная не превышала 0,73 мг/л. В центре западной области (квадрат 60) средняя и максимальная концентрации были несколько выше: 0,41 и 1,02 мг/л соответственно. В прибрежных районах моря средние концентрации колебались от 0,01 до 0,33 мг/л, а максимальные достигали 1,21 мг/л (например, квадрат 82). Весной максимальная концентрация наблюдалась в центре западной части моря (квадрат 60) и достигала 2,84 мг/л при средней 0,55 мг/л. В центральной области моря (квадрат 37) максимальная концентрация не превышала 1,65 мг/л, а средняя составляла 0,52 мг/л. В центре восточной части моря (квадрат 53) эти концентрации соответственно 1,23 и 0,32 мг/л. В прибрежных районах моря средние концентрации весной колебались от 0,06 до 0,23 мг/л, а максимальная достигала 1,18 мг/л (квадрат 25).

Зимой средние и максимальные концентрации сероводорода на горизонте 150 м несколько выше, чем в остальные сезоны года. Так, в квадрате 37 средняя концентрация сероводорода 0,39 мг/л, а максимальная — 0,79 мг/л; в западной части моря (квадрат 59) средняя концентрация сероводорода 0,44, а максимальная не превышала 1,24 мг/л; в восточной части (квадрат 82) средняя — 0,46, а максимальная — 1,65 мг/л.

Таким образом, положение областей с высокими средними концентрациями сероводорода приурочено к центрам циклонических круговоротов (западного, центрального и восточного), и внутригодовая динамика их размеров и положения должна определяться внутригодовой динамикой указанных циклонических круговоротов.

Значения средних квадратических отклонений свидетельствуют, что временная изменчивость концентраций сероводорода в каждом квадрате весьма значительна внутри каждого сезона в течение 1960—1985 гг.

Колебания средних годовых концентраций сероводорода лежат в пределах 0,15—0,46 мг/л, максимальных — в пределах 0,50—2,84 мг/л. При этом характер изменчивости как средних годовых, так и максимальных концентраций отличается немонотонностью. Последняя формируется не только под влиянием естественного изменения среднего содержания сероводорода на горизонте, но и под влиянием пространственной динамики его концентраций в различные периоды времени, а также вследствие смены сети станций наблюдений в процессе исследований различия годовых рядов наблюдений.

Процесс изменчивости во времени структуры полей сероводорода на горизонте 150 м вследствие сложности ее не ведет к однозначным результатам, а поэтому выводы, получаемые из сравнения структуры полей сероводорода, приуроченных к двум, например, экспедициям, нельзя экстраполировать или даже интерполировать не только на значительные периоды времени, но и даже на весьма короткие периоды.

В осредненном за 13-летний период (1973—1985) времени поле сероводорода четко выявлены три зоны сравнительно высоких концентраций сероводорода (0,4 мг/л) или две зоны, ограничиваемые изолиниями 0,3 мг/л, которые приурочиваются к зонам циклонических круговоротов вод. Для поля коэффициентов вариаций за период 1960—1985 гг. свойственны следующие особенности. Максимумы коэффициентов вариации (более 150 %) расположены на периферии анаэробной зоны (квадраты 21, 22, 41, 44, 45, 55, 56, 70, 73, 74), а минимумы (70 % и менее) — фактически в центрах западного, восточного и центрального циклонических круговоротов. Такое распределение коэффициентов вариации сероводорода на глубине 150 м свидетельствует о более высокой степени динамики концентраций сероводорода на границах анаэробной зоны, имеющих повышенную динамику вод

(цит. по [139]). Эта зависимость в виде уравнения регрессии с коэффициентом корреляции $r = 0{,}92...0{,}97$, полученного с применением метода наименьших квадратов, имеет вид $V = 53\,C^{-0{,}72}$, где V — коэффициент вариации, %, C — среднее значение концентрации сероводорода на станции, мг/л.

Зоны повышенных концентраций сероводорода, которым соответствуют зоны пониженных значений V, следовательно, достаточно устойчивы и относительно менее динамичны. Менее устойчив режим сероводорода не только на периферии анаэробной зоны, но и в районах, разделяющих зоны повышенных концентраций сероводорода ($V \sim 80...90$). Несомненно, что решающее значение в формировании большой неустойчивости режима сероводорода имеет интенсивный доступ растворенного кислорода из верхних слоев воды.

Между содержанием сероводорода и растворенного кислорода на горизонте 150 м существует хорошая корреляция ($r = -0{,}7$), описываемая уравнением регрессии

$$C_{H_2S} = 0{,}29 - 0{,}48 \lg C_{O_2},$$

где C_{H_2S} — концентрация сероводорода, мг/л; C_{O_2} — концентрация растворенного кислорода, мг/л.

Наличие такой зависимости существенно отличает состояние поля сероводорода на горизонте 150 м от его состояния на горизонте 100 м. Причины таких различий лежат, по-видимому, в различиях между степенями динамики вод на обоих горизонтах и в различиях между значениями концентраций сероводорода на этих горизонтах. По тем же причинам на горизонте 150 м проявляется корреляционная зависимость между концентрациями сероводорода и соленостью, имеющая вид

$$\sqrt{C_{H_2S}} = 0{,}90S - 18{,}39,$$

где S — соленость, ‰.

Коэффициенты корреляции различны для различных районов моря: например, в центре западного циклонического круговорота $r = 0{,}62...0{,}68$, в прикрымском районе $r = -0{,}4$, в прибосфорском районе $r = 0{,}35$.

Аналогичная вышеприведенной зависимости, выявлена зависимость между концентрациями сероводорода и условной плотностью σ_t, которая имеет вид:

$$\sqrt{C_{H_2S}} = 1{,}19\sigma_t - 18{,}98.$$

Коэффициенты корреляции для этого уравнения регрессии в зонах циклонических круговоротов $r = 0{,}66$, а в прибосфорском и прикрымском районах — соответственно $r = 0{,}57$ и $r = -0{,}52$.

Как и на горизонте 100 м, имеет место корреляционная связь между концентрацией сероводорода и температурой воды. Например, для центра западной части моря ($r = 0{,}76$) уравнение регрессии имеет вид

$$C_{H_2S} = 3{,}35T - 28{,}49,$$

где T — температура воды, °С.

5.3.4. Слой воды 200—250 м

Более высокие значения концентраций сероводорода создают определенные отличия в закономерностях распределения сероводорода на горизонте 150 м и нижележащих горизонтах (200 и 250 м). Сероводород обнаруживался на горизонтах 200 и 250 м во всех экспедициях на подавляющем большинстве станций.

Согласно проведенным наблюдениям в 1973 г. сероводород не обнаруживался на горизонте 200 м только в прибосфорском районе, воды которого содержали 0,39—1,35 мг/л растворенного кислорода при солености 21,15—21,38 ‰ и температуре 8,61—9,12 °С. Приведенные данные по солености и температуре несколько выше данных по этим показателям для вод других станций горизонта 200 м, поэтому, очевидно, воды станций прибосфорского района в 1973 г. находились под влиянием вод нижнебосфорского течения. Аналогичные ситуации в прибосфорском районе возникали в феврале и ноябре 1974 г. (концентрация растворенного кислорода 2,74 мг/л, в июне 1975 г., в ноябре 1979 г. и в декабре 1980 г. На горизонте 250 м в прибосфорских водах сероводород не обнаруживался реже, чем на горизонте 200 м: в 1973, 1975, 1977 и 1980 гг. Соленость и температура этих вод на горизонте 250 м также максимальны по отношению к водам остальной акватории моря, что тоже свидетельствует о влиянии вод нижнебосфорского течения на глубинах 250 м.

В 1974 г. на горизонте 200 м сероводород не обнаруживался на отдельных станциях в различных районах акватории. Такая же ситуация была характерной и для последующих периодов исследования вплоть до 1982 г. включительно. В эти годы в ряде проб воды определялись высокие концентрации растворенного кислорода: в октябре 1977 г.— 5,39 мг/л, в сентябре 1979 г.— в центре моря 8,24 мг/л при солености 20,89 ‰. Следовательно, в районе этой станции в период исследования наблюдалось локальное опускание поверхностных вод до глубин 200 м. В 1981 и 1982 гг. отсутствие сероводорода наблюдалось уже только на одной станции в разных районах моря.

Отсутствие сероводорода, а также наблюдаемый уровень значений солености (20,76—21,51 ‰) и температуры воды (8,46—8,91 °С) на глубинах 250 м свидетельствуют о проявлении влияния поверхностных вод моря не только в прибосфорском, но и в других районах моря.

Характер распределения сероводорода после 1974 г. в основных чертах был аналогичен характеру его распределения в предыдущий период.

Осредненные поля концентраций сероводорода за 1973—1985 гг. на горизонтах 200 и 250 м имеют по три зоны повышенного содержания сероводорода, расположенные в центральной, западной и восточной частях моря. Эти зоны по расположению и размерам практически совпадают для обоих горизонтов, что свидетельствует об устойчивости структуры средних годовых полей сероводорода. Структура этих полей хорошо совпадает со структурой поля на горизонте 150 м. Характер устойчивости полей сероводорода и их динамика в пространстве и времени выявляются при рассмотрении распределения коэффициентов вариации концентраций сероводорода по акватории моря за 1960—1985 гг. Зонам повышенных концентраций сероводорода соответствуют на горизонтах 200 и 250 м зоны минимальных коэффициентов вариации, ограничиваемые изолиниями 35—50 % (горизонт 200 м) и 30—40 % (горизонт 250 м).

Степень пространственно-временной динамики концентраций сероводорода в каждой из зон в слое 200—250 м несколько различна, так как коэффициенты вариации в зонах их минимумов уменьшаются с запада на восток. Следовательно, в данном слое вод временная динамика концентраций сероводорода в водах восточной части моря была менее значима по сравнению с таковой в водах западной части моря.

С увеличением глубины от 150 до 250 м устойчивость полей концентраций сероводорода возрастает, пространственно-временная динамика значений этих концентраций падает, что подтверждается уменьшением коэффициентов вариации. Например, в зоне наибольших концентраций сероводорода, расположенной в восточной части моря, коэффициенты вариации по ограничивающим их изолиниям уменьшаются с 70 до 30 % при увеличении глубины от 150 до 250 м. Следует также отметить и характерную особенность поля коэффициентов вариации на горизонте 250 м, отсутствующую на более высоких горизонтах, и заключающуюся в том, что в районе вод, примыкающих к северо-западной части моря, также выявлена зона с минимальными значениями коэффициентов вариации, ограничиваемая изолинией 30 %. Следовательно, воды между горизонтами 200 и 250 м являются в определенной мере граничными между водными массами, которые различаются характером пространственной динамики концентраций сероводорода.

Между содержанием сероводорода на горизонте 200 м и физическими характеристиками морской воды (температура, соленость, плотность) существует хорошая корреляционная связь. Так, характерное уравнение регрессии между сероводородом и плотностью, имеет вид

$$C = 1{,}08\sqrt{\sigma_t} - 4{,}30,$$

где C — концентрация сероводорода, мг/л; σ_t — условная плотность, отн. ед. Коэффициент корреляции между C и σ_t в зонах вод циклонических круговоротов гораздо выше ($r = 0{,}83$), чем в других районах моря (например, в прибосфорском и прикрымском районах; в квадратах 23, 24, 25, 74 $r = 0{,}4$). Столь слабую корреляционную связь между содержанием сероводорода и физическими свойствами воды (для температуры и солености в этих квадратах $r = 0{,}4$) можно объяснить влиянием средиземноморских вод на воды прибосфорского района и речных вод, богатых кислородом и имеющих другие физические характеристики, на воды прикрымского района моря.

Между содержанием сероводорода и соленостью вод в квадратах 60 и 46, расположенных в центре восточного циклонического круговорота, характерное уравнение регрессии имеет вид ($r = 0{,}9$):

$$\lg C = 64{,}07 \lg S - 85{,}58,$$

где S — соленость, ‰.

Между содержанием сероводорода и температурой характерное уравнение регрессии (для тех же квадратов) имеет вид ($r = 0{,}7$):

$$\lg C = 57{,}75 \lg T - 55{,}5,$$

где T — температура, °С.

Для вод прибрежных районов (например, квадрата 41) коэффициент корреляции составляет 0,2—0,3. Очевидно, что такое положение формируется под влиянием повышенной по сравнению с центральными районами динамикой вод и частым отсутствием сероводорода на горизонте 200 м в прибрежных районах.

5.4. Слой 300—1500 м

5.4.1. Горизонт 300 м

Следует подчеркнуть, что, несмотря на значительный массив проведенных наблюдений, плотность числа наблюдений в одних и тех же сезонах года по акватории моря весьма различна, так же как и на горизонте 150 м. Так, в весенний сезон число наблюдений менялось от квадрата к квадрату в пределах 3—17, в летний сезон — 1—28, в осенний сезон — 3—24, в зимний сезон — 1—19. Весьма существенна и изменчивость средних концентраций сероводорода в каждом сезоне от квадрата к квадрату по акватории моря. Например, в весенний и летний сезоны средние концентрации сероводорода в квадратах 1,37—2,58 мг/л, в осенний — 1,06—2,43 мг/л, в зимний — 1,52—2,58 мг/л. В то же время эта изменчивость проявляется относительно в меньшей степени по сравнению со степенью изменчивости аналогичных концентраций на горизонте 150 м, что, впрочем, естественно, так как и динамика вод на горизонте 300 м ниже, и концентрации сероводорода — выше.

Обращает на себя внимание также то обстоятельство, что интервалы внутрисезонной изменчивости средних для квадратов концентраций сероводорода на горизонте 300 м близки между собой. Неравномерность и немонотонность изменчивости структур сезонных полей концентраций сероводорода, осуществляющейся практически в одинаковых пределах для всех сезонов года, характеризуется существованием областей наибольших его концентраций, имеющих различные размеры и местоположение в каждом сезоне года. Характеристика структуры сезонных полей концентраций сероводорода на горизонте 300 м в общих чертах аналогична характеристике таких полей на горизонте 150 м.

Выделяются две области повышенных концентраций сероводорода, ограниченные изолиниями 2,3 и 2,7 мг/л, которые постоянно наблюдались в течение года по всей акватории моря. Во все сезоны года одна из областей находилась в восточном районе моря, несколько меняя местоположение и размеры от сезона к сезону. Вторая область располагается в центральном и частично в западном районе моря, также меняя местоположение и свои размеры в зависимости от сезона. В характере сезонного распределения сероводорода на горизонте 300 м можно выявить определенные аналогии с таким же характером на горизонте 150 м. В то же время выявлено и определенное расхождение в структуре сезонных полей сероводорода на горизонтах 150 и 300 м, состоящее в различном количестве зон повышенных значений средних сезонных концентраций сероводорода. Характерным оказалось также существование зоны высоких концентраций сероводорода в осенний период в юго-восточном районе моря.

В период 1960—1985 гг. положение областей с высокими средними концентрациями сероводорода было в основном приурочено к районам циклонических круговоротов, и поэтому внутригодовая динамика их размеров и местоположения должна определяться внутригодовой пространственной динамикой циклонических круговоротов.

Уровни значений средних квадратических отклонений свидетельствуют, что на горизонте 300 м временная изменчивость концентраций сероводорода в каждом квадрате, хотя и меньше, чем на горизонте 150 м, но все же весьма значительна внутри каждого сезона в течение 1960—1985 гг.

Межгодовая изменчивость содержания сероводорода свидетельствует о существенных колебаниях средних годовых концентраций сероводорода. Значительны колебания также минимальных и максимальных концентраций сероводорода, пределы которых для минимальных значений составляют 0,08—1,64 мг/л, а для максимальных 2,75—8,33 мг/л. Характер изменчивости как средних, так и экстремальных значений концентраций сероводорода отличается немонотонностью.

Таким образом, характер распределения сероводорода по акватории моря на горизонте 300 м меняется существенно и за длительные, и за сравнительно короткие промежутки времени.

Осредненное поле концентраций сероводорода за 1973—1985 гг. на горизонте 300 м имеет три зоны его повышенного содержания (более 2,4 мг/л), расположенные, как и на вышележащих горизонтах, в центральной, западной и восточной частях моря.

Структура этого поля несколько отличается от структур сезонных полей распределения сероводорода за 1963—1983 гг., так как на последних не выявлена третья зона повышенного содержания сероводорода. Последнее обстоятельство может быть объяснено различием в периодах осреднения полей, и до 1973 г. ряды наблюдений были несколько отличны от таковых после 1973 г.

Структура поля значений коэффициентов вариации концентраций сероводорода на этом горизонте близка к описанной выше структуре аналогичного поля на горизонте 250 м. Но имеются определенные различия, формирующиеся под влиянием различий океанографических условий существования вод на горизонтах 300 и 250 м. Во-первых, коэффициенты вариации на горизонте 300 м заметно ниже, чем на горизонте 250 м по всей акватории моря. Во-вторых, зоны наименьших значений коэффициентов вариации (менее 25—30 %) на горизонте 300 м в большей мере не совпадают с зонами максимальных значений концентраций сероводорода, чем на горизонте 250 м. В третьих, в водах вдоль Кавказского побережья на горизонте 300 м выявилась сплошная область низких значений обсуждаемых коэффициентов (менее 25—30 %), и практически исчезла область высоких значений коэффициентов в западном районе моря. Характерным явилось также то, что в отдельных случаях для высоких концентраций сероводорода (например, в прикрымском районе) были свойственны на горизонте 300 м высокие значения коэффициентов вариации, а для низких концентраций сероводорода (например, в юго-западном районе) — низкие значения коэффициентов вариации.

5.4.2. Горизонт 500 м

Для этого горизонта внутри каждого сезона распределению на акватории моря средних для квадратов концентраций сероводорода, а также его экстремальных концентраций, свойственны неравномерность и немонотонность. Степень такой неравномерности довольно значительна и близка к таковой для горизонта 300 м. Так, например, отношения минимальной средней к максимальной средней для квадрата концентрации сероводорода в осенний и зимний сезоны практически совпадали, а в весенний и летний — различались не столь существенно (для горизонта 300 м — 0,52, для горизонта 500 м — 0,65). На этом горизонте колебания средних концентраций сероводорода происходили в пределах (мг/л): 3,20 (квадрат 73) — 4,80 (квадрат 35) весной, 3,19 (квадрат 44) — 5,01 (квадраты 21, 22, 49) летом, 2,43 (квадрат 44) — 5,30 (квадрат 48) осенью и 3,38 (квадрат 40) — 5,52 (квадрат 45) зимой.

Максимально-разовые концентрации сероводорода за весь период наблюдений (по 1985 г.) для всех сезонов 4,10—8,65 мг/л, а минимально-разовые концентрации — примерно 0,06—5,01 мг/л.

Неравномерность и немонотонность распределения концентраций сероводорода, характеризуемые структурой поля средних годовых его концентраций за 1973—1985 гг., имеют следующий вид. Зоны повышенного содержания сероводорода (выявлены три таких зоны) ограничены изолиниями концентраций 4,6 мг/л. Размеры зон и их конфигурация существенно отличались от таковых на горизонте 300 м, что может, в частности, свидетельствовать о существовании различий в характере динамики вод на обоих горизонтах.

Структура поля коэффициентов вариации на горизонте 500 м также существенно отличается от таковой на горизонте 300 м. Так, в районе вод, примыкающем к северо-западной части моря, коэффициенты вариации были максимальны (20 % и более). Минимальные значения этих коэффициентов (15 % и менее) были свойственны незначительной по размерам зоне в центре моря, соответствующей зоне высоких концентраций сероводорода, и огромной по размерам зоне в восточной половине моря, которая только частично располагалась в зонах высоких концентраций сероводорода. Третья зона низких значений коэффициентов вариации располагалась на юге центральной части моря в области низких значений концентраций сероводорода.

Поле сероводорода на горизонте 500 м, являясь менее динамичным по сравнению с полем на горизонте 300 м, более устойчиво во времени, так как, в частности, совпадают данные о среднем содержании сероводорода на горизонте за 1973—1985 гг. (4,6 мг/л) и данные за 1963—1978 гг. Вместе с тем сравнительный анализ данных по средним квадратическим отклонениям от средних сезонных концентраций для квадратов показывает, что изменчивость этих величин более существенна во все сезоны на горизонте 500 м. Так, только в весенний сезон значения отношений максимальное/минимальное средние квадратические отклонения для обоих горизонтов совпадали, а в остальные сезоны эти отношения были выше на горизонте 500 м (пределы колебаний этих

отклонений составляли летом 0,30—0,90, осенью — 0,30—0,80 и зимой — 0,10—1,20). Характерно также, что экстремальные значения средних квадратических отклонений практически не соответствовали экстремальным значениям средних концентраций сероводорода в квадратах, исключая квадрат 21 в летний сезон.

Этому горизонту свойственна немонотонная изменчивость средних годовых концентраций сероводорода, находящаяся в пределах 3,8—4,7 мг/л. Весьма значительны и колебания ежегодных экстремальных концентраций сероводорода: пределы минимальных концентраций 0,4—3,6 мг/л, пределы максимальных — 4,8—8,8 мг/л. Максимумы средних годовых концентраций приходились на 1955, 1969, 1979, 1984 гг.

5.4.3. Слой воды 1000—1500 м

Многолетняя динамика (1973—1985) поля сероводорода на горизонтах 1000 и 1500 м оценивается распределением коэффициентов вариации концентраций сероводорода. Следует, во-первых, отметить, что коэффициенты вариации в общем случае по своим значениям заметно ниже на горизонте 1000 м по сравнению с горизонтом 1500 м и лежат в интервале несколько ниже 9 % и несколько выше 15 %. Зоны минимальных коэффициентов вариации (9 % и менее) располагались в восточной и в центральной частях моря и по своему положению близки к аналогичным зонам на горизонте 1500 м. В этом смысле структура поля, несмотря на более низкую степень динамики концентраций, сходна со структурой аналогичного поля на горизонте 1500 м.

Во-вторых, интервал значений коэффициентов вариации на горизонте 1500 м практически не отличался от такового на горизонте 1000 м, так как составлял 8—16 %, также и структура распределения этих величин по акватории моря близка. Например, зоны наименьших значений этих коэффициентов (8 и 9 %) сходны для горизонтов 1000 и 1500 м. Также сходны на этих горизонтах по расположению зоны высоких значений коэффициентов вариации в районе Крыма и на юго-востоке восточной части моря. Однако в той же восточной части моря в ее центре на горизонте 1500 м проявилась зона сравнительно высоких значений коэффициентов вариации (12 % и более), в то время как на горизонте 1000 м в этом районе находились зоны низких значений, составлявших 9 % и менее.

Из данных следует, что для слоя вод 1000—1500 м неравномерность в распределении средних для квадратов концентраций сероводорода достаточно велика во все сезоны года. Действительно, например, в летний и осенний сезоны, в которые получены наибольшие по сравнению с весенним и зимним сезонами массивы наблюдений, средние для квадратов концентрации сероводорода колебались в пределах 6,80—9,56 мг/л на горизонте 1000 м и 7,74—10,63 мг/л на горизонте 1500 м. Средние квадратические отклонения от средних концентраций сероводорода в квадратах варьировали также в практически одинаковых интервалах значений: в летне-осенний сезоны на горизонте 1000 м — 0,4—1,5 мг/л, на горизонте 1500 м — 0,4—1,8 мг/л.

В заключение отметим, что значения средних годовых концентраций сероводорода за последние 10—20 лет имели тенденцию к некоторому увеличению на горизонтах 300 и 1000 м (соответственно на 0,3 и 0,6 мг/л) и, в то же время, такая тенденция не выявилась для горизонта 500 м.

Также прослежена корреляционная связь между содержанием сероводорода, с одной стороны, и температурой, соленостью и плотностью воды, с другой стороны. С глубиной коэффициенты корреляции между некоторыми параметрами могут несколько изменяться в этом слое, а в отдельных районах (например, прибосфорский) при приближении к горизонту 1000 м вновь возрастают до значительных.

Для примера приводятся ниже следующие зависимости (C — мг/л; S — ‰; T — °С; σ_t — усл. плотность):

Горизонт, м	Уравнение регрессии	Коэффициент корреляции	Номер квадрата, сезон
300	$\lg C = 42{,}3 \lg S - 56{,}3$	0,74	60, 74; летний
	$\lg C = 22{,}1 \lg S - 36{,}9$	0,55	41; летний
	$\lg C = 39{,}3 \lg T - 37{,}0$	0,75—0,83	23—25; летний
		0,55	41; летний
	$C = 2{,}99\sigma_t - 44{,}32$	0,70	74
	$C = 3{,}2\sigma_t - 51{,}3$	0,60	53
500	$C = 8{,}04S - 173$	0,5—0,8	Все квадраты; летний
	$\lg C = 139{,}2 \lg T - 132{,}2$	0,4—0,6	Все квадраты; зимний
	$\lg C = 113{,}2 \lg \sigma_t - 139{,}2$	0,40—0,60	Все квадраты
1000	$\lg C = 34{,}0 \lg S - 45{,}1$	0,85	74; летний
	$C = 22{,}0T - 190$	0,6	23—25; летний
	$\lg C = 20{,}0 \lg T - 18{,}3$	0,95	53; летний
1500	$C = 8{,}56S - 181$	0,5	53; летний
	$C = 33{,}5T - 22{,}5$	0,5	35; 53; летний

Поскольку значения представленных выше коэффициентов корреляции в слое 300—1500 м фактически совпадают с аналогичными в слое 150—200 м, то связь между концентрацией и соленостью в слое 150—1500 м достаточно устойчива.

Для целого ряда квадратов в летний сезон, имеющий наибольший массив наблюдений, рассчитаны коэффициенты корреляции и выведены уравнения регрессии между концентрацией сероводорода и температурой воды.

Из этих данных следует, что связь между концентрациями сероводорода и температурой воды в слое 300—1500 м так же достаточно устойчива, как и в слое 150—200 м. Характер уравнений регрессии в обоих слоях воды аналогичен: существует и линейная и логарифмическая зависимости.

На горизонте 500 м для летнего сезона выявлена корреляционная зависимость между концентрацией сероводорода и pH с коэффициентом $r = -0{,}54$. Уравнение регрессии в этом случае имело вид $C = 29{,}1 - 3{,}2$ pH.

5.5. Глубинные воды

Закономерности распределения сероводорода в глубинных водах рассмотрены на примере горизонта 2000 м. Наиболее интенсивно этот горизонт исследовался в летне-осенние сезоны (635 наблюдений), для которых почти во всех квадратах рассчитаны средние квадратические отклонения от средних значений концентраций сероводорода. Делается вывод о существенной изменчивости средних сезонных концентраций сероводорода от квадрата к квадрату даже на горизонте 2000 м. Например, летом и осенью эти концентрации колебались в пределах: 9,1 (квадрат 34)— 11,4 мг/л (квадраты 37, 50) и 9,7 (квадраты 27, 34, 58)— 11,5 мг/л (квадрат 68). В то же время, эта изменчивость на горизонте 2000 м проявляется относительно в меньшей степени по сравнению с аналогичной изменчивостью на вышележащих горизонтах (отношение минимальной к максимальной средней концентрации для квадратов на горизонте 2000 м составляет 0,8 и более в летний и осенний сезоны).

Максимально-разовые концентрации в квадратах для всех сезонов за период наблюдений 1960—1985 гг. наблюдались в пределах 10,2—14,7 мг/л, а минимально-разовые — 5,6—99 мг/л.

Степень межгодовой изменчивости средних концентраций сероводорода также достаточно велика: предел колебаний средних годовых концентраций сероводорода 8,3—11,2 мг/л. Значительны при этом также колебания годовых минимальных (5,8—9,4 мг/л) и максимальных (9,4—14,7 мг/л) концентраций. Кроме того, характеру изменчивости средних годовых концентраций свойственна немонотонность. Максимумы средних годовых концентраций сероводорода наблюдались в определенные годы: 1968, 1969, 1979, 1980.

Зоны повышенных концентраций сероводорода, ограничиваемые изолиниями 11,4 мг/л, выделены нами в центральной и восточной частях моря. В западной части моря зона повышенного содержания сероводорода ограничивается изолинией 10,6 мг/л, а с севера и юга изобатой 2000 м. Таким образом, и в придонных водах не только существуют по средним многолетним данным три зоны повышенных содержаний сероводорода, но и географически эти зоны приурочены к областям циклонических круговоротов вод. Обращает также на себя внимание то, что на горизонте 2000 м по аналогии с горизонтем 1500 зоны центральной и восточной частей моря имеют более высокие содержания сероводорода по сравнению с зоной западной части моря.

Динамика распределения сероводорода за 1973—1985 гг. характеризуется интервалом значений коэффициентов вариации: 8—20 %. Наиболее высокие значения коэффициентов (14—20 %) отмечены в квадратах 34, 37, 38, 60, 62, 83, которые расположены по периферии анаэробной зоны, и некоторые из них непосредственно граничат с изобатой 2000 м (квадраты 34, 62). Минимальные значения коэффициентов (8—9 %) были присущи водам квадратов 41, 45, 47, 48, 54, 59, 61, 67, 82, 84.

Можно также отметить, что средние концентрации сероводорода в глубинной зоне вод (1500—2000 м) по представленным данным за последние 10 лет стали при их оценках выше примерно на 0,9 мг/л, несмотря на внутригодовые и многолетние их колебания.

Как и вышележащим горизонтам, глубинным водам свойственна мелкомасштабная временная динамика концентраций сероводорода, которая в предыдущих разделах не рассмотрена. Результаты исследований показали, что в период исследований имела место заметная временная динамика концентраций на всех исследованных горизонтах. Например, даже на горизонте 2000 м при средней концентрации сероводорода 10,3 мг/л диапазон ее изменения составлял за 10-суточный срок 8,3—11,7 мг/л. Для других горизонтов диапазон изменения концентраций составлял: 7,1—10,5 (1500 м), 6,2—9,6 (10000 м), 5,0—8,8 (800 м), 3,3—5,0 (500 м), 0,8—2,6 (300 м) и 0,3—0,9 мг/л (200 м).

Представленные выше данные по пространственно-временной изменчивости полей концентраций сероводорода дают возможность получить осредненные характеристики их распределения и динамики по всей толще анаэробной зоны за весь период исследований, из которых делаются также существенные выводы.

По мнению Б. А. Скопинцева (цит. по [139]), «схожесть вертикального распределения сероводорода и хлорности и дает основание говорить об общности механизма, обуславливающего распределение основных компонентов солевого состава и сероводорода в толще Черного моря». Таким механизмом является вертикальное перемещение вод, и в этом случае продуцирование сероводорода и хлорности должно происходить в основном у поверхности дна моря.

Заметное возрастание содержания сероводорода и хлорности с увеличением глубины от 2000 до 2200 м может свидетельствовать о существовании источников обоих ингредиентов у дна моря.

В общем случае вертикальное распределение концентрации сероводорода, согласно работе [139], можно описать эмпирическим уравнением:

$$C = C_m [1 - \exp(-\alpha z^2)],$$

где z — глубина, км; C_m — средняя концентрация сероводорода на максимальной глубине, мг/л; α — коэффициент, равный в среднем 2, однако в зоне сосуществования кислорода и сероводорода он может понижаться до 1.

Для этого горизонта справедливо уравнение регрессии с коэффициентом корреляции 0,7:

$$C = 3{,}5T - 21{,}1,$$

где C — средняя годовая концентрация сероводорода по всей акватории, мг/л; T — средняя годовая температура воды для всей акватории, °С.

В то же время на горизонте 1500 м коэффициент корреляции между C и T в лучших случаях (в отдельных квадратах) не превышал 0,5.

5.6. Проблемы происхождения сероводорода в море

По данным Ю. И. Сорокина (цит. по [139]), скорости образования сероводорода путем бактериальной сульфат-редукции наиболее высоки на периферии анаэробной зоны и, в частности, он нашел, что на глубине 300 м, на склоне против

г. Батуми, продуцируется сероводород до 115 мг/(м²·сут). По мнению этого автора, «...скорость образования сероводорода в илах Черного моря, равно как и распределение в них концентрации сероводорода, коррелирует с распределением первичной продукции». В то же время, как показано выше, зоны повышенного содержания сероводорода расположены в центральной части моря на глубинах 1500—2000 м.

Местоположение квадратов с максимальными средними квадратическими отклонениями, коэффициентами вариации и концентрациями сероводорода находятся над крупнейшими разломами (квадраты 25, 34, 39, 58, 62, 69, 83) или над крупнейшими положительными структурами (квадраты 37, 38, 52, 60). Именно в этих местах наиболее вероятен выход ювенильных вод, соленость и химический состав которых колеблются в широких пределах в зависимости от химического состава иловых вод на различных глубинах от дна моря.

Вычисленная в работе [139] скорость накопления сероводорода в Черном море в годы максимальной солнечной активности 100—500 г/(м² × × год). Тогда при площади моря $238 \cdot 10^3$ км² с глубинами более 1500 м (именно с этих глубин заметно увеличиваются коэффициенты асимметрии, эксцесса и вариации, а также средние квадратические отклонения) ежегодное поступление сероводорода в море $(2{,}4 - 9{,}5) \cdot 10^7$ т, что близко к вычислениям Зеленова по факелам $(3{,}0 \cdot 10^7$ т).

Аналогичные данные получены в работе [142]. Было показано, что количество сероводорода в глубинных водах не эквивалентно относительному уменьшению концентраций SO_4^{2-} по вертикали, если принять, что весь сероводород в глубинных водах образуется из SO_4^{2-}. На основе анализа вертикального хода соотношения SO_4^{2-}/Cl (где SO_4^{2-} — концентрация ионов и Cl — хлорность) и учета объема поступления средиземноморских вод с высоким значением этого соотношения (0,1396) можно предположить существование субмаринной разгрузки вод с низким значением этого соотношения (по расчетам такая разгрузка составила 130 км³/год). Эти же данные позволили рассчитать среднюю скорость подъема вод моря (1,2 м/год) и скорость образования сероводорода при предположении, что при подъеме вод соотношение концентраций SO_4^{2-}/H_2S сохраняется постоянным и равным примерно 150. По рассчитанным данным скорость поступления сероводорода в глубинные воды моря примерно $3 \cdot 10^7$ т.

Данные исследований, изложенные выше, в определенной мере совпадают и существенно дополняют выводы работ [139] о влиянии солнечной геомагнитной активности на геофизические, геохимические и биологические процессы, происходящие на Земле и, в частности, в Черном море.

На возможность существования в условиях анаэробной зоны моря абиогенной сульфат-редукции, как нового источника поступления сероводорода в воды моря, показывают результаты теоретических исследований реакций взаимодействия растворенных соединений органических веществ с сульфатионами с применением химической термодинамики. По расчетам во внебактериальной водной среде термодинамически разрешены реакции сульфатредукции с определенными классами органических веществ, к которым относятся, например, соединения муравьиного альдегида, уксусной кислоты, метана, этилена, глюкозы. В частности, реакция с глюкозой представляется схемой

$$3SO_4^{2-} + C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 3H_2S + 6HCO_3^-,$$

имеющей термодинамические параметры: $\Delta H_f^0 = -278$ кДж/моль; $\Delta S^0 = 521$ Дж/(моль · К); $\Delta L_f^0 = -433$ кДж/моль и $\ln K_r = 175$ при $T = 298$ К и $P = 10^5$ Па.

Далее в условиях анаэробной зоны моря термодинамически запрещены реакции сульфат-редукции даже с легкими углеводородами нефти (бензол, декан).

На данный источник поступления сероводорода фактор солнечной активности может влиять опосредованно через скорость продукции реакционноспособного органического вещества, которая увеличивается с ростом солнечной активности.

Продолжением работ в этом направлении являются исследования В. Б. Белявской и Л. В. Явишкиной, которые также теоретически показали, что сероводород химическим путем может образовываться при взаимодействии неорганических соединений

$$3SO_4^{2-} + 8NH_3 \longrightarrow 3S^{2-} + 4N_2 + 12H_2O.$$

Для данной реакции стандартные термодинамические функции имеют значения: $\Delta S^0 = -34$ Дж/(моль · К); $\Delta L_f^0 = -227$ кДж/моль и $\ln K_r = 91{,}5$.

6. БИОГЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА

6.1. Кремний

Введение

Для вод моря в современный период, как и в более ранние периоды, формы нахождения кремния в них весьма многообразны и считаются изученными еще недостаточно хорошо. Также можно считать, что кремний содержится преимущественно в растворенном состоянии в виде гидросиликатного аниона $HSiO_3$ и свободной метакремниевой кислоты H_2SiO_3. Одновременно с этим он присутствует в виде разнообразных как по составу, так и по крупности твердых частиц: аморфной кремнекислоты, кристаллических модификаций кремнезема (кварца, тридилита и др.), обломков различного рода глинистых и других силикатных материалов [22].

Источниками кремния в водах моря служат, так же как и ранее, его поступление с речным стоком, с эоловыми выносами, путем растворения пород, слагающих берега и дно. В морской воде кремний переходит из одной формы в другую, мигрирует и вступает в биологические процессы.

Кремний особенно хорошо концентрируется различными гидробионтами, прежде всего диатомовыми водорослями. Так, например, *Chaetoceras*, *Rhizosolenia* содержат кремния более 10 % живой массы, а некоторые кремниевые губки — около 30 % [34, 64].

Режим кремния в период до зарегулирования речного стока достаточно подробно освещен в работах, например, М. А. Добржанской [64], В. Г. Дацко [60], С. Б. Бруевича [29], Я. К. Гололобова [45]. На основании этих исследований сложились следующие представления о распределении и динамике концентраций кремния.

В поверхностном слое содержание кремния относительно однородно (900—1300 мкг/л) В прибрежных районах концентрация кремния обычно

Таблица 48

Среднее содержание кремния в водах Черного моря до зарегулирования речного стока

Глубина, м	Концентрация, мкг/л	Si/S ‰
0	1140	62
10	960	53
25	1080	50
50	1240	66
75	1550	76
100	1600	79
150	1920	92
200	2220	104
300	2820	131
500	3300	152
750	3810	173
1000	4490	202
1250	4820	222
1500	5090	230
1750	5560	244
2000	6450	289
Придонный слой	6670	299

больше, но по данным М. А. Добржанской [64] остается менее 1300 мкг/л. В то же время автор допускает, что в северо-западной части моря в период наибольшего опреснения содержание кремния может достигать более высоких значений. Это предположение подтвердили данные последующих наблюдений.

Вертикальное распределение кремния характеризуется значительным возрастанием его концентраций с глубиной (табл. 48). Исключение составляет слой 10—25 м, где имеет место интенсивное потребление кремния диатомовыми. В этом слое концентрация кремния на 100—200 мкг/л меньше, чем на поверхности.

В отличие от минеральных форм фосфора и азота, выявить какие-либо закономерности в сезонном ходе кремния не удалось. Установлено, что кремний всегда присутствует в водах моря и, таким образом, не является лимитирующим элементом для развития планктона. Очевидно, влияние биологических процессов в регуляции содержания кремния в фотосинтезирующем слое затушевывается на фоне динамики его поступления с речным стоком.

Содержание кремния в водах Черного моря значительно выше, нежели в Мировом океане. Это обусловлено следующими основными факторами: 1) большим материковым стоком, 2) характером пород, слагающих берега, 3) относительно большим значением отношения длины береговой линии к площади моря.

Главенствующая роль в обогащении вод моря кремнием принадлежит речному стоку. Средний многолетний суммарный сток рек с территории СССР до его зарегулирования (1923—1955) примерно 308 км³. Что касается притока кремния в этот период, то надежные сведения имеются лишь для рек Дуная, Днепра, Днестра и Южного Буга

Таблица 49

Поступление кремния в воды моря с речным стоком до его зарегулирования

Река	Год	Водный сток, км³	Сток кремния, тыс. т
Дунай	1948	211	975
	1949	143	646
	1950	146	578
	Среднее за период	167	733
Днестр	1952	7,3	46
	1953	8,3	35
	1954	6,6	33
	Среднее за период	7,4	43
Днепр	Среднее за 1951—1954 гг.	42	145
Южный Буг	1952	2,1	12
	1953	2,7	9,1
	1954	1,4	5,4
	1955	2,4	10
	Среднее за период	2,1	9,3
ВСЕГО (в среднем за периоды наблюдений)		218	930

(табл. 49), водный сток которых изменяется от 77 до 81 % общего водного стока рек, впадающих в Черное море. В результате расчетов А. М. Алмазова [4] установлено, что с водами Дуная, Днепра, Днестра и Южного Буга в Черное море ежегодно поступало 930 тыс. т кремния.

6.1.1. Информация о материалах наблюдений (табл. 50). Аналитические методы

Большинство данных по содержанию кремния получено по методу Дизнер — Вандельбулька, точность и чувствительность которого недостаточно высоки по современным требованиям. Метод основан на колориметрировании кремне-молибденового комплекса в видимой области спектра. Наиболее существенные ошибки при определении наблюдались при малых концентрациях кремния (до 200 мкг/л). Это обусловлено неполным восстановлением желтого кремне-молибденового комплекса до голубого кремне-молибденового гетерокомплекса солью Мора.

В настоящее время (с 1971 г.) в качестве восстановителя используется метолсульфит. При определении малых количеств кремния (200—300 мкг/л) желтый кремне-молибденовый комплекс колориметрируется в ультрафиолетовой области спектра [125, 126].

6.1.2. Динамика концентраций кремния

Предыдущими исследованиями установлено, что распределение кремния по вертикали в водах моря характеризуется увеличением его концентраций с

Таблица 50

Материалы наблюдений по элементам главного биогенного цикла

Дата	Название подразделения	Район наблюдений	Количество проб						
			NO_2	NO_3	NH_4	$N_{орг}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	Si
1973 г.									
III, VII, VIII, IX, X	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	215	23	—	—	238	—	238
III—VII, X, XI	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	426	19	19	—	372	42	—
II, V, VII, VIII, X	МГС «Ялта»	Ялтинский, Гурзуфский заливы, район Алупки	314	—	—	—	285	146	—
XI	ГМБ «Туапсе»	Кавказское побережье от Анапы до Сочи	18	—	—	—	18	—	18
II, V, VIII, XI	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, устьевая область р. Рионн	146	—	—	—	146	—	102
II, III, V, XI	СО ГОИН	Севастопольская бухта, Черное море	180	—	—	—	180	—	180
			945	150	—	—	1602	—	671
1974 г.									
VI, VIII, X, XII	СО ГОИН	Севастопольская бухта	203	—	—	—	203	—	75
		Черное море, район Алупки	52	—	—	—	52	—	—
I—IV, VI—XII	МГС «Ялта»	Ялтинский, Гурзуфский заливы, вековой разрез от м. Кодош	570	—	—	—	570	—	568
I—XII	ГМБ «Туапсе»	Кавказское побережье от Анапы до Сочи	1148	—	—	—	1148	—	1148
V—XI	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	315	—	—	—	315	—	315
VI, VIII	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	230	—	—	—	230	—	—
VI, VIII	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, устьевая область р. Рионн	136	—	—	—	104	—	104
1975 г.									
II, V, VIII, XI	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, устьевая область р. Рионн	136	—	—	—	136	—	136
III, V, VI, IX, X	СО ГОИН	Севастопольская бухта	46	—	—	—	46	—	46
		Черное море	—	—	—	—	286	—	—
VII—X	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	183	—	—	—	183	—	183
I, VI, VIII, XI	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область, вековой разрез от м. Кодош	154	—	—	—	154	—	—
I—IV, VII—X	ГМБ «Туапсе»	Кавказское побережье от Анапы до Сочи	703	—	—	—	703	—	703
I, V, VII	МГС «Ялта»		192	—	—	—	192	—	192
1976 г.									
I, II, V	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	117	—	—	—	90	—	—
V—XI	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	399	—	—	—	399	—	399
I—IX, XI	МГС «Ялта»	Ялтинский и Гурзуфский заливы, район Алупки	374	—	—	—	374	—	261
V—XII	ГМБ «Туапсе»	Кавказское побережье от Анапы до Сочи	673	—	—	—	673	—	673
I, II, V, XI	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн, Чорох	199	—	—	—	199	—	199
XII	СО ГОИН	Севастопольская бухта	—	—	—	—	108	6	—
1977 г.									
I—XII	ГМБ «Туапсе»	Вековой разрез от мыса Кодош, Кавказское побережье от Анапы до Сочи	843	—	—	—	843	—	394
IX	СО ГОИН	Черное море	288	—	—	—	288	—	288
V—XI	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	268	—	—	—	268	—	268
I—XI	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн, Чорох	620	—	—	—	620	—	409
I—XII	МГС «Ялта»	Ялтинский и Гурзуфский заливы, район Алупки	508	—	—	—	508	—	—
V—VIII	ГМО «Николаев»		110	—	—	—	—	—	—
1978 г.									
I—XII	ГМБ «Туапсе»	Вековой разрез от м. Кодош, Кавказское побережье от Анапы до Сочи	827	—	—	—	827	—	827
II, V—X	Дунайская ГМО		—	49	49	—	85	—	71
III	СО ГОИН	Черное море	145	—	—	—	145	—	145
1978 г.									
IV, V, VIII, XI	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	280	—	—	—	280	—	280
V, XI	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн, Чорох	199	—	—	—	199	—	199
V, XI	ГМО «Николаев»	Днепро-Бугская устьевая область	138	—	—	—	—	—	—
1979 г.									
II, III	СО ГОИН	Черное море	177	—	—	—	177	—	177
II, VII, X	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	85	86	—	—	86	85	77
I—IV	ГМБ «Туапсе»	Кавказское побережье, вековой разрез от м. Кодош	1155	—	—	—	1155	—	1155
IX—XI	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн и Чорох	124	—	—	—	124	—	124
IV—XII	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	79	—	—	—	79	—	79

Дата	Название подразделения	Район наблюдений	Количество проб						
			NO_2	NO_3	NH_4	$N_{орг}$	$P_{мин}$	$P_{орг}$	Si
1980 г.									
VI, VIII	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	106	124	—	—	112	91	80
	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн и Чорох	692	—	—	—	691	—	692
I—XII	ГМБ «Туапсе»	Вековой разрез от м. Кодош, Кавказское побережье от Анапы до Сочи	744	—	—	—	744	—	744
1981 г.									
V, VI, XI, XII	СО ГОИН	Черное море	340	18	18	18	339	—	338
VI	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн, Чорох	73	—	—	—	73	—	73
I—XII	МГС «Ялта»	Ялтинский, Гурзуфский заливы, район Алупки	168	—	—	—	168	168	168
1982 г.									
V, VI	СО ГОИН	Черное море	108	—	—	—	108	—	108
I, III, V, VII, IX, XI		Севастопольская бухта	83	18	18	17	83	16	69
VII—IX	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	60	—	—	—	60	—	—
II—VI	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн, Чорох	132	—	—	—	132	—	132
I—XII	МГС «Ялта»	Ялтинский и Гурзуфский заливы, район Алупки	504	253	—	—	521	521	521
	ГМО «Николаев»	Днепро-Бугская устьевая область	85	—	—	—	85	—	85
1983 г.									
VI, VII	СО ГОИН	Черное море	331	46	—	—	129	—	129
I—XII		Севастопольская бухта	84	24	—	—	56	—	84
I—XII	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн, Чорох	141	—	—	—	141	—	141
I—IX	МГС «Ялта»	Ялтинский и Гурзуфский заливы, район Алупки	381	381	—	—	381	381	381
1983 г.									
IV—IX	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	39	—	—	—	39	—	39
IV—IX	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	636	647	603	—	636	—	636
IV—IX	ГМО «Николаев»	Днепро-Бугская устьевая область	248	123	—	—	248	4	248
1984 г.									
IX, X	СО ГОИН	Черное море	214	12	12	—	214	—	214
I—XII		Севастопольская бухта	81	12	—	—	81	—	81
I—IV, VII—X, XII	Дунайская ГМО	Дунайская устьевая область	989	315	—	—	989	—	989
	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн, Чорох	326	—	—	—	326	—	326
I—X	МГС «Ялта»	Ялтинский, Гурзуфский заливы, район Алупки	985	633	375	—	985	601	646
IV—XI	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	502	502	—	—	502	—	502
IV—XI	ГМО «Николаев»	Днепро-Бугская устьевая область	287	287	—	—	278	—	287
1985 г.									
I, II, IV—XII	СО ГОИН	Черное море	445	149	—	—	470	23	424
V—XII	МГС «Ялта»	Ялтинский, Гурзуфский заливы, район Алупки	745	49	494	—	745	494	494
II—XII	ЗГМО «Батуми»	Район Батуми, Поти, Сухуми, устьевая область рек Рионн, Чорох	823	—	—	—	823	—	823
I—XII	ГМБ «Туапсе»	Кавказское побережье от Анапы до Сочи, вековой разрез от м. Кодош	987	—	—	—	987	—	987
	МГС «Одесса»	Западная и северо-западная части моря	84	84	—	—	84	51	84
V—IX	ГМО «Николаев»	Днепро-Бугская устьевая область	474	395	46	—	322	46	416

глубиной [29, 45, 60 64, 70]. Данные табл. 51 свидетельствуют, что и в период 1973—1985 гг. отмеченная закономерность имела место. Такое распределение по вертикали связано с превышением притока кремния над расходом, а также с растворением при процессе седиментации остатков отмерших организмов и их аккумуляции в придонном слое. По данным Е. Кинга и В. Девидсона [186], окончательное растворение организмов происходит за 5 мес. Кроме этого, на придонных горизонтах наблюдается перенос кремния из донных отложений в водный слой. Накопление кремния с глубиной характерно для всех районов моря и наблюдается во все сезоны года. Уже на глубине 100 м содержание кремния обычно в 2—3 раза больше, чем на поверхности. У дна его концентрация достигает 7000—9000 мкг/л [150], что значительно больше по сравнению с глубинными водами океана.

Среднее годовое распределение кремния по вертикали характеризуется подповерхностным минимумом и, как уже отмечалось, последующим увеличением его содержания по мере приближения ко дну. Наиболее часто слой минимальных концентраций кремния залегает на глубинах 10—30 м, где, по наблюдениям Н. В. Морозовой-Водяницкой [117], расположен максимум диатомовых водорослей. Масштабы извлечения кремнекислоты диатомовыми водорослями по их первичной продукции оценены А. Н. Богоявленским [22]. Согласно Г. Г. Винбергу [35], ежегодная продукция

Таблица 51

Межгодовая и сезонная динамика концентраций кремния, 1973—1985 гг.

Сезон	Горизонт, м	Число наблюдений	Концентрация, мкг/л			Среднее квадратическое отклонение, мкг/л
			максимальная	минимальная	средняя	
			1973 г.			
Весна	0	77	650	0	320	140
	10	15	480	0	230	130
	20	45	690	150	330	99
	30	1	—	—	530	—
	50	6	380	190	320	60
	100	6	960	340	610	210
Лето	0	128	2140	40	400	350
	10	53	1220	0	360	260
	20	53	530	40	260	150
	30	5	630	420	520	90
	50	7	650	400	530	100
Осень	0	148	870	20	290	170
	10	127	2200	18	280	220
	20	84	820	18	350	480
	30	72	1040	70	300	190
	50	67	1140	60	390	210
	75	59	1270	110	650	280
	100	55	1490	250	920	330
Зима	0	43	1270	0	440	260
	10	22	490	0	250	170
	20	15	610	150	470	130
			1974 г.			
Весна	0	229	970	40	320	160
	10	112	770	85	320	160
	20	99	820	73	360	180
	30	26	850	0	540	240
	50	29	1360	0	580	320
	75	22	1260	37	750	360
	100	20	2000	40	970	470
Лето	0	307	1570	0	280	240
	10	183	930	0	210	180
	20	141	720	0	240	180
	30	77	990	0	270	220
	50	66	1250	0	370	210
	75	54	2200	0	640	370
	100	36	2900	150	980	520
Осень	0	235	1144	0	400	220
	10	169	1140	0	360	220
	20	138	1040	0	390	230
	30	86	2200	0	520	260
	50	80	1450	10	680	290
	75	76	1930	17	950	440
	100	72	2500	34	1320	560
Зима	0	259	610	24	350	140
	10	148	700	66	350	140
	20	152	760	17	370	140
	30	79	940	100	430	170
	50	77	2600	40	500	370
	75	68	1770	100	760	390
	100	57	1730	130	990	400
			1975 г.			
Весна	0	114	2000	0	400	1730
	10	35	880	17	250	220
	20	62	520	0	170	140
	30	1	—	—	560	—
	50	1	—	—	590	—
Лето	0	159	2000	0	480	340
	10	64	1520	0	640	490
	20	63	820	40	330	100
	30	2	1120	1100	1100	—
	50	6	1190	270	490	320
	75	1	—	—	420	—
	100	3	960	10	490	—
Осень	0	105	2000	80	490	450
	10	58	1470	86	440	380
	20	31	920	170	450	200
	30	8	740	330	550	160
	50	5	620	200	430	130
Зима	0	140	2000	80	360	230
	10	47	570	100	270	120
	20	68	870	110	350	160
	50	4	340	270	340	67
	75	1	—	—	610	—
	100	2	870	780	820	—
			1976 г.			
Весна	0	184	1350	0	360	280
	10	89	1100	0	410	280
	20	57	870	0	300	190
	30	8	680	0	430	260
	50	11	1120	0	520	320
	100	4	1930	0	740	800
Лето	0	131	2200	0	350	330
	10	43	1360	0	550	420
	20	72	1700	0	260	250
	30	9	3000	0	640	890
	50	9	1100	0	490	340
	75	1	—	—	530	—
	100	3	1170	320	750	—
Осень	0	158	2000	30	520	550
	10	57	2000	90	700	370
	20	81	870	60	260	180
	30	12	1160	470	740	180
	50	8	760	90	430	300
	75	1	—	—	210	—
	100	2	650	560	600	—
Зима	0	72	2600	70	870	670
	10	42	2000	70	720	610
	20	2	1730	790	1260	470
	30	1	—	—	1160	—
	50	2	360	200	280	—
			1977 г.			
Весна	0	32	1260	470	800	220
	10	22	1400	330	880	310
Лето	0	184	1910	0	640	170
	10	131	3000	0	590	71
	20	86	1380	0	370	86
	30	64	660	0	260	12
	50	58	1940	0	660	330
	75	53	3000	0	1200	740
	100	47	4000	0	1700	1000
Осень	0	171	1910	0	680	540
	10	71	2700	0	700	600
	20	86	1380	0	270	260
	30	12	660	0	230	230
	50	18	80	0	240	240
	75	18	1730	0	450	480
	100	18	1400	280	630	300
Зима	0	19	840	170	300	180
	20	19	350	13	260	70
			1978 г.			
Весна	0	178	3200	260	1580	760
	10	78	2500	240	1330	660
	20	18	3300	290	1510	930
	30	3	4100	790	1900	1550
	50	1	—	—	720	—
Лето	0	150	8400	140	1600	1230
	10	71	6300	190	1330	950
	20	7	2200	800	1630	540
	30	1	—	—	1100	—
	50	1	—	—	900	—

Сезон	Горизонт, м	Число наблюдений	Концентрация, мкг/л			Среднее квадратическое отклонение, мкг/л
			максимальная	минимальная	средняя	
Осень	0	106	4800	460	850	640
	10	25	1380	80	780	400
	20	69	2400	80	660	330
	30	7	2200	1100	1550	370
	50	2	1930	1860	1900	—
Зима	0	85	9500	450	1440	1380
	10	34	3600	160	730	730
	20	11	8000	80	1340	2200
1979 г.						
Весна	0	97	1910	220	700	360
	10	14	1760	320	710	410
	20	68	1520	260	570	180
	30	7	820	260	600	190
	50	3	710	540	630	—
Лето	0	114	9700	100	940	1100
	10	29	1770	200	1100	490
	20	55	2300	0	600	430
Осень	0	169	2200	45	640	430
	10	95	4400	0	650	560
	20	94	1570	17	420	240
	30	50	810	0	400	220
	50	48	1510	42	560	320
	75	45	2000	100	1000	490
	100	43	2200	200	1530	390
Зима	0	86	2900	90	1000	1180
	10	53	2400	100	980	790
	20	59	2900	110	870	770
	30	28	2000	110	450	510
	50	21	910	120	380	240
	75	20	1480	140	850	460
	100	19	2000	190	1230	550
1980 г.						
Весна	0	218	5600	0	940	920
	10	85	4000	0	730	780
	20	28	4800	25	720	990
	30	12	2700	30	490	740
	50	6	680	100	310	190
	75	1	—	—	170	—
Лето	0	165	3500	0	850	670
	10	68	2300	200	800	550
	20	15	1910	430	780	420
	30	3	1200	420	700	—
	50	3	550	460	520	—
	75	1	—	—	580	—
Осень	0	166	3500	120	900	690
	10	71	2500	240	800	560
	20	23	1910	270	790	460
	30	2	400	320	360	—
	50	3	710	480	570	—
	75	1	—	—	530	—
Зима	0	167	4400	70	730	620
	10	64	3300	290	640	490
	20	15	2300	100	600	590
	30	2	360	350	360	—
	50	3	670	370	470	—
	75	1	—	—	310	—
1981 г.						
Весна	0	225	3000	0	740	590
	10	145	1920	0	570	470
	20	56	1600	0	310	390
	30	25	770	20	160	170
	50	35	1480	30	400	350
	75	48	1500	130	640	460
	100	21	1990	370	930	530
Лето	0	233	3900	40	760	490
	10	151	3200	80	710	560
	20	80	1840	60	460	400
	30	38	1580	110	420	300
	50	41	1440	150	570	290
	75	50	1840	180	880	460
	100	20	2100	680	1230	380
Осень	0	224	2900	80	840	600
	10	121	2200	140	780	510
	20	62	1640	190	500	250
	30	41	1400	240	540	210
	50	52	1740	120	660	320
	75	16	1470	200	870	390
	100	23	2200	310	1160	570
Зима	0	150	3000	80	860	660
	10	90	2600	0	760	540
	20	48	2200	0	670	490
	30	38	880	0	450	260
	50	41	1660	0	660	380
	75	35	1700	0	830	440
	100	35	1700	590	1100	450
1982 г.						
Весна	0	126	3900	50	910	730
	10	135	8500	40	860	910
	20	98	3300	55	800	600
	30	16	980	80	350	290
	50	44	2300	140	900	640
	75	4	3400	240	1300	1300
	100	32	7200	270	2600	2000
Лето	0	90	3600	0	850	770
	10	80	3600	0	610	650
	20	29	3300	40	610	650
	30	16	1010	50	380	270
	50	9	400	60	460	370
	75	2	620	150	380	—
	100	3	860	90	480	—
Осень	0	123	2500	0	420	380
	10	102	1850	0	420	320
	20	31	1300	0	370	290
	30	9	490	60	240	140
	50	7	360	30	240	120
	75	2	370	330	350	—
	100	20	2000	340	1120	490
Зима	0	91	1560	75	450	250
	10	86	1160	120	400	180
	20	81	820	85	370	140
	30	9	540	180	340	150
	50	68	1500	120	430	270
	75	4	680	220	400	170
	100	60	2600	180	900	620
1983 г.						
Весна	0	261	3200	0	520	470
	10	75	1870	0	380	320
	20	26	800	110	300	160
	30	111	1990	100	410	510
	50	11	1620	100	380	400
	75	2	190	140	160	—
	100	2	210	130	170	—
Лето	0	254	4000	0	820	730
	10	96	2100	0	530	520
	20	44	2200	53	430	390
	30	5	460	100	240	130
	50	28	1100	150	420	210
	100	20	2400	240	1260	680

Сезон	Горизонт, м	Число наблюдений	Концентрация, мкг/л			Среднее квадратическое отклонение, мкг/л
			максимальная	минимальная	средняя	
Осень	0	194	3700	0	950	710
	10	57	1980	48	620	460
	20	23	1620	150	460	360
	30	11	630	330	400	82
	50	13	1540	360	700	380
	100	12	2200	440	1450	500
Зима	0	133	5500	70	890	910
	10	52	3200	220	600	630
	20	38	770	200	400	150
	50	26	1000	210	450	220
	100	20	3500	410	1270	700
			1984 г.			
Весна	0	191	4400	0	660	680
	10	61	1120	120	530	220
	20	35	1120	80	440	270
	30	15	1690	230	530	390
	50	17	790	110	410	160
	75	4	420	360	390	30
	100	2	—	—	1100	—
Лето	0	214	2400	0	830	500
	10	124	1800	0	760	440
	20	75	2600	170	720	530
	30	5	720	230	490	200
	50	33	1840	0	650	330
	100	15	2100	1100	1470	270
Осень	0	78	4400	40	870	800
	10	40	2500	0	660	600
	20	23	1880	0	550	430
	30	9	430	170	350	82
	50	8	940	490	600	135
	100	5	2100	1100	1560	370
Зима	0	152	1360	55	530	300
	10	63	1240	55	450	290
	20	61	1300	100	460	270
	30	22	1310	35	500	300
	50	32	1110	110	530	250
	75	7	1040	400	750	230
	100	5	1040	560	740	240
			1985 г.			
Весна	0	152	5800	30	1060	1050
	10	43	480	37	280	140
	20	40	590	21	280	160
	30	9	2000	270	980	500
	50	10	2500	540	1200	680
	100	27	3500	240	1130	860
Лето	0	108	3200	0	900	700
	10	56	3100	0	1120	790
	20	27	4000	170	970	940
	30	9	850	320	560	170
	50	16	3100	170	800	660
	75	4	1390	340	690	410
	100	3	1710	690	1080	450
Осень	0	162	2600	0	720	360
	10	101	3000	30	810	510
	20	37	1740	60	780	470
	30	14	1260	490	930	470
	50	11	1630	500	1130	320
	75	7	1350	90	1020	400
	100	14	990	100	360	330
Зима	0	46	1700	10	480	440
	10	24	1700	20	480	520
	20	12	120	30	70	40
	50	8	880	54	230	260
	100	7	1120	49	410	390

Мирового океана составляет (35—75) · 10^9 т органического углерода, причем диатомовые водоросли продуцируют как минимум половину этого количества. Исследованиями А. П. Виноградова [36] установлено, что в состав диатомовых входит 17 % углеводорода и 43 % SiO_2 (в переводе на сухую массу). Оперируя этими данными, получаем количество SiO_2, которое ежегодно переводится диатомовыми в твердое состояние — (72—154) · 10^9 т SiO_2. Исходя из общей площади Мирового океана, А. Н. Богоявленский рассчитал, что под 1 м² поверхности океана связываются SiO_2 0,20—0,43 кг/год [22]. Это и есть среднее годовое количество извлечения кремнекислоты диатомовыми в слое фотосин-

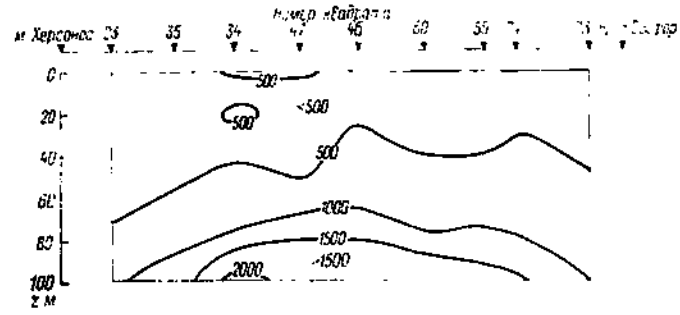

Рис. 56. Среднее годовое распределение концентраций кремния на разрезе м. Херсонес — прол. Босфор в период 1973—1985 гг., мкг/л.

теза. Отмерший планктон опускается вниз. В процессе седиментации кремнекислота постепенно растворяется, в результате чего глубинные воды обогащаются ею. Незначительная часть отмершего диатомового планктона растворяется непосредственно в слое фотосинтеза и вновь усваивается фитопланктоном. Таким образом, в фотосинтезирующем слое создается малый круговорот кремния.

Типичное распределение средних годовых концентраций кремния по вертикали в период 1973—1985 гг. представлено на примере квадратов, расположенных вдоль разреза м. Херсонес — прол. Босфор (рис. 56). Аналогичная закономерность прослеживается (увеличение содержания кремния с глубиной) и в других районах моря.

Распределение средних годовых концентраций кремния по акватории моря характеризуется определенной неоднородностью. Об этом убедительно свидетельствует структура поля концентраций кремния, построенная по данным натурных наблюдений в слое вод 0—0,5 м за 1973—1985 гг. (рис. 57). Особенно значительной указанная неоднородность характерна для северо-западного и юго-восточного районов моря, режим которых в значительной степени подвержен влиянию материковых вод.

В поверхностном слое воды открытой части моря (рис. 57) концентрация кремния изменяется в относительно узком диапазоне (300—500 мкг/л). Высокие концентрации кремния (свыше 500 мкг/л) приурочены к центральным районам моря, в которых происходит подъем глубинных вод. Эту закономерность наглядно иллюстрирует также ход кривых на рис. 56 в квадратах 34 и 46, расположенных в центре западного циклонического круговорота и в которых происходит подъем обогащенных кремнием глубинных вод. На периферии круговорота (квадраты 23, 73) содержание кремния значитель-

но ниже. Аналогичное явление, тесно связанное с циркуляцией водных масс, наблюдается и в восточной части моря.

Наиболее богатыми кремнием зонами моря являются северо-западный и юго-восточный районы. Средняя годовая концентрация кремния в северо-западном районе существенно превышает 500 мкг/л, а вблизи устья р. Дуная — более 2000 мкг/л (см. рис. 57). Абсолютный максимум концентрации кремния (9700 мкг/л) был зарегистрирован в поверхностном слое воды в квадрате 4. В юго-восточной части моря концентрация кремния меньше, чем в северо-западном районе, но все же превышает 500 мкг/л, а в участках, прилегающих

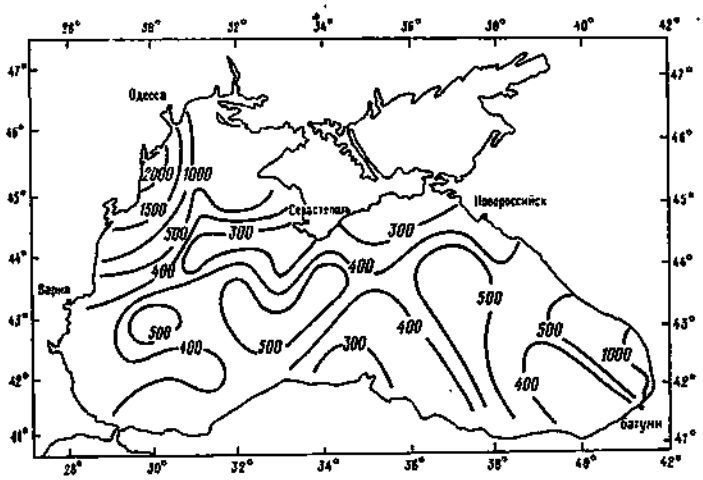

Рис. 57. Распределение средних годовых концентраций кремния в поверхностном слое в период 1973—1985 гг., мкг/л.

к п. Поти и п. Батуми (квадраты 70 и 85), составляет 1000 мкг/л и более. Высокие концентрации кремния в указанных районах моря обусловлены влиянием речных вод, поскольку содержание биогенных веществ в них значительно выше, нежели в собственно морских водах. В этой связи несомненный интерес вызывают сведения о концентрации биогенных веществ в устьевых областях рек, впадающих в Черное море (табл. 52).

Речной сток оказывает влияние на гидрохимию кремния не только в районах, примыкающих непосредственно к устьевым областям рек. Благодаря устойчивой циклонической циркуляции, роль речных вод в формировании режима кремния наблюдается в прибрежной зоне западной половины моря вплоть до прол. Босфор. А. В. Рождественский считает, что прибосфорский район относится к той части акватории моря, где влияние материкового стока незначительно [132], и имеющее место изменение в содержании кремния рассматривает без учета влияния речных вод. В то же время наблюдения СО ГОИНа [51, 53] свидетельствуют о том, что в отдельных случаях весной и ранним летом прибосфорский район подвергается интенсивному вторжению материковых вод.

Средняя годовая концентрация кремния в водах Дуная составляет 3360 мкг/л, при абсолютных колебаниях — 700—9210 мкг/л [132]. Обогащенные кремнием речные воды, несмотря на их существенную трансформацию, при смешении с черноморскими водами в значительной степени сохраняют свои исходные характеристики и способствуют увеличению содержания кремния в прибосфорском районе. Так, 25—26 марта 1981 г. до поступления смешанных вод в юго-западный район средняя концентрация кремния в поверхностном слое составляла 360 мкг/л; в период наибольшего влияния материкового стока (27—28 марта) средняя концентрация увеличилась до 720 мкг/л. Действие речных вод на характер вертикального распределения кремния прослеживалось до глубины 50 м. По мере продвижения трансформированной водной массы, образовавшейся при смешении речных вод с морскими, через район наблюдений содержание кремния в поверхностном 50-метровом слое оставалось повышенным. После ее прохождения концентрация кремния значительно уменьшилась (до 410 мкг/л), но оставалась выше, чем концентрация, наблюдавшаяся 25—26 марта. Влияние средиземноморских вод на распределение кремния в Черном море трудно выделить. Воды Эгейского моря характеризуются весьма пониженным содержанием кремния. По всей водной толще его среднесезонные концентрации изменяются от 270 до 530 мкг/л [54]. Осенью в юго-западном районе Черного моря концентрация кремния на глубине 100 м составляет 2040 мкг/л, а его максимальное содержание в струе средиземноморской воды в октябре 1981 г. не превышало 1270 мкг/л, при среднем значении — 1000 мкг/л (из 19 серий наблюдений) [51]. Средняя годовая концентрация кремния в воде нижнего босфорского течения на 300 мкг/л меньше, нежели в окружающей ее черноморской воде. Все это дает основание считать, что нижнебосфорское течение уменьшает концентрацию кремния в Черном море.

Однако, как показали балансовые расчеты, в результате водообмен через Босфор в Черном море происходит накопление кремния. Средняя концентрация кремния в поверхностном 50-метровом слое юго-западного района, водами которого формируется верхнебосфорское течение, составляет 400 мкг/л. Водообмен через Босфор для Черного моря характеризуется следующими значениями: расход — 390 км^3, приход — 217 км^3 [52]. Таким образом, с водой верхнего босфорского течения кремний из Черного моря выносится со скоростью 4,9 кг/с ($156 \cdot 10^3$ т/год). В струе средиземноморской воды на расстоянии 13—15 миль от пролива концентрация кремния составляет 840 мкг/л (61 наблюдение), т. е. ежегодно в Черное море из Босфора поступает $182 \cdot 10^3$ т кремния (5,8 кг/с). Превышение прихода кремния над его расходом составляет $26 \cdot 10^3$ т/год.

Наряду с пространственной изменчивостью динамика концентраций кремния испытывает существенные временные колебания. В первую очередь это касается межгодовых (макромасштабных) временных изменений.

Анализируя данные по содержанию кремния в открытой части моря в периоды до зарегулирования речного стока (табл. 48) и после (табл. 53), очевидно, что в настоящее время содержание кремния в слое 0—100 м значительно уменьшилось. До 1956 г. по сравнению с современным периодом (1981—1985) концентрация кремния была больше в 2,5—6 раз на поверхности, в 2,1—3 раза — на глубине 10 м, в 2,2—5,4 раза — на глубине 50 м и в 1,1—2,4 раза — на глубине 100 м. Отмеченная тенденция изменения содержания кремния наблюдалась и в предыдущие годы (рис. 58). В то же время, как следует из рис. 58, межгодовые

Таблица 52

Концентрация биогенных веществ в устьевых областях рек, впадающих в Черное море, в 1981—1985 гг.

Год	Река	Горизонт	Характеристика концентрации	Концентрация ингредиента, мкг/л				
				фосфаты	кремний	нитриты	нитраты	аммонийный азот
1981	Южный Буг	Поверхность	Средняя	161	820	21	—	—
			Максимальная	390	1670	47	—	—
	Днепр	Поверхность	Средняя	—	—	14	—	—
			Максимальная	—	—	32	—	—
1982	Дунай	Поверхность	Средняя	102	3370	33	—	90
			Максимальная	244	3680	91	—	400
		Дно	Средняя	97	3380	32	—	90
			Максимальная	182	3680	100	—	390
		Средняя		100	3380	32	—	90
	Южный Буг	Поверхность	Средняя	120	—	40	—	—
			Максимальная	310	—	200	—	—
	Днепр	Поверхность	Средняя	145	—	7	—	—
			Максимальная	200	—	13	—	—
		Дно	Средняя	155	—	7	—	—
			Максимальная	230	—	9	—	—
		Средняя		150	—	7	—	—
	Кодори	Поверхность	Средняя	26	400	< 5	—	—
			Максимальная	50	740	8	—	—
		Дно	Средняя	19	400	< 5	—	—
			Максимальная	40	730	7	—	—
		Средняя		22	400	< 5	—	—
1982	Ингури	Поверхность	Средняя	47	500	< 5	—	—
			Максимальная	78	820	7	—	—
		Дно	Средняя	33	470	< 5	—	—
			Максимальная	65	740	< 5	—	—
		Средняя		40	480	< 5	—	—
	Хоби	Поверхность	Средняя	67	820	< 5	—	—
			Максимальная	162	3300	40	—	—
		Дно	Средняя	47	670	< 5	—	—
			Максимальная	110	330	22	—	—
		Средняя		57	740	< 5	—	—
	Риони	Поверхность	Средняя	94	850	7	—	—
			Максимальная	162	1420	12	—	—
		Дно	Средняя	59	670	5	—	—
			Максимальная	110	1850	9	—	—
		Средняя		77	760	6	—	—
	Супса	Поверхность	Средняя	85	900	< 5	—	—
			Максимальная	163	1980	7	—	—
		Дно	Средняя	79	570	< 5	—	—
			Максимальная	163	1240	10	—	—
		Средняя		82	740	< 5	—	—
	Чорох	Поверхность	Средняя	63	1540	9	—	—
			Максимальная	110	3630	21	—	—
		Дно	Средняя	62	1560	8	—	—
			Максимальная	130	3550	17	—	—
		Средняя		62	1550	8	—	—
1983	Дунай	Поверхность	Средняя	111	3910	17	14	—
			Максимальная	212	7480	102	96	—
		Дно	Средняя	112	4010	17	12	—
			Максимальная	235	7920	91	106	—
		Средняя		112	3960	17	13	—

Год	Река	Горизонт	Характеристика концентрации	Концентрация ингредиента, мкг/л				
				фосфаты	кремний	нитриты	нитраты	аммонийный азот
1983	Южный Буг	Поверхность	Средняя	112	1490	10	122	—
			Максимальная	289	3680	44	718	—
		Дно	Средняя	98	1420	9	85	—
			Максимальная	187	4740	35	606	—
		Средняя		105	1460	10	104	—
	Днепр	Поверхность	Средняя	54	2140	8	89	—
			Максимальная	152	4200	20	960	—
		Дно	Средняя	54	1970	10	63	—
			Максимальная	137	4380	40	293	—
		Средняя		54	2060	9	76	—
	Кодори	Средняя	Средняя	—	—	26	780	550
			Максимальная	—	—	114	1500	1300
	Ингури	Поверхность	Средняя	18	290	< 5	1400	1100
			Максимальная	32	500	< 5	2500	2140
		Дно	Средняя	14	300	< 5	—	—
			Максимальная	29	460	< 5	—	—
		Средняя		16	300	< 5	1400	1100
	Хоби	Поверхность	Средняя	15	290	< 5	480	650
			Максимальная	22	500	< 5	600	2160
		Дно	Средняя	13	220	< 5	—	—
			Максимальная	29	420	< 5	—	—
		Средняя		14	260		480	650
	Рионн	Средняя	Средняя	—	—	17	1150	1040
			Максимальная	—	—	104	3500	2520
	Супса	Средняя	Средняя	—	—	7	630	670
			Максимальная	—	—	8	1250	1900
	Чорох	Поверхность	Средняя	18	340	< 5	940	1600
			Максимальная	52	1560	< 5	4000	3580
		Дно	Средняя	14	280	< 5	—	—
			Максимальная	32	1820	< 5	—	—
		Средняя		16	310	< 5	940	1600
1984	Дунай	Поверхность	Средняя	400	5060	80	355	—
			Максимальная	1100	9750	830	980	—
		Дно	Средняя	390	5000	70	314	—
			Максимальная	1070	9750	760	1020	—
		Средняя		400	5030	75	335	—
	Южный Буг	Поверхность	Средняя	125	1950	27	131	—
			Максимальная	280	3500	200	580	—
		Дно	Средняя	92	1350	33	106	—
			Максимальная	520	3300	60	300	—
		Средняя		109	1650	30	119	—
	Днепр	Поверхность	Средняя	39	1630	7	79	—
			Максимальная	400	3500	38	320	—
		Дно	Средняя	36	1730	7	84	—
			Максимальная	210	3550	25	220	—
		Средняя		38	1680	7	82	—
	Ингури	Поверхность	Средняя	27	470	< 5	—	—
			Максимальная	30	600	< 5	—	—
		Дно	Средняя	42	580	6	—	—
			Максимальная	50	740	7	—	—
		Средняя		34	530	< 5	—	—
	Чорох	Поверхность	Средняя	41	1400	< 5	—	—
			Максимальная	99	3400	8	—	—
		Дно	Средняя	56	910	6	—	—
			Максимальная	120	1500	14	—	—
		Средняя		48	1160	< 5	—	—

Год	Река	Горизонт	Характеристика концентрации	Концентрация ингредиента, мкг/л				
				фосфаты	кремний	нитриты	нитраты	аммонийный азот
1985	Дунай	Поверхность	Средняя	260	4 450	76	270	—
			Максимальная	1 050	13 800	690	980	—
		Дно	Средняя	280	5 470	65	250	—
			Максимальная	1 000	20 700	500	980	—
		Средняя		270	4 960	70	260	—
	Южный Буг	Поверхность	Средняя	140	2 940	35	110	—
			Максимальная	250	5 340	130	510	—
		Дно	Средняя	140	2 530	29	60	—
			Максимальная	280	5 570	88	220	—
		Средняя		140	2 740	32	86	—
	Днепр	Поверхность	Средняя	130	2 680	16	81	—
			Максимальная	320	4 800	77	240	—
		Дно	Средняя	140	2 900	15	82	—
			Максимальная	370	4 940	51	230	—
		Средняя		140	2 790	16	82	—
	Кодори	Поверхность	Средняя	13	470	< 5	—	—
			Максимальная	25	840	< 5	—	—
		Дно	Средняя	11	570	< 5	—	—
			Максимальная	25	1 440	< 5	—	—
		Средняя		12	520	< 5	—	—
	Ингури	Поверхность	Средняя	16	590	< 5	—	—
			Максимальная	36	1 000	< 5	—	—
		Дно	Средняя	12	500	< 5	—	—
			Максимальная	25	1 000	< 5	—	—
		Средняя		14	540	< 5	—	—
	Рнони	Поверхность	Средняя	14	590	< 5	—	—
			Максимальная	19	900	< 5	—	—
		Дно	Средняя	12	620	< 5	—	—
			Максимальная	18	840	< 5	—	—
		Средняя		13	610	< 5	—	—
	Чорох	Поверхность	Средняя	17	580	< 5	—	—
			Максимальная	40	840	< 5	—	—
		Дно	Средняя	16	720	< 5	—	—
			Максимальная	30	1 260	< 5	—	—
		Средняя		16	650	< 5	—	—

изменения кремния характеризуются переменным трендом. Период с 1974 по 1978 г. имеет положительный тренд по изменению содержания кремния. В 1978 г. его средняя годовая концентрация даже

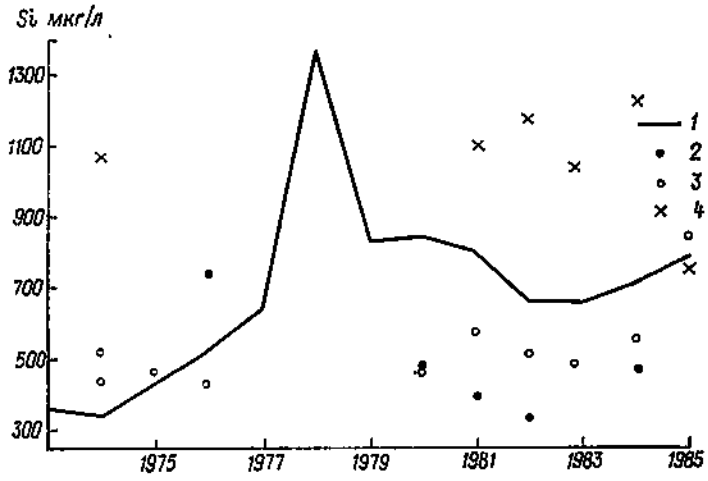

Рис. 58. Концентрация кремния (мкг/л) в 1973—1985 гг.
1 — поверхность; *2* — 30; *3* — 50; *4* — 100 м.

Таблица 53

Концентрация кремния в открытой части Черного моря в 1981—1985 гг., мкг/л

Год	Горизонт, м	Средняя	Максимальная
1981	0	460	2800
	10	460	3210
	50	560	1310
	100	1210	2250
1982	0	340	1560
	50	390	1160
	100	1160	2560
1983	0	350	1130
	10	320	710
	50	530	1540
	100	1320	3500
1984	0	380	580
	10	370	580
	50	510	1840
	100	1520	2300
1985	0	190	1840
	50	230	1270
	100	660	2700

превысила уровень концентрации, соответствовавшей периоду незарегулированного речного стока. В последующие годы концентрация кремния немонотонно изменялась и в поверхностном слое стабилизировалась на уровне 660—850 мкг/л. К максимуму в содержании кремния, отмеченному в 1978 г.,

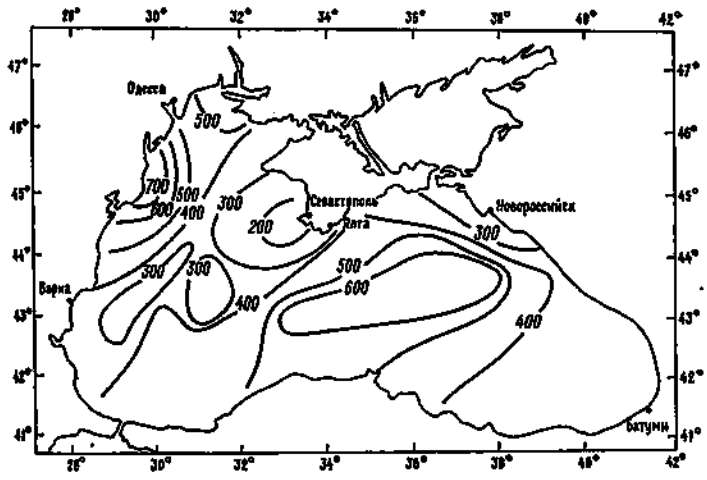

Рис. 59. Распределение средних концентраций кремния в поверхностном слое воды в 1974 г., мкг/л.

следует подходить осторожно, поскольку основная часть наблюдений была приурочена к прибежным районам. В остальные годы, характеризующиеся повышенным содержанием кремния, структура его полей мало отличалась от среднего многолетнего распределения, представленного ранее (см. рис. 57) Минимальное содержание кремния за период исследований отмечалось в 1974 г. (рис. 59). В этот

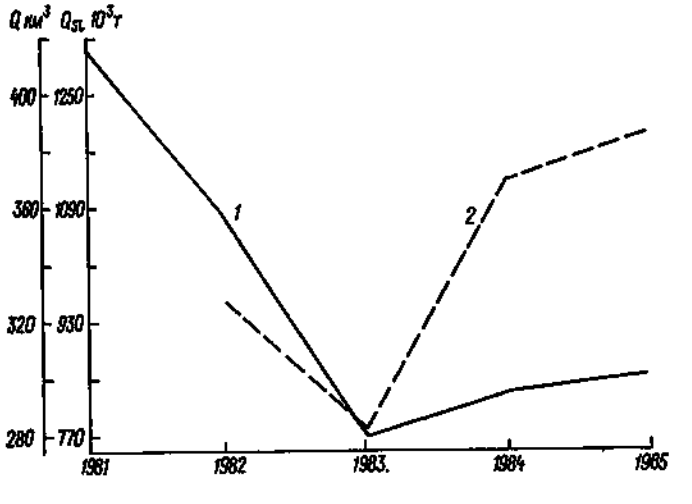

Рис. 60. Межгодовые изменения речного стока (*1*) и стока кремния (*2*) в Черном море за 1981—1985 гг.

год средняя концентрация кремния в поверхностном слое воды составляла лишь 340 мкг/л. Даже в наиболее продуктивных по кремнию районах (северо-западном и юго-восточном) его содержание было меньше среднего для всей акватории моря, наблюдавшегося в период до зарегулирования речного стока.

Поступление кремния в море с речным стоком находится в прямой зависимости от водного стока (рис. 60). В то же время содержание кремния в море в целом по всей акватории практически не зависит от водного стока или по крайней мере роль водного стока в формировании режима кремния затушевывается на фоне других факторов. На первый взгляд, такое заключение кажется абсурдным. Но обратимся к конкретным данным. Средний многолетний суммарный водный сток с территории СССР до зарегулирования (1923—1955) составлял 308,33 км³, после зарегулирования (1956—1985) — 316,77 км³. Таким образом, зарегулированность рек практически не отражалась на их водном стоке. Больше того, несмотря на прогрессирующее изъятие воды из рек, он даже несколько увеличился. Одновременно с этим концентрация кремния в поверхностном 100-метровом слое воды моря уменьшилась в 2,7 раза.

Помимо речного стока, большую роль в режиме кремния, как впрочем и других биогенных веществ, играет динамика биомассы фитопланктона. В последние годы, вследствие эвтрофирования вод, в структуре фитоценозов произошли существенные изменения. Так, в северо-западном районе моря суммарная биомасса фитопланктона увеличилась с 52 г/м³ (50-е гг.) до 800 г/м³ (80-е гг.) [87]. В восточной глубоководной части моря биомасса фитопланктона за 1960—1982 гг. возросла в 2,9 раза (цит. по [82]). В этот же период отмечен рост первичной продукции (в 3 раза) и численность бактерий (в 1,5—2 раза) [1].

Таким образом, резкое уменьшение концентрации кремния в водах Черного моря связано с интенсификацией процесса его потребления фитопланктоном, что обусловлено увеличением биомассы последнего.

Помимо межгодовой изменчивости, поле кремния подвержено также сезонным изменениям (рис. 61, 62). Возможно, что ряд налагающихся друг на друга процессов несколько стушевывает и затрудняет установление четкой зависимости в его динамике. Исключение составляют устьевые взморья, где внутригодовые изменения речного стока влекут за собой изменение в содержании кремния.

Исследованиями А. В. Рождественского [132] установлено, что каждому из районов моря присущи специфические особенности в сезонной динамике концентраций кремния. Так, в водах Варненского залива сезонная изменчивость кремния выражена слабо и обусловлена исключительно потреблением его фитопланктоном. В открытом мелководном районе в средней части болгарского побережья наблюдается совершенно противоположная картина: содержание кремния резко увеличивается весной и достигает своего максимума летом. Осенью и зимой концентрация кремния уменьшается. В прибосфорском и глубоководном районах динамика кремния сложнее. Весной содержание кремния незначительное, летом его количество увеличивается, а осенью уменьшается. В холодный период года на содержание кремния значительное влияние оказывает вертикальное перемешивание. Сезонная динамика кремния в юго-восточной части моря имеет много общего с его внутригодовыми изменениями, наблюдающимися в юго-западной части и особенно в прибосфорском районе.

* Мелкомасштабная временная динамика концентраций кремния характеризуется данными на примере многочасовых наблюдений, выполненных

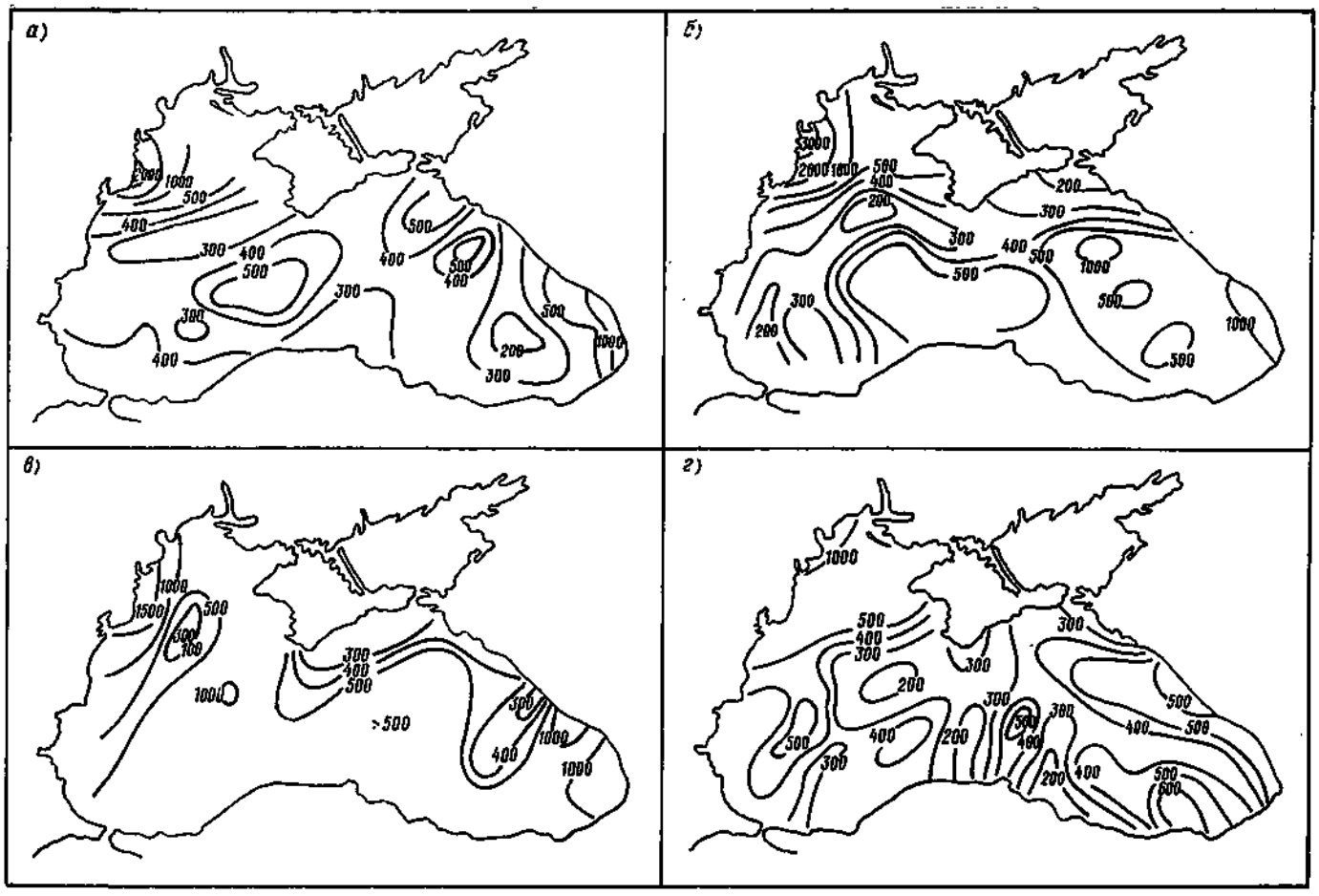

Рис. 61. Распределение кремния в поверхностном слое моря в период 1973—1985 гг., мкг/л.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

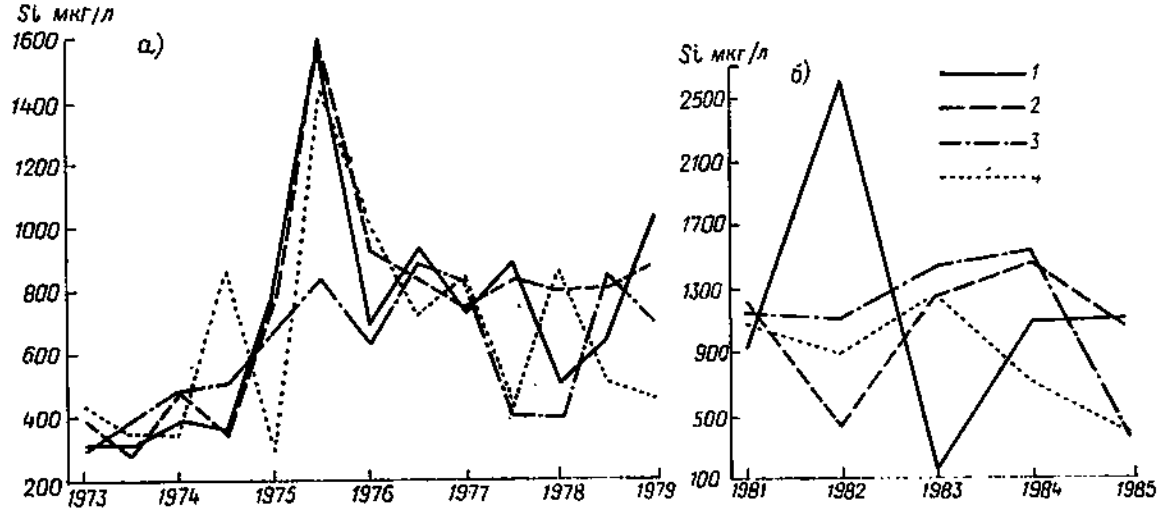

Рис. 62. Концентрация кремния в водах Черного моря в 1973—1985 гг., мкг/л.
а — поверхностный слой; *б* — 100 м; *1* — весна; *2* — лето; *3* — осень; *4* — зима.

на станциях, расположенных в прибосфорском районе (рис. 63). Из обоих рисунков следует, что динамика кремния по всей водной толще во все периоды наблюдений была значительной. Станции 92 и 93 расположены в мелководном гидродинамически активном районе (близость прол. Босфор), вследствие этого прослеживается несоответствие между изменениями содержания кремния и внутрисуточным годом численности фитопланктона. Непериодические колебания концентраций кремния на обеих станциях в первую очередь обусловлены изменениями гидрометеорологических условий.

6.1.3. Элементы баланса кремния

Очевидно, что любые количественные изменения даже одной из составляющих баланса кремния неизбежно повлекут за собой многообразные проявления в жизни моря. Несмотря на важность

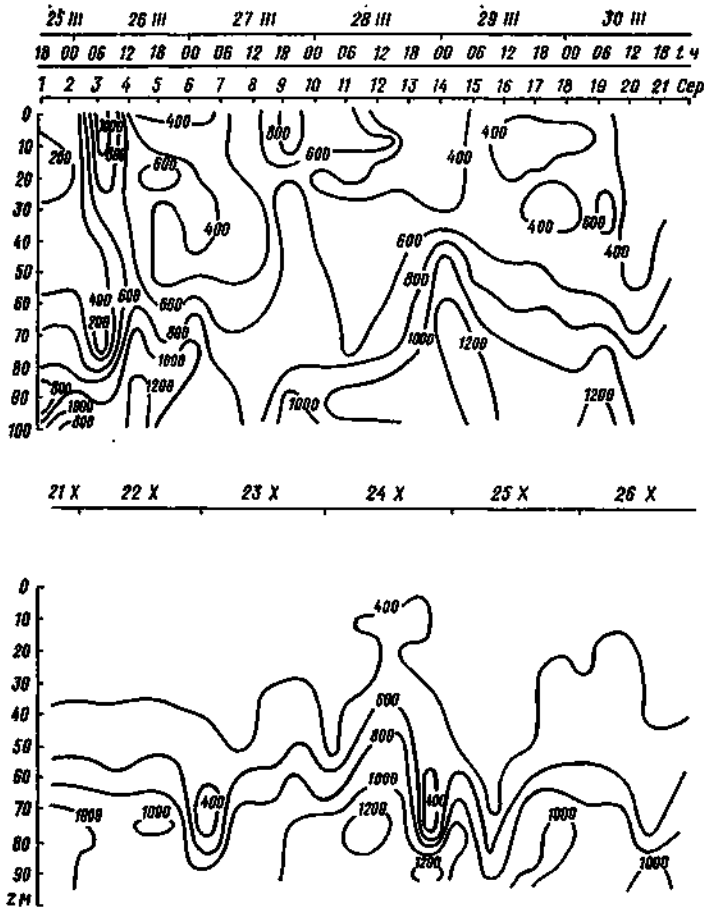

Рис. 63. Временной ход концентраций кремния на многочасовой станции в прибосфорском районе Черного моря 25—30 марта 1981 г. и 21—26 октября 1981 г., мкг/л.

проблемы, баланс кремния в Черном море к настоящему времени изучен недостаточно.

Уравнение внешнего баланса кремния для Черного моря можно записать в следующем виде:

$$C_pQ_p + C_oQ_o + C_бQ_б + C_дQ_д + C_MQ_M + C_AO_A \pm$$

$$\pm C^д_{гр} \pm C^б_{гр} \pm C_{пз} - C_{rM}Q_{rM} - C_{rA}Q_{rA} - C_r - C_п + A = \Delta C,$$

где ΔC — годовое изменение запаса кремния в воде моря; C_pQ_p — поступление кремния с речным стоком; C_oQ_o — поступление кремния с атмосферными осадками; $C_бQ_б$ — поступление кремния с материалами абразии берегов; $C_дQ_д$ — поступление кремния с материалами абразии дна; C_MQ_M — поступление кремния с мраморноморскими водами; C_AQ_A — поступление кремния с азовскими водами; $C^0_{гр}$ — результирующая обмена с донными отложениями и грунтовыми растворами дна; $C^б_{гр}$ — результирующая обмена с грунтами и грунтовыми растворами берегов; $C_{пз}$ — подземный сток кремния; $C_{rM}Q_{rM}$ — сток кремния с черноморскими водами в Мраморное море; $C_{rA}Q_{rA}$ — сток кремния с черноморскими водами в Азовское море; C_r — захоронение кремния в донные отложения; $C_п$ — изъятие кремния с рыбным промыслом; A — непосредственное поступление кремния в море в результате антропогенной деятельности.

По водному стоку рек, впадающих в море, имеются достаточно удовлетворительные данные. Что касается данных по концентрации кремния в устьевых областях рек, то здесь возникают определенные затруднения. Надежные сведения о содержании кремния имеются лишь для крупных рек: Дуная, Днепра, Днестра, Южного Буга, Чорох и Ингури (примерно 85 % общего водного стока рек, впадающих в море). Для остальных рек Кавказа данные наблюдений за содержанием кремния имеют статистические пробелы. В случае отсутствия наблюдений в какой-либо реке концентрация кремния для нее принималась как средняя из концентраций кремния в остальных реках Кавказа и записывалась в скобках (табл. 54). Информации о содержании кремния в реках Анатолийского побережья, Румынии и Болгарии в литературе не обнаружено. Без сомнения доля последней группы рек в обогащении кремнием вод моря мала, поскольку вместе с реками Крыма их суммарный водный сток составляет примерно 25 км³ (8,5 % всего речного стока). В то же время, исходя из необходимости более точной оценки поступления кремния с речными водами, концентрация кремния для рек Турции, Румынии и Болгарии рассчитывалась по методу аналогии с использованием данных по рекам соседних регионов и также записывалась в скобках (табл. 54).

Данные по водному стоку и содержанию кремния, послужившие основой для оценки речного стока кремния (в последующем — для всех биогенных веществ), приведены для каждой реки по одному и тому же пункту наблюдений, расположенному в непосредственной близости от устья.

Таблица 54

Поступление кремния в Черное море с речным стоком за 1981—1985 гг., тыс. т

Река	1981	1982	1983	1984	1985	Среднее поступление
Дунай	—	753	660	1008	990	852
Днестр	—	27,6	19	20,7	29,5	24
Днепр	—	108	76	41,2	120	86
Южный Буг	3,50	6,61	3,93	5,08	11,4	6
Рионн	—	10,9	(4,09)	(9,56)	7,20	(7,90)
Чорох	—	14,2	2,45	8,79	5,00	7,60
Ингури	—	0,29	0,16	0,35	0,20	0,25
Кодори	—	(1,62)	(1,28)	(3,76)	(2,60)	(2,30)
Мзымта	—	(0,92)	(0,44)	(0,69)	(0,77)	(0,70)
Бзыбь	—	(2,67)	(0,89)	(2,22)	(2,10)	(2,00)
Супса	—	(1,24)	(0,44)	(1,52)	(1,40)	(1,10)
Малые реки Кавказа	—	(5,41)	(1,99)	(5,35)	(4,10)	(4,20)
Реки Турции	—	(22,5)	(6,56)	(19,1)	(14,4)	(15,7)
Реки Румынии и Болгарии	—	(5,2)	(3,89)	(5,18)	(6,50)	(5,20)

Расчеты, приведенные в табл. 54, показали, что среднее годовое поступление кремния в Черное море с речным стоком за 1981—1985 гг. составляет 1016 тыс. т.

Поступление с атмосферными выпадениями. Вклад атмосферных выпадений в питании кремнием бассейнов конечного стока до настоящего времени не учитывается. Это обстоятельство является следствием не только недооценки масштабов эоловых выпадений и атмосферных осадков вследствие низкой минерализации последних, но и недостаточными представлениями об их химическом составе. Исследования, проведенные в последние годы, свидетельствуют о том, что участие атмосферных выпадений в питании материалом, в частности тяжелыми металлами, Черного моря сопоставимо с вкладом речного стока [115].

Средние за многолетие атмосферные осадки, выпадающие на зеркало Черного моря, 518 мм [162]. Поскольку данные о содержании кремния в атмосферных осадках отсутствуют, то судить о количестве кремния, поступающего в Черное море из атмосферы, не представляется возможным.

Поступление с материалами абразии берегов. Сведения о количественном учете материала, поступающего в результате абразии берегов в море, весьма ограничены. Хотя в литературе встречаются данные по исследованию взаимодействия различных пород и минералов с природными и модельными растворителями, непосредственно для условий черноморского бассейна процессы выщелачивания пород морской водой не изучены.

Ориентировочное количество взвешенного вещества, поступающего в море при абразионном сносе, составляет 62 900 т/год [115]. По А. П. Лисицину с соавторами [107], среднее содержание аморфного кремнезема во взвеси составляет 0,13 мг/л (11,45 % сухого вещества). Исходя из этого, в Черное море с материалами абразии берегов ежегодно поступает 7200 т кремния.

Поступление с материалами абразии дна. Из-за недостатка фактических данных вопрос о вкладе донных абразионных процессов в питании вод Черного моря кремнием до настоящего времени остается открытым. В литературе отсутствуют сведения об общей площади донной абразии и среднегодовой скорости размыва донных отложений. Недостаточно данных о содержании кремния в поверхностном слое осадков.

Обмен через пролив Босфор. Как уже отмечалось, сток кремния в пролив составляет 156 тыс. т/год, а приток из пролива — 182 тыс. т/год. Таким образом, в результате массообмена с Мраморным и Эгейским морями в Черное море ежегодно аккумулируется 26 000 т кремния.

Обмен через Керченский пролив. Баланс кремния через Керченский пролив по наблюдениям 1967—1973 гг. рассчитывался Л. Ф. Ермаковой [77]. В результате расчетов установлено, что из Черного моря в Азовское в среднем выносится 25 400 т кремния в год, в Черное море из Азовского поступает 28 500 т в год.

В настоящее время (1981—1985) обмен кремнием через Керченский пролив несколько изменился (табл. 55). Согласно нашим данным, сток кремния в пролив составляет 21 000 т, приток из пролива — 30 000 т.

Обмен с донными отложениями и грунтовыми растворами дна, обмен с грунтами и грунтовыми растворами берегов, поступление с подземным стоком и в результате антропогенной деятельности. Эти составляющие в настоящее время количественно оценить нельзя из-за отсутствия экспериментальных и натурных данных.

Захоронение кремния в донные отложения. Среди расходных статей баланса доминирующую

Таблица 55

Обмен кремнием через Керченский пролив

Год	Приток из Азовского моря			Сток в Азовское море		
	$Q_{вод}$ км³	$\bar{C}$ мкг/л	Q_{Si} т	$Q_{вод}$ км³	$\bar{C}$ мкг/л	Q_{Si} т
1981	59,2	700	41 440	22,4	910	20 380
1982	48,4	790	38 240	33,2	910	30 210
1983	43,1	440	18 960	34,2	270	9 230
1984	38,9	750	29 180	35,3	750	26 480
1985	35,3	670	23 650	33,8	520	17 580
Среднее	45,0	670	30 000	31,8	670	21 000

роль играет вынос соединений кремния и захоронение их в грунт. Обычно эта составляющая определялась как остаточный член уравнения баланса. В данном случае использовать такой подход не представляется возможным, поскольку отсутствуют сведения о поступлении кремния с атмосферными выпадениями, материалами абразии дна и др.

Согласно С. В. Бруевичу [29], ежегодно на 1 м² дна Мирового океана осаждается 0,9 г кремния. Если принять площадь дна Черного моря равной площади поверхности (420 325 км²) [48], то в грунт осаждается 378 тыс. т/год кремния. Полученная цифра является ориентировочной, поскольку исходные данные требуют дальнейшего уточнения.

Изъятие кремния при рыбном промысле. Сведений о содержании кремния в рыбе практически нет. А. П. Виноградов [36] приводит данные о концентрации кремния у карпа (0,004 % сырой массы). Если экстраполировать это значение на всю ихтиофауну, то потери кремния с рыбным промыслом составят 10 т. Рассчитанное значение характеризует обстановку на 1972 г., когда общий вылов рыбы в Черном море составил 251 251 т [55].

Итак, ежегодно в Черное море поступает извне в среднем 1 235 000 т кремния (из учтенных приходных статей баланса), причем ведущая роль принадлежит материковому стоку и притоку из прол. Босфор. Среди учтенных расходных составляющих баланса основное значение имеют захоронение кремния в донные отложения и его вынос в Мраморное море (табл. 56).

Исходя из вышеизложенного, очевидно, что вопросы, касающиеся баланса кремния в Черном море, требуют дальнейшей разработки и уточнения. В первую очередь это относится к приходным составляющим баланса: поступлению кремния с атмосферными выпадениями, материалами абразии берегов и дна, а также в результате антропогенной деятельности. Необходимо определить роль субмаринной разгрузки в питании кремнием вод Черного моря, оценить обмен кремния на границах водный слой — донные отложения, водный

Таблица 56

Некоторые статьи баланса кремния

Статья баланса	Приход. тыс. т	Статья баланса	Расход. тыс. т
Поступление		Вынос	
с речным стоком	1016	в прол. Босфор	156
с материалами абразии берегов	7,20	в Керченский пролив	21
из прол. Босфор	182	Захоронение в донные отложения	378
из Керченского пролива	30	Изъятие с вылавливаемой рыбой	0,01
Всего из учтенных приходных статей	1235	Всего из учтенных расходных статей	555

слой — береговые отложения и водный слой — грунтовые растворы. Что касается расходных статей баланса, то здесь самого пристального внимания заслуживает количественная оценка захоронения кремния в донные отложения.

6.2. Фосфор

Введение

Соединения фосфора относятся к физиологически важным компонентам химического состава морской воды, поскольку они являются представителями биогенных веществ, необходимых фитопланктону для построения клетки. Фосфор многократно используется в пищевых целях вплоть до его потребления рыбами и морскими млекопитающими. Содержание фосфора в море является одним из показателей его биопродуктивности.

Исходя из термодинамических констант и pH морской воды, установлено, что в Черном море фосфор находится преимущественно в растворимой минеральной форме фосфатных анионов HPO_4^{2-} и $H_2PO_4^-$ (до 99,99 % общей суммы молярных концентраций). Фосфатные анионы PO_4^{3-}, как и целые молекулы ортофосфорной кислоты, присутствуют в незначительном количестве. Это убедительно подтверждается и расчетами Б. П. Никольского и В. М. Гортикова (табл. 57) [118].

Таблица 57

Соотношения между химическими формами фосфорной кислоты в природных водах, % общего содержания

Химическая формула	pH						
	6	7	8	8,5	9	10	11
H_3PO_4	0,01	—	—	—	—	—	—
$H_2PO_4^-$	83,67	33,90	4,88	1,60	0,51	0,05	—
HPO_4^{2-}	16,32	66,10	95,12	98,39	99,45	99,60	96,53
PO_4^{3-}	—	—	—	0,01	0,04	0,35	3,47

Органический фосфор присутствует в морских водах в виде сложных высокомолекулярных соединений углеводородного протеинового комплекса в качестве радикалов фосфорной кислоты и ее эфиров. Не исключено, что часть растворимого органического фосфора находится в коллоидном состоянии.

Фосфор поступает в море из нескольких источников. Главенствующая роль в обогащении морских вод фосфором принадлежит стоку с материка. В то же время основная часть общей массы фосфора, поступающая в море в составе терригенных взвесей, является химически инертной и в процессе седиментации быстро оказывается на дне. Меньшая химически активная часть фосфора поступает в море в растворенной форме. Именно эта форма фосфора представляет наибольший интерес, поскольку по мере своего движения ко дну многократно используется в пищевых цепях, начиная от фитопланктона и кончая рыбами и млекопитающими. Другими источниками фосфора в морской воде служат его поступление в составе атмосферных выпадений (осадков и пыли), с подземными и ледниковыми стоками, при абразии берегов и дна, в составе космогенного материала [13].

6.2.1. Фосфаты

Режим фосфатов в водах Черного моря в период до зарегулирования речного стока достаточно освещен, например, в работах Н. И. Чигирина [175], С. В. Бруевича [28], В. Г. Дацко [60], Я. К. Гололобова [44, 45], М. А. Доброжанской 68, 70]. Эти исследования позволили выявить характерные особенности в распределении и динамике фосфатного фосфора. Основными из них являются следующие.

Воды моря характеризуются относительно высоким содержанием фосфатов, особенно это характерно для глубинных слоев (табл. 58). В поверхностном слое, по данным различных авторов [44, 45, 60, 68, 70, 109, 175], средняя концентрация фосфатов изменялась в пределах 5—34 мкг/л. Максимальное содержание фосфатов обычно наблюдалось в районах, подверженных влиянию материкового стока, как-то: вблизи устьев Дуная, Днестра, рек Кавказского побережья и в районе, прилегающем к Керченскому проливу.

В слое вод 10—25 м содержание фосфатов обычно меньше, чем на поверхности, что является следствием интенсивного потребления их фитопланктоном.

Второй промежуточный максимум концентрации фосфатов залегает на глубине 150—200 м. Его местоположение связано с распадом накопляющегося на этих горизонтах и отмирающего при контакте с сероводородной зоной планктона. Далее с глубиной положительный градиент содержания фосфатов понижается и в слое 1000—2000 м достигает своих минимальных значений.

Как уже отмечалось, пространственное распределение фосфатов на поверхности в первую очередь определяется интенсивностью влияния материкового стока. Роль материкового стока в распределении фосфатов достаточно отчетливо прослеживается также по всей толще фотосинтезирующего слоя. Ниже зоны фотосинтеза доминирующее влияние на характер распределения фосфатов оказывает система течений. В центрах халистатических областей наблюдается подъем изоповерхностей концентраций фосфатов, на периферии — опускание.

В период до зарегулирования речного стока в море с материковыми водами ежегодно посту-

Таблица 58

Концентрация фосфатного фосфора в водах Черного моря в период до зарегулирования речного стока по данным различных авторов, мкг/л

Источник информации	Период наблюдений	Глубина, м							
		0	10	25	50	75	100	150	200
Чигирин [174]	1926—1928	34	33	43	48	62	79	174	203
Гололобов [46, 47]	1940—1949	14	12	13	17	27	39	77	119
Добржанская [64, 67, 68, 72]	1946—1955	7	6	6	9	21	30	—	114
Гололобов [46, 47]	IV 1949	13	12	12	19	35	41	52	63
Дацко [60]	1948—1950	12	13	11	17	27	40	—	124
Любимова [109]	V 1954	8	—	7	9	13	21	68	128
Любимова [109]	X 1954	6,6	—	4,8	7,2	11,9	20,7	64,8	131,7
Любимова [109]	VII 1955	5,2	4,7	5,3	13,5	24,0	37,7	107,0	149,0

Источник информации	Период наблюдений	Глубина, м							
		300	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Чигирин [174]	1926—1928	230	273	—	315	—	348	—	356
Гололобов [46, 47]	1940—1949	133	138	140	141	—	151	—	169
Добржанская [64, 67, 68, 72]	1946—1955	130	161	—	188	—	218	—	242
Гололобов [46, 47]	IV 1949	—	80	86	95	—	110	—	114
Дацко [60]	1948—1950	135	174	—	188	—	240	—	262
Любимова [109]	V 1954	136	161	171	179	—	201	—	210
Любимова [109]	X 1954	135,7	162,5	173,7	182,9	190,1	207,6	206,0	197,2
Любимова [109]	VII 1955	167,5	185,6	207,0	213,6	222,5	216,0	217,0	206,0

пало в среднем 20 000 т фосфатов (табл. 59). В то же время, по данным В. И. Чигирина [175], в обогащении вод моря фосфатами материковый сток занимает лишь третье место. Главенствующая роль в данном случае принадлежит притоку фосфатов с глубинными водами и регенерации фосфорного комплекса в зоне фотосинтеза.

Аналитические методы. Начиная с первых наблюдений (1926—1928) и по 1970 г., фосфаты в водах Черного моря определялись по церулиомолибдатному методу, предложенному Дениже и внедренному в практику морских гидрохимических исследований Аткинсом. Метод основан на способности разбавленного раствора ионов фосфорной кислоты при взаимодействии с раствором молибденовокислого аммония образовывать окрашенные гетерополикислоты. При действии восстановителя, в качестве которого в данном методе выступает раствор хлористого олова, на гетерополикислоты шестивалентный молибден восстанавливается. В результате реакции образуются продукты восстановления, окрашенные в интенсивно синий цвет.

Таблица 59

Поступление фосфатов в Черное море с речным стоком до его зарегулирования [4]

Река	Год	Водный сток, км³	Сток фосфатов, т
Дунай	1948	211	19 850
	1949	143	11 860
	1950	146	19 970
	Среднее за период	166	17 227
Днестр	1952	7,26	310
	1953	8,29	620
	1954	6,58	350
	Среднее за период	7,38	427
Днепр	Среднее за 1951—1954 гг.	41,9	1 700
Южный Буг	1952	2,10	160
	1953	2,73	370
	1954	1,39	60
	1955	2,39	170
	Среднее за период	2,15	190
Всего (в среднем за периоды наблюдений)		218	19 544

Как уже отмечалось, первые сведения о содержании фосфатов в Черном море (20-е гг. и начало 30-х гг.) были несколько завышены по сравнению с последующими определениями. С. В. Бруевич объясняет имеющее место несоответствие неправильным приготовлением стандартов. В первые годы наблюдений вместо безводного KH_2PO_4 в качестве стандарта использовали гидратированные соли NH_4NaNPO_4 и Na_2HPO_4, дающие трудно получаемый и двуводный и нестабильный двенадцативодный гидраты. Кроме этого, стандартные растворы готовились на дистиллированной воде без введения солевых поправок. В дальнейшем определение фосфатов производилось с учетом указанных замечаний.

С 1971 г. и по настоящее время, согласно рекомендациям Международного совета по изучению морей, для определения фосфатного фосфора стали применять метод Морфи и Райли. Анализ предусматривает использование в качестве восстановителя аскорбиновую кислоту [125, 126]. Необходимо учитывать, что унифицированный метод дает сопоставимые результаты с предыдущим при концентрациях фосфатов выше 5 мкг/л.

Динамика концентраций фосфатного фосфора. После зарегулирования речного стока наблюдения, проведенные как методом Дениже — Аткинса, так и методом Морфи и Райли, показали, что характер пространственного и вертикального распределения фосфатов и фотическом слое моря существенно не изменился (рис. 64, 65; табл. 60).

В поверхностном слое средняя годовая концентрация фосфатов составляет <10—71 мкг/л при наиболее часто повторяющихся значениях

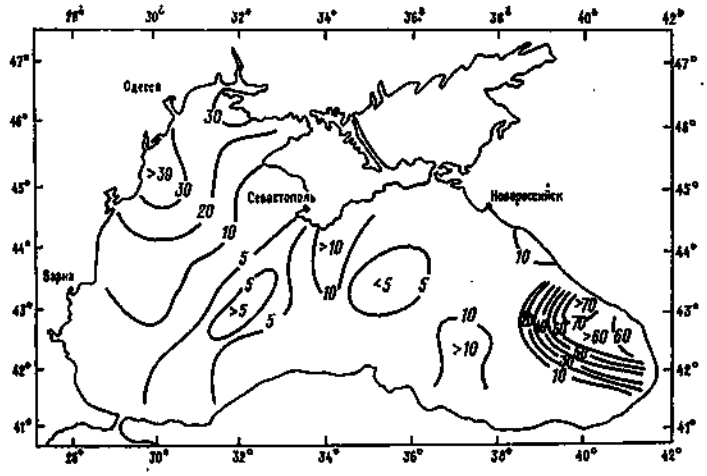

Рис. 64. Среднее годовое распределение фосфора фосфатного в поверхностном слое в период 1973—1985 гг., мкг/л.

<10—15 мкг/л (рис. 65). Максимальные концентрации (свыше 20 мкг/л) наблюдаются в юго-восточном и северо-западном районах моря. Устойчивое во времени высокое содержание фосфатного фосфора в поверхностных водах юго-восточной части моря связано с эвтрофикацией данной акватории, поскольку в районах городов Поти и Батуми значительная часть сточных вод не проходит механической очистки. Здесь же наблюдаются повышенные концентрации кремния (1000 мкг/л), нитритов (>7 мкг/л) и загрязняющих веществ. В северо-западном районе повышенное содержание фосфатов в первую очередь обусловлено притоком материковых вод. Согласно данным А. В. Рождественского [189], среднее содержание фосфора фосфатов в Дунае составляет 77 мкг/л. В северо-западном районе лишь в исключительных случаях концентрация этого фосфора достигает 40—50 мкг/л. В открытой части моря содержание фосфатного фосфора изменяется в узком диапазоне (<10—13 мкг/л). Таким образом, наибольшее влияние на распределение фосфатов в поверхностном слое оказывают загрязнение промышленными, сельскохозяйственными и хозяйственно-бытовыми водами, материковый сток, а также подъем придонной взвеси на мелководье. Обо всем этом свидетельствует тенденция к увеличению содержания фосфатного фосфора по мере приближения к прибрежным районам.

По данным В. И. Губанова [51, 52], в западной части моря влияние материкового стока на режим фосфатов распространяется вплоть до прибосфорского района. В феврале 1981 г. распределение фосфатного фосфора в юго-западной части моря как по площади, так и по глубине, имело типичный характер для зимнего сезона. Содержание фосфора фосфатного на поверхности изменялось от 10 до 21 мкг/л. Минимальные концентрации фосфатов наблюдались в поверхностном 50-метровом слое; далее с глубиной их содержание резко увеличивалось. Спустя месяц (25—30 марта) район исследований был подвержен интенсивному вторжению опресненных вод, поступивших в результате прохождения паводка на р. Дунай. Об

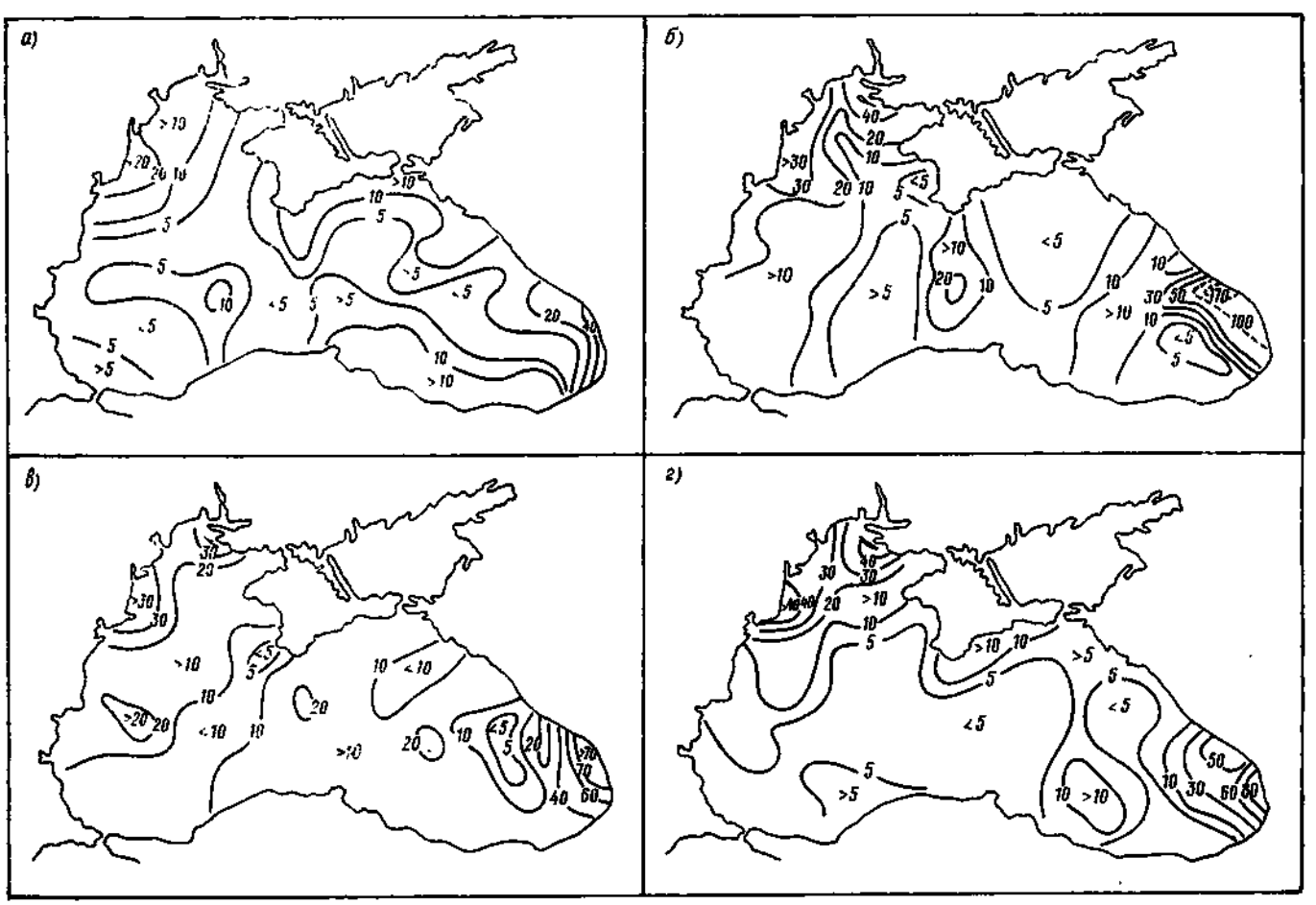

Рис. 65. Распределение фосфора фосфатного в поверхностном слое моря в период 1973—1985 гг. по сезонам, мкг/л.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

Таблица 60

Межгодовая и сезонная динамика концентраций фосфора фосфатного, 1973—1985 гг.

Сезон	Горизонт, м	Число наблюдений	Концентрация, мкг/л			Среднее квадратическое отклонение, мкг/л
			максимальная	минимальная	среднее	
1973 г.						
Весна	0	156	210	0	26	32
	10	73	170	0	18	32
	20	49	74	< 10	23	< 10
	30	2	13	0	< 10	—
	50	6	20	< 10	13	< 10
	100	6	23	< 10	15	< 10
Лето	0	194	97	0	14	18
	10	103	83	0	11	16
	20	64	100	0	< 10	13
	30	16	20	0	< 10	< 10
	50	22	46	0	< 10	< 10
	75	12	23	0	< 10	< 10
	100	13	46	0	21	17
Осень	0	202	130	0	13	23
	10	162	140	0	10	21
	20	94	46	0	< 10	10
	30	72	81	0	< 10	13
	50	65	69	0	10	13
	75	58	78	0	16	16
	100	53	200	0	26	< 10
Зима	0	144	140	0	18	25
	10	108	83	0	11	17
	20	62	93	0	< 10	12
	30	45	76	0	< 10	12
	50	43	23	0	< 10	< 10
	75	42	47	0	16	13
	100	37	45	0	24	15
1974 г.						
Весна	0	331	120	0	19	27
	10	210	100	0	17	26
	20	153	140	0	10	16
	30	77	95	0	11	17
	50	68	40	0	10	< 10
	75	62	46	0	17	14
	100	53	80	0	24	17
Лето	0	279	83	0	10	19
	10	163	93	0	< 10	16
	20	33	74	0	< 10	11
	30	13	57	0	29	16
	50	4	42	12	25	13
Осень	0	335	180	0	10	19
	10	237	150	0	< 10	16
	20	148	36	0	< 10	11
	30	84	25	0	< 10	< 10
	50	70	31	0	< 10	< 10
	75	60	83	0	13	14
	100	54	87	0	20	18
Зима	0	282	150	0	11	17
	10	165	74	0	< 10	10
	20	152	47	0	< 10	11
	30	78	24	0	< 10	< 10
	50	77	41	0	< 10	< 10
	75	66	66	0	13	14
	100	57	130	0	19	22
1975 г.						
Весна	0	167	110	0	14	18
	10	70	170	0	15	26
	20	106	110	0	12	14
	30	40	31	0	< 10	< 10
	50	35	48	0	11	10
	75	29	47	0	24	16
	100	27	180	0	48	42
Лето	0	241	50	0	< 10	11
	10	118	48	0	< 10	10
	20	118	34	0	< 10	< 10
	30	63	24	0	13	< 10
	50	64	49	0	15	11
	75	56	55	0	24	16
	100	46	71	< 10	34	19
Осень	0	116	46	0	10	11
	10	56	46	0	12	11
	20	36	37	0	10	10
	30	14	32	0	< 10	< 10
	50	2	< 10	0	< 10	—
Зима	0	147	37	0	11	< 10
	10	49	30	0	11	< 10
	20	67	28	< 10	10	< 10
	30	4	10	< 10	< 10	< 10
	50	4	13	< 10	< 10	< 10
	75	1	—	—	< 10	—
	100	2	27	25	26	—
1976 г.						
Весна	0	195	58	0	10	< 10
	10	92	51	0	11	12
	20	58	27	0	< 10	< 10
	30	11	51	0	12	14
	50	10	19	< 10	10	< 10
	75	1	—	—	15	—
	100	2	21	12	17	—
Лето	0	191	110	0	14	18
	10	77	85	0	11	16
	20	76	75	0	< 10	12
	30	16	< 10	0	< 10	< 10
	50	21	20	0	< 10	< 10
	75	1	—	—	15	—
	100	13	46	0	19	16
Осень	0	221	170	0	17	26
	10	133	140	0	13	19
	20	99	140	0	< 10	14
	30	34	59	0	10	14
	50	15	35	0	< 10	10
	75	2	30	< 10	18	—
	100	2	92	15	54	—
Зима	0	84	100	0	24	28
	10	43	74	0	19	24
	20	4	62	0	21	25
	30	2	76	< 10	39	—
	50	2	< 10	< 10	< 10	—
1977 г.						
Весна	0	201	110	0	28	32
	10	95	100	0	20	23
	20	56	100	< 10	13	16
	30	1	—	—	51	—
	50	5	12	0	< 10	< 10
Лето	0	333	160	0	30	37
	10	199	150	0	26	34
	20	137	160	0	14	19
	30	62	25	0	13	12
	50	61	32	0	12	< 10
	75	54	49	0	21	15
	100	47	49	0	26	15
Осень	0	219	120	0	19	22
	10	102	170	0	20	25
	20	87	30	0	< 10	< 10
	30	19	50	0	13	12
	50	22	37	0	< 10	10
	75	18	75	0	20	18
	100	18	75	0	31	20

Сезон	Горизонт, м	Число наблюдений	Концентрация, мкг/л			Среднее квадратическое отклонение, мкг/л
			максимальная	минимальная	средняя	
Зима	0	195	100	0	20	26
	10	86	140	0	21	25
	20	62	84	0	< 10	12
	30	1	—	—	16	—
	50	8	11	< 10	< 10	< 10
	75	1	—	—	< 10	—
	100	2	12	9	11	< 10
1978 г.						
Весна	0	168	320	0	32	31
	10	85	380	0	26	43
	20	16	57	< 10	26	14
	30	4	16	< 10	< 10	< 10
	50	1	—	—	13	—
Лето	0	146	130	0	32	28
	10	73	67	0	22	14
	20	9	61	10	23	15
	30	1	—	—	10	—
	50	1	—	—	< 10	—
Осень	0	122	170	0	25	31
	10	28	71	0	22	19
	20	89	310	0	28	43
	30	8	55	0	24	15
	50	2	24	20	22	—
Зима	0	127	140	< 10	38	31
	10	46	95	10	34	30
	20	11	110	< 10	—	29
1979 г.						
Весна	0	88	75	0	25	18
	10	14	40	< 10	17	11
	20	71	50	< 10	23	15
	30	7	19	< 10	10	< 10
	50	2	< 10	< 10	< 10	—
Лето	0	124	150	0	30	40
	10	32	240	< 10	50	47
	20	56	310	0	26	54
	30	3	100	92	95	—
Осень	0	162	190	0	31	25
	10	83	150	0	12	23
	20	114	140	0	15	34
	30	49	92	0	< 10	15
	50	46	120	0	11	22
	75	43	56	0	18	19
	100	39	69	0	28	23
Зима	0	86	75	0	20	21
	10	51	58	0	25	20
	20	60	52	0	14	18
	30	25	57	0	< 10	12
	50	20	28	0	< 10	< 10
	75	20	47	0	19	14
	100	19	47	0	22	12
1980 г.						
Весна	0	205	290	0	< 10	57
	10	91	140	0	35	33
	20	34	86	0	26	33
	30	13	25	0	< 10	< 10
	50	5	26	0	< 10	12
Лето	0	117	240	0	48	51
	10	65	400	0	100	92
	20	18	400	17	160	130
	30	4	86	18	37	26
	50	3	39	24	30	—
	75	1	—	—	43	—

Сезон	Горизонт, м	Число наблюдений	Концентрация, мкг/л			Среднее квадратическое отклонение, мкг/л
			максимальная	минимальная	средняя	
Осень	0	148	760	0	77	99
	10	65	350	0	84	93
	20	20	400	0	130	110
	30	2	12	< 10	< 10	—
	50	3	37	< 10	17	—
	75	1	—	—	< 10	—
Зима	0	160	280	0	51	54
	10	58	390	0	47	67
	20	13	110	0	43	38
	30	2	12	11	12	—
	50	3	42	12	24	—
	75	1	—	—	10	—
1981 г.						
Весна	0	264	160	0	30	25
	10	130	160	0	26	31
	20	72	81	0	13	17
	30	57	46	0	< 10	< 10
	50	59	160	0	23	26
	75	47	51	< 10	26	13
	100	42	350	10	44	54
Лето	0	243	250	0	45	53
	10	158	400	0	37	48
	20	79	180	0	24	47
	30	58	160	0	12	33
	50	66	150	0	16	29
	75	51	140	0	18	22
	100	37	76	< 10	16	15
Осень	0	167	130	0	38	35
	10	125	130	0	31	31
	20	50	130	0	23	27
	30	31	72	0	18	15
	50	43	140	0	31	30
	75	9	100	13	41	29
	100	24	120	0	40	38
Зима	0	142	100	0	21	21
	10	86	110	0	17	18
	20	47	71	< 10	15	12
	30	37	32	0	13	< 10
	50	43	60	0	15	15
	75	38	91	< 10	23	16
	100	32	93	< 10	32	19
1982 г.						
Весна	0	145	210	0	40	48
	10	111	160	0	37	50
	20	73	160	0	25	39
	30	18	140	< 10	28	30
	50	59	44	0	20	65
	75	5	35	< 10	28	15
	100	42	50	0	19	15
Лето	0	73	190	0	49	46
	10	93	130	0	27	31
	20	50	110	0	20	25
	30	17	61	0	18	15
	50	11	32	< 10	17	< 10
	75	3	24	11	16	< 10
	100	3	32	12	21	—
Осень	0	116	130	0	30	24
	10	99	71	0	24	20
	20	29	65	< 10	26	15
	30	9	35	< 10	18	< 10
	50	7	24	< 10	18	< 10
	75	2	12	12	12	—
	100	21	120	0	24	24

Сезон	Горизонт, м	Число наблюдений	Концентрация, мкг/л			Среднее квадратическое отклонение, мкг/л
			максимальная	минимальная	средняя	
Зима	0	91	45	0	10	13
	10	85	39	0	< 10	< 10
	20	82	20	0	< 10	< 10
	30	13	21	0	< 10	< 10
	50	66	< 10	0	< 10	< 10
	75	11	18	0	< 10	< 10
	100	52	50	0	14	15
			1983 г.			
Весна	0	310	210	0	21	23
	10	76	71	0	14	12
	20	27	25	0	11	< 10
	30	9	26	< 10	11	< 10
	50	8	17	10	12	< 10
	75	2	13	11	12	—
	100	2	13	11	12	—
Лето	0	375	160	0	27	29
	10	87	88	0	17	15
	20	42	95	0	12	16
	30	5	26	0	< 10	< 10
	50	25	24	0	10	< 10
	100	20	47	< 10	21	15
Осень	0	191	470	0	47	65
	10	50	290	0	49	65
	20	22	51	< 10	24	13
	30	16	56	< 10	25	14
	50	14	94	< 10	36	25
	100	14	120	< 10	46	45
Зима	0	108	290	0	33	43
	10	51	34	< 10	11	< 10
	20	37	20	0	< 10	< 10
	50	26	25	< 10	10	< 10
	100	20	98	< 10	27	27
			1984 г.			
Весна	0	148	450	0	50	76
	10	57	390	0	46	78
	20	34	74	0	22	17
	30	11	18	0	15	17
	50	9	60	0	23	18
	75	4	< 10	0	< 10	< 10
	100	1	—	—	30	—
Лето	0	250	470	0	28	59
	10	125	110	0	15	17
	20	76	38	0	12	10
	30	3	24	0	15	—
	50	25	32	0	15	< 10
	100	15	45	< 10	29	10
Осень	0	87	500	0	51	80
	10	46	340	0	45	62
	20	24	150	0	29	35
	30	9	20	0	10	< 10
	50	10	32	10	14	< 10
	100	5	37	< 10	27	12
Зима	0	95	28	0	11	< 10
	10	59	18	0	< 10	< 10
	20	58	31	0	< 10	< 10
	30	15	61	< 10	11	14
	50	18	31	< 10	14	< 10
	75	9	16	< 10	12	< 10
	100	3	20	16	17	—
			1985 г.			
Весна	0	147	370	0	52	140
	10	98	99	0	23	21
	20	57	63	0	14	12
	50	30	32	0	12	< 10
	75	4	19	0	16	< 10
	100	24	120	0	41	40
Лето	0	115	220	0	34	29
	10	65	120	< 10	31	20
	20	27	47	< 10	23	12
	30	8	32	< 10	20	< 10
	50	22	32	< 10	19	< 10
	75	4	21	16	19	< 10
	100	3	52	10	24	—
Осень	0	170	81	0	24	19
	10	108	76	0	23	18
	20	40	48	0	15	11
	30	18	32	0	14	< 10
	50	33	40	0	18	< 10
	75	6	32	0	16	13
	100	19	66	< 10	33	15
Зима	0	28	89	< 10	25	20
	10	25	89	< 10	29	22
	20	13	17	< 10	< 10	< 10
	50	9	48	< 10	18	12
	75	1	—	—	27	—
	100	8	110	14	36	32

этом убедительно свидетельствовали данные визуальных (изменение цветности и прозрачности воды, наличие на поверхности дрейфующих кустарников, веток и даже целых деревьев) и инструментальных (понижение температуры до 6,6 °С и солености до 15 ‰, увеличение концентрации растворенного кислорода до 14,76 мг/л и pH до 9,0) наблюдений. Процесс поступления в прибосфорский район смешанной морской и речной водной массы сопровождался увеличением концентрации фосфора в поверхностном слое на 10—20 мкг/л по сравнению с периодом, когда влияние материкового стока не наблюдалось. Поступление дунайской воды способствовало обогащению фосфатами не только поверхностного слоя прибосфорского района, но и всей водной толщи до дна (глубина 100 м).

Многочисленные наблюдения, проведенные в прибосфорском районе, позволили выяснить роль средиземноморских вод, поступающих с нижним босфорским течением, в формировании режима фосфатов в Черном море [53].

А. В. Рождественский [128—131] и М. А. Добржанская [73—75] рассматривают влияние водообмена через Босфор на режим фосфатов в Черном море в различных аспектах. Согласно А. В. Рождественскому, влияние средиземноморской воды на характер распределения фосфатов определить трудно. Отмечая повышенное содержание фосфатов в воде нижнего босфорского течения по сравнению с верхним, А. В. Рождественский полагает, что процесс обогащения фосфатами средиземноморской воды является следствием увеличения загрязнения ко дну Босфора и влияния донных отложений. М. А. Добржанская в одной из работ считает, что трансформированная средизем-

номорская вода характеризуется пониженной концентрацией фосфатов [73], а в другой приходит к совершенно противоположному выводу [75].

Согласно нашим данным [51, 53], средневзвешенная концентрация фосфора в слое 0—50 м Афонского и северо-западной части Хиосского бассейнов Эгейского моря, водами которого формируется нижнебосфорское течение в проливе Босфор, составляет 5,9 мкг/л. При следовании из Эгейского моря в Черное средиземноморская вода значительно обогащается фосфатами. По-видимому, процесс обогащения начинается в Мраморном море. Доказательством этого предположения являются относительно высокие концентрации фосфора (16 мкг/л) в центре Мраморного моря на глубине 100 м (по данным единичных наблюдений). Дальнейшее развитие процесс концентрирования фосфора вод средиземноморского потока получает в Босфоре вследствие увеличения загрязнения ко дну пролива [129, 131]. Так, по данным А. В. Рождественского [129], вода нижнего течения в Босфоре в декабре 1963 г. содержала 18 мкг/л. При движении по шельфовой зоне прибосфорского района Черного моря струя средиземноморской воды также продолжает обогащаться фосфатами. Температура воды нижнебосфорского течения на 4—5 °С выше температуры окружающей воды Черного моря. Совпадение максимумов температуры и солености с максимальными концентрациями минерального фосфора позволяет предположить, что обогащение струи средиземноморской воды фосфатами в Черном море происходит в первую очередь за счет интенсификации процессов распада и минерализации органического вещества в донных отложениях при повышении температуры воды.

Средняя концентрация минерального фосфора в воде средиземноморского потока на расстоянии 13—15 миль от Босфора (глубина 100 м) составляет 26,7 мкг/л. С водой нижнего босфорского течения фосфаты поступают в Черное море со скоростью 0,2 кг/с ($5{,}8 \cdot 10^3$ т/год).

Механизм поступления фосфатов в Черное море ярко иллюстрируют наблюдения, проведенные в течение 5 сут на прибосфорском полигоне (октябрь 1981 г.).

Во временном ходе содержания фосфатов прослеживались периодические колебания (рис. 66), причина которых была раскрыта после обработки гидрологических характеристик. Появление максимальных концентраций минерального фосфора (свыше 20 мкг/л) в струе воды нижнебосфорского течения хорошо согласовывалось с экстремумами хода температуры и солености. При увеличении скорости потока, расположенного над нижнебосфорской струей, до 40 см/с (горизонт 50 м) процессы трансформации средиземноморской воды интенсифицировались, о чем свидетельствовало понижение термохалинных характеристик. Интенсификация перемешивания сопровождалась резким падением концентрации фосфора (до 6,2 мкг/л) в воде средиземноморской струи. Таким образом, в период исследований содержание минерального фосфора в водах нижнебосфорского течения было значительно выше, чем в окружающей его черноморской воде.

Расчетами установлено, что в результате массообмена через прол. Босфор, происходит обога-

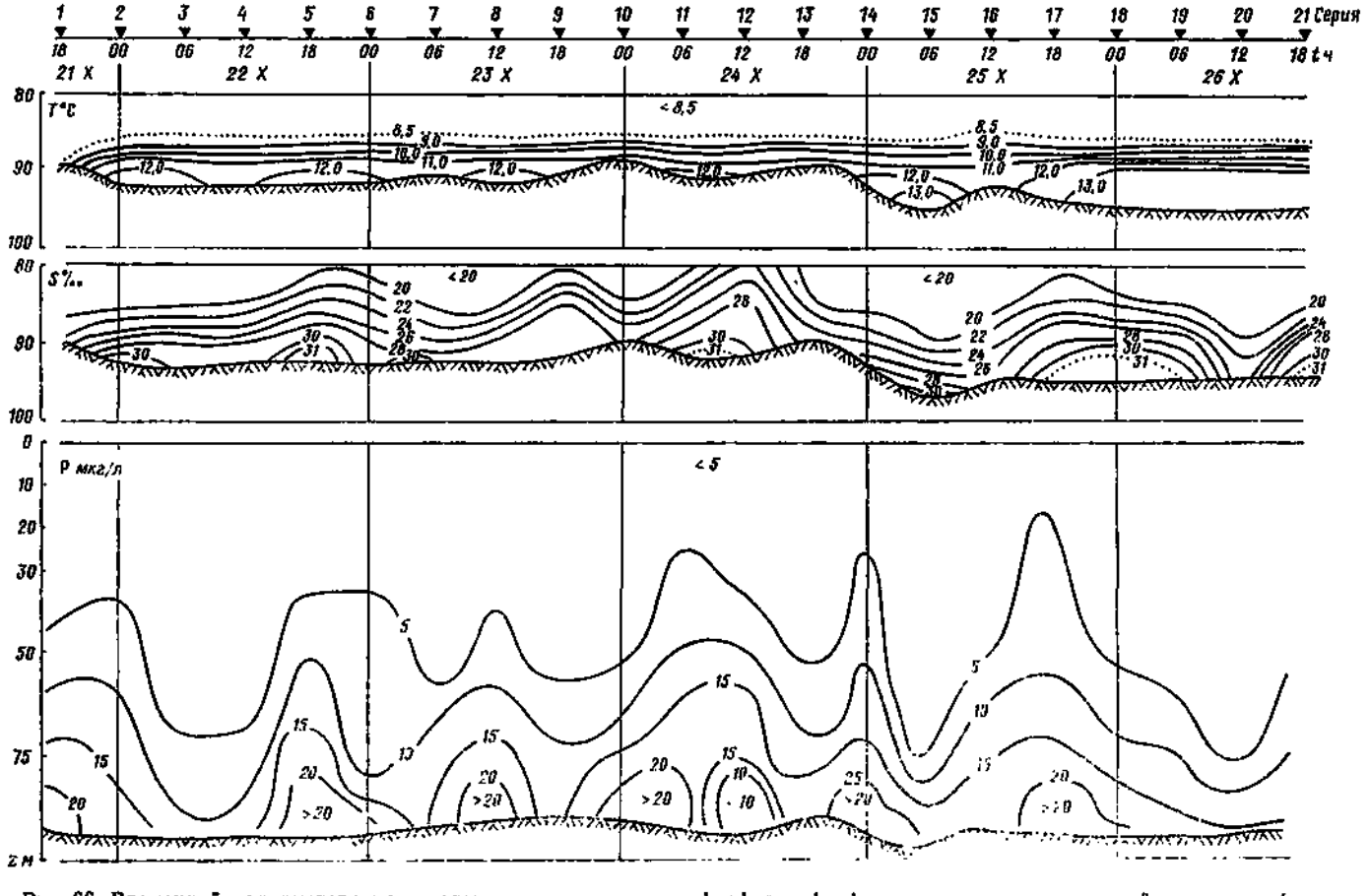

Рис. 66. Временной ход температуры, солености и содержания фосфора фосфатного на многосуточной станции ($\varphi = 41°29{,}3'$; $\lambda = 29°02{,}6'$) в прибосфорском районе в 1981 г.

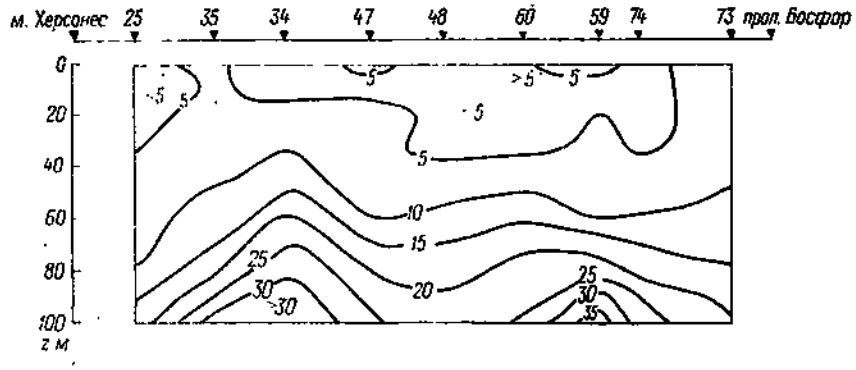

Рис. 67. Среднее годовое распределение фосфора фосфатного на разрезе м. Херсонес — прол. Босфор, мкг/л.

щение фосфатами как Черного, так и Эгейского морей, что связано с эвтрофикацией вод пролива. Водообмен способствует ежегодному увеличению количества фосфора фосфатного в Черном море на $2{,}6 \cdot 10^3$ т.

Как и по кремнию, наиболее обогащенными по фосфатам зонами моря являются юго-восточный и северо-западный районы. В то же время в этих районах довольно часто встречаются концентрации фосфатов, свидетельствующие о прогрессирующей эвтрофикации. В открытых частях моря содержание фосфора фосфатного обычно меньше 10 мкг/л.

По сравнению с поверхностью на глубине 5—25 м содержание фосфатов уменьшается вследствие усиленного потребления их в этом слое фитопланктоном. Характер пространственного распределения фосфатов на этих глубинах остается прежним. Максимумы их содержания наблюдаются в прибрежных районах в первую очередь в северо-западном и юго-восточном, минимумы — в центральной акватории моря. Далее с глубиной концентрация фосфора возрастает, достигая своих максимальных значений у дна (200—250 мкг/л на 1500—2000 м [28]). В глубинной толще вод картина пространственного распределения фосфатов совершенно иная. Затухание и полное отсутствие в глубинных слоях влияния речного стока, гидробиологических и метеорологических факторов приводит к главенствующей роли в распределении фосфатного фосфора системы течений (рис. 67). Подъем вод в центрах циклонических круговоротов благоприятствует выносу фосфатов из глубинных слоев к поверхности.

Анализируя данные по содержанию фосфатов в открытой акватории моря в периоды до зарегулирования речного стока (см. табл. 58) и после зарегулирования (табл. 61), очевидно, что в современный период содержание фосфатов в поверхностном 100-метровом слое значительно уменьшилось. Наши наблюдения подтверждают данные А. А. Аксенова, согласно которым [1] в центральных районах моря содержание фосфатов за период с 1950 по 1978 г. уменьшилось вдвое. В слое 0—100 м за 1928—1978 гг. извлечено 3 г/м² неорганического фосфора [57].

Тенденция к уменьшению содержания фосфатов в кислородной зоне моря, несомненно, обусловлена увеличением биомассы фитопланктона. По данным Г. П. Маштаковой (цит. по [82]), в восточной глубоководной части моря биомасса суммарного фитопланктона за 1960—1982 гг. возрасла в 2,9 раза. Одновременно с этим отмечен рост первичной продукции (в 3 раза) и численности бактерий (в 1,5—2 раза) [1].

За последние 13 лет межгодовые изменения содержания фосфатов в поверхностном 100-метровом слое характеризуются переменным трендом (рис. 68). В этот период их концентрация немонотонно изменялась в пределах: 11—47 мкг/л — на поверхности, 9—31 мкг/л — на глубине 30 м, 10—29 мкг/л — на глубине 50 м и 20—36 мкг/л — на глубине 100 м. В 1981—1985 гг. содержание фосфатов несколько стабилизировалось и составляло 32—35 мкг/л на поверхности, 13—19 мкг/л — на 30 м, 16—21 мкг/л — на 50 м и 20—34 мкг/л — на 100 м.

Таблица 61

Концентрация фосфора фосфатного в открытой части Черного моря в 1981—1985 гг.

Год	Горизонт, м	Концентрация, мкг/л	
		средняя	максимальная
1981	0	< 10 (9)	33
	10	< 10 (8)	30
	50	13	52
	100	37	100
1982	0	< 10 (6)	45
	50	21	25
	100	44	50
1983	0	< 10 (6)	74
	10	< 10 (6)	36
	50	24	110
	100	26	190
1984	0	12	90
	10	12	84
	50	12	34
	100	26	45
1985	0	13	210
	50	14	48
	100	26	120

Примечание. В скобках даны примерные значения концентраций.

Наряду с межгодовой изменчивостью поле фосфатов, особенно в фотосинтезирующем слое, подвержено сезонным временным изменениям. Среднесезонные концентрации фосфатов, рассчитанные для всей акватории моря, не позволяют выявить строгой закономерности в их внутригодовой динамике (см. табл. 60). Каждому из отдельных районов моря характерны специфические особенности в сезонной динамике концентраций фосфатного фосфора (см. рис. 65).

Пространственное распределение и сезонная динамика фосфатов в северо-западной части моря по усредненным данным за 1973—1985 гг. показывает максимум в теплый и минимум в холодный периоды года. Очевидно, что такой внутригодовой ход содержания фосфатов связан с изменениями режима водного стока. В период зимней межени концентрация фосфатного фосфора даже в районе прилегающем к устью Дуная, едва превышает 20 мкг/л. Аналогичная динамика концентрации фосфатов наблюдается и в юго-восточном районе.

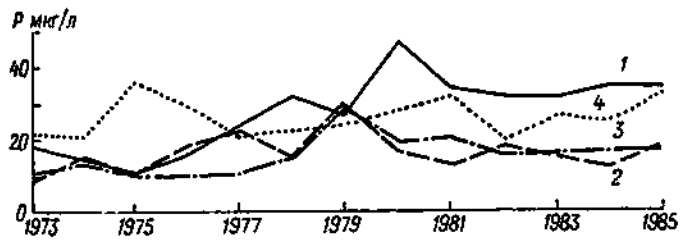

Рис. 68. Концентрация фосфатного фосфора в водах Черного моря в 1973—1985 гг.
1 — поверхность; *2* — 30 м; *3* — 50 м; *4* — 100 м.

Однако здесь на их летний максимум доминирующее влияние оказывают процессы гниения и минерализации органического вещества, сдерживаемые зимой низкими температурами. Содержание фосфатов в мелководном Варненском заливе, по данным А. В. Рождественского [132], очень велико в результате загрязнения. Максимальные концентрации фосфатов наблюдаются в январе, минимальные — в мае. В юго-западном районе моря внутригодовая динамика показывает максимум весной и минимум осенью [53]. Подобная сезонная динамика фосфатов наблюдается лишь в северной части филлофорного поля Зернова, где весенний максимум содержания фосфатов А. В. Рождественский объясняет увеличением речного стока в этот период и интенсификацией процессов гниения и распада органических веществ вследствие прогрева водной толщи [132]. По данным Я. К. Гололобова [45] и П. Т. Данильченко и Н. И. Чигирина [59], для остальных районов моря максимальная концентрация фосфатов наблюдается зимой.

На примере многочасовых наблюдений рассмотрена мелкомасштабная временная динамика концентраций фосфора (рис. 69). Из рис. 69 следует, что в прибосфорском районе динамика фосфатов по всей водной толще (0—100 м) во все периоды наблюдений была значительной. Район исследований можно классифицировать как динамически активный (периферия циклонического круговорота, близость прол. Босфор). Именно этим объясняется имеющее место несоответствие между изменениями в содержании фосфатов и внутрисуточным ходом численности фитопланктона. В целом непериодические колебания концентраций фосфатного фосфора на многочасовой станции как на поверхности, так и по глубине, обусловлены изменениями гидрометеорологических условий.

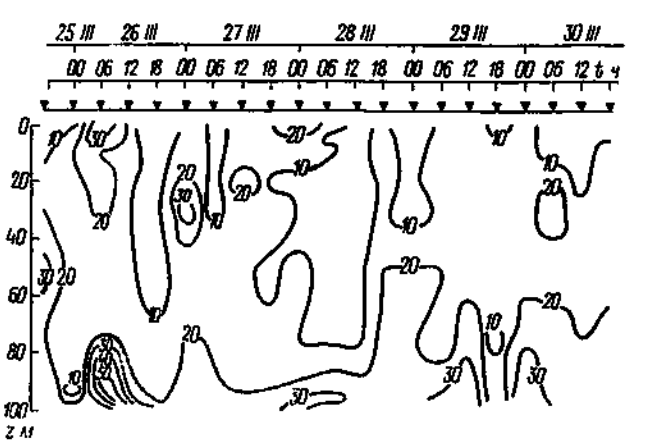

Рис. 69. Временной ход концентраций фосфатного фосфора на многочасовой станции в прибосфорском районе в 1981 г., мкг/л.

Элементы баланса фосфатов. Уравнение внешнего баланса фосфатов аналогично таковому для кремния (см. п. 6.1.3). К настоящему времени не представляется возможным количественно оценить все составляющие баланса. Поэтому остановимся лишь на тех статьях баланса, которые можно рассчитать.

Поступление с речным стоком. В табл. 59 приведена информация о поступлении фосфатов в Черное море в период до зарегулирования речного стока. К настоящему времени самый крупный каскад ГЭС сооружен на р. Днепре. На Дунае наиболее мощная гидроэлектростанция расположена в ущелье Железные ворота. На Днестре возведена Дубоссарская ГЭС. Имеется также ряд небольших гидроэлектростанций на Южном Буге.

После зарегулирования стока самые значительные изменения в гидрохимическом режиме претерпел Днепр. Эти изменения проявились как в сдвиге максимумов и минимумов биогенных веществ, в частности фосфатов, так и в уменьшении амплитуды колебания их содержания в течение года. Причина этих изменений в нижнем Днепре обусловлена смешением в Каховском водохранилище частично аккумулированных маломинерализованных паводковых вод с поступающими в другие периоды года (особенно в межень) более минерализованных. Это определяет относительно равномерное содержание фосфатов по сезонам в нижнем Днепре. Гибель фитоорганизмов при прохождении днепровской воды через турбины ГЭС, а также относительно большие скорости течения воды препятствуют развитию фитопланктона. Исходя из этого, содержание биогенных элементов в исключительных случаях падает до «аналитического нуля». Таким образом, в нижнем течении Днепра биогенные элементы не лимитируют развития фитопланктона.

Методологический подход к оценке стока фосфатов в Черное море был таким же, как и в случае с кремнием. Из результатов расчета (табл. 62) следует, что с водами рек в море в среднем ежегодно поступает примерно 52 000 т фосфатов.

Поступление с атмосферными выпадениями. По данным В. П. Гончарова и др. [48], площадь зеркала Черного моря составляет 420 325 км². Среднее многолетнее значение атмосферных осадков, выпадающих над морем, 518 мм. Исходя из этих значений, ежегодно в виде атмосферных осадков на поверхность Черного моря выпадает 218 км³ воды.

Единичные наблюдения показали, что содержание растворенного фосфора в чистых атмосферных осадках колеблется в пределах 0,3—6,0 мкг/л при

среднем значении 2 мкг/л. В этом случае в море с атмосферными осадками ежегодно поступает 436 т фосфатов.

Поступление с материалами абразии берегов. Берега моря подвергаются волновому воздействию. Количество абразивного материала оценивается в

Таблица 62

Поступление фосфора фосфатного в Черное море с речным стоком, т

Река	1981	1982	1983	1984	1985	Среднее поступление за год, т
Дунай	—	22 280	18 899	79 676	53 876	43 683
Днестр	—	1 359	684	1 349	1 545	1 234
Днепр	—	7 463	1 984	932	6 027	4 102
Южный Буг	683	407	283	336	585	459
Риони	—	1 102	(226)	(467)	154	(487)
Чорох	—	567	126	364	125	296
Ингури	—	24	9	22	5	15
Кодори	—	(242)	(70)	(183)	(71)	(142)
Мзымта	—	(70)	(24)	(34)	(19)	(37)
Бзыбь	—	(203)	(49)	(108)	(50)	(103)
Супса	—	(100)	(24)	(74)	(33)	(58)
Малые реки Кавказа	—	(439)	(123)	(261)	(84)	(227)
Реки Румынии и Болгарии	—	(255)	(141)	(337)	(340)	(268)
Реки Турции	—	(1 712)	(362)	(934)	(323)	(833)

Примечание. В скобках представлен вынос фосфатов, расчет которого проведен методом аналогии со смежными реками.

62900 т/год [115], а количество содержащегося в нем фосфора — 42 т.

Обмен через пролив Босфор. Средний водообмен через Босфор, по данным наблюдений в проливе и непосредственной близости от него, характеризуется в работе [52].

Согласно нашим данным (728 наблюдений), среднее содержание фосфатов в юго-западном районе Черного моря в слое 0—50 м, водами которого формируется верхнее течение в Босфоре, составляет 8,2 мкг/л. Таким образом, с верхнебосфорским течением фосфаты выносятся из Черного моря в количестве 3200 т/год.

Среднее содержание фосфатов в струе средиземноморской воды, поступающей в Черное море, составляет 26,7 мкг/л. С водами нижнего босфорского течения фосфаты поступают в Черное море в количестве 5800 т/год. Таким образом, в результате такого массообмена ежегодно увеличивается количество фосфора в море на 2600 т.

Обмен через Керченский пролив. Баланс фосфатов через Керченский пролив по наблюдениям 1967—1973 гг. рассчитывался Л. Ф. Ермаковой [77]. В результате расчетов установлено, что из Черного моря в Азовское в среднем выносится 543 т фосфатов в год, в Черное море из Азовского поступает 568 т фосфатов в год.

В последние годы (1981—1985) обмен фосфатами через Керченский пролив существенно изменился (табл. 63). Согласно нашим расчетам, сток фосфатов в пролив составляет 380 т/год, приток из пролива — 1000 т/год.

Захоронение фосфатов в грунт. Как известно, в биологическом цикле фосфор тесно связан с органическим углеродом. Это позволяет оценить ко-

Таблица 63

Обмен фосфором фосфатным через Керченский пролив

Год	Приток из Азовского моря			Сток в Азовское море		
	$Q_{вод}$ км³	C мкг/л	$Q_р$ т	$Q_{вод}$ км³	C мкг/л	$Q_р$ т
1981	59,2	24	1 420	22,4	22	490
1982	48,4	25	1 210	33,2	12	400
1983	43,1	25	1 080	34,2	10	340
1984	38,9	14	550	35,3	14	490
1985	35,3	21	740	33,8	4	140
Среднее	45,0	22	1 000	31,8	12	380

личество фосфора, осаждающегося на дно и захороняющегося в осадках в составе биогенного детрита, на основе баланса органического углерода [13].

Уточненное значение первичной продукции Черного моря по органическому углероду $5 \cdot 10^7$ т/год [61, 157]. По данным В. А. Успенского [170], в донных отложениях захоронается лишь 0,5 % фотосинтетической продукции, т. е. 250 000 т. Учитывая, что отношение P : C в придонной взвеси в среднем составляет 1 : 100, количество захороняющегося вместе с органическим веществом фосфора можно оценить в 2 500 т/год. Несомненно, именно этот путь удаления фосфора из морской воды является основным [13]. Кроме этого, часть фосфора поступает на дно и захоронается в грунты в составе костного детрита — костей и чешуи рыб, костей морских млекопитающих, путем микробиального и энзиматического осаждения, при сорбции и соосаждении с гидроокислами железа и марганца и т. д.

Изъятие фосфора рыбным промыслом. Содержание фосфора в различных тканях рыб изменяется от 0,11 до 18,92 % на сухую массу (табл. 64).

Таблица 64

Содержание фосфора в рыбах, % на сухую массу

Рыбы	Содержание фосфора	Источник
Целиком	0,94—1,84 (1,40)	[183]
Мясо рыб	0,7—3,2	[93]
Мягкие ткани рыб	0,11—1,11	[190]
То же, в золе	5,96—18,92	[190]
Чешуя рыб	6,5—8,3	[93]
Кости рыб	до 16	[93]

В целом среднее содержание фосфора в рыбах составляет 0,5 % массы сырого вещества [130].

Общий вылов рыбы в Черном море с учетом промысла Болгарии, Румынии и Турции 251 251 т (на 1972 г.). Таким образом, потери фосфора с рыбным промыслом ежегодно составляют 1 256 т.

В табл. 65 приведены некоторые составляющие баланса фосфатов, которые удалось количественно оценить. Рассчитано, что как минимум в Черное море в среднем ежегодно поступает 59 220 т. фосфора фосфатного, причем ведущая роль принадлежит речному стоку и притоку из прол. Босфор. Расход фосфора составляет не менее 7340 т. В то же время, учитывая, что концентрация фосфатов в водах Черного моря в последние годы постоянно уменьшается, очевидно, что приток фосфатов не может превышать их расход. Исходя из

Таблица 65

Некоторые статьи баланса фосфатов в Черное море

Статья баланса	Приход, тыс. т	Статья баланса	Расход, тыс. т
Поступление		Вынос	
с речным стоком	51,9	в Мраморное море	3,20
с атмосферными осадками	0,44	в Азовское море	0,38
		Захоронение в грунт	2,50
с материалами абразии берегов	0,04	Изъятие с вылавливаемой рыбой	1,26
из прол. Босфор	5,80		
из Керченского пролива	1,00		
Всего из учтенных статей баланса	59,2	Всего из учтенных статей баланса	7,34

вышеизложенного и принимая во внимание значительную невязку баланса (51 880 т), понятно, что вопросы, касающиеся баланса фосфатов, остаются открытыми и требуют дальнейшей разработки. В приходной части баланса необходимо в будущем учесть поступление фосфатов с материалами абразии дна и при субмаринной разгрузке. В расходной части баланса следует уточнить захоронение фосфатов в донные отложения, поскольку, как указывалось выше, нами была проведена лишь оценка захоронения с органическим веществом (незначительная часть общего количества). Кроме этого, необходимо определить поступление фосфатов с суши в море и при атмосферных выпадениях и обратно, при испарении соответственно.

6.2.2. Общий фосфор

Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы. Для полного представления запасов фосфора в море необходимо знание его содержания в органической форме. К сожалению, сведений о концентрации органического фосфора в водах Черного моря как в период до зарегулирования речного стока, так и после него, недостаточно. Имеющаяся в нашем распоряжении информация представлена в табл. 66. Из таблицы видно, что концентрация органического фосфора в поверхностном слое, по данным разных авторов, изменялась от 12 до 19 мкг/л. Необходимо отметить близость между результатами, полученными М. А. Добржанской, В. Г. Дацко и Е. М. Любимовой, как для поверхностного, так и нижележащих слоев. В отличие от других океанов и морей вертикальное распределение органического фосфора в целом повторяет распределение фосфатов, а именно: по мере приближения ко дну их содержание увеличивается.

В целом количество общего фосфора неизменно с глубиной увеличивается в слое 0—1000 м. Градиент фосфора по вертикали изменяется. Наибольших значений он достигает в поверхностном 200-метровом слое с максимумами в толще, расположенной между 50 и 200 м. Здесь градиент на 1 м составляет 0,03 мкг/л. Далее с глубиной градиент уменьшается и в слое 1000—2000 м практически достигает нуля [68].

Следует отметить, что и в современный период наблюдений за содержанием общего фосфора в водах моря явно недостаточно. Некоторые сведения о режиме общего фосфора представлены в работах Е. М. Любимовой [109], А. В. Рождественского [130], Б. А. Скопинцева и др. [153, 159]. Все имеющиеся в нашем распоряжении наблюдения приурочены к северо-западному району, а также к акватории моря, прилегающей к Южному берегу Крыма. Естественно, что ограниченные сведения о содержании общего фосфора не позволяют выявить закономерностей его распределения в водах всей акватории моря.

Аналитические методы. Содержание органического фосфора в придонных водах находят обычно по разнице между общим и неорганическим. В основе известных методов определения общего фосфора лежит процесс окисления его соединений до растворимого ортофосфата с последующим анализом по описанным методикам [125, 126]. С 1978 г. в нашей стране для определения общего фосфора применяется наиболее простой и достаточно надежный метод — окисление соединений фосфора надсернокислым калием [126].

При сравнении данных о содержании общего фосфора, полученных при использовании разных методов, необходимо учитывать, что новый метод дает сопоставимые результаты со старыми при концентрациях менее 5 мкг/л.

Динамика концентраций общего фосфора. В поверхностном слое концентрация общего фосфора в северо-западном районе составляет: весной — 22—260, летом — 31—260, осенью — 370—410, зимой — 64—130 мкг/л; в акватории, прилегающей к Южному берегу Крыма: весной — 36, летом — 29, осенью — 32, зимой — 28 мкг/л. Очевидно, что у Крымского побережья внутригодовое распределение концентраций общего фосфора характеризуется значительной однородностью по сравнению с таковыми в северо-западном районе моря. Об этом также убедительно свидетельствуют значения средних квадратических отклонений. На нижележащих горизонтах отмеченная тенденция в распределении общего фосфора сохраняется.

Наибольшие концентрации общего фосфора наблюдаются в летне-осенний период в районе, рас-

Таблица 66

Концентрация органического фосфора в водах Черного моря в период до зарегулирования речного стока по данным различных авторов, мкг/л

Источник информации	Дата	Глубина, м															
		0	10	25	50	75	100	150	200	300	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
[67]	IX 1946	13	—	15	12	—	22	17	53	36	51	44	28	55	89	136	—
[60]	XII 1950	12	—	14	11	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
[109]	X 1954	18,7	—	19,1	19,2	18,8	22,0	32,0	39,1	35,8	46,7	58,5	59,9	52,4	57,4	56,2	61,0
[109]	VII 1955	17,2	18,7	17,5	15,3	30,2	35,7	38,6	51,1	47,3	51,6	51,1	51,0	41,9	42,0	44,9	89,2

6.3. Азот

Введение

Помимо растворенного состояния, азот присутствует в морской воде в форме неорганических (нитриты, нитраты, аммоний) и органических (аминокислоты, амины, мочевина и др.) соединений. Схематично процесс преобразования соединений азота протекает следующим образом: органическое вещество (альбуминоидный азот) ⇄ аммиачный азот ⇄ азот нитритный ⇄ азот нитратный.

Процесс образования нитритного азота в результате окисления аммонийного иона бактериями-нитрификаторами до нитритов и восстановление нитратов бактериями-денитрификаторами до аммония объясняет отсутствие нитритов в сероводородной зоне моря.

По данным ряда авторов [70, 132, 150], нижняя граница обнаружения нитритов залегает на глубине 300 м. В то же время, согласно А. В. Гождественскому [128], в прибосфорском районе в редких случаях «следовые» концентрации нитритов (до 0,3 мкг/л) наблюдаются до глубины 600 м. Присутствие нитритов в сероводородной зоне юго-западного района автор связывает с возможным влиянием воды средиземноморского происхождения.

Нитраты наряду с фосфатным фосфором являются наиболее важным биогенным веществом. Они необходимы для питания фитопланктона, который усваивает их в процессе фотосинтеза. При полной ассимиляции нитратов и других форм неорганического азота дальнейший рост растений приостанавливается. Кроме выноса нитратов речным стоком и их поступлением с атмосферными выпадениями, основным источником пополнения этой формы азота в море является процесс нитрификации. Процесс протекает в две фазы. Первая фаза реакции окисления протекает под воздействием бактерий-нитрификаторов *Bacteriaceae Nitrosomonas*, вторая — других бактерий: *Bacteriaceae Nitrobacter*. Очевидно, что процесс нитрификации может протекать исключительно в присутствии кислорода. Этим объясняется отсутствие нитратного азота в анаэробной зоне Черного моря, где он восстанавливается сероводородом до аммиака.

Аммонийный азот содержится в морской воде в виде катиона NH_4^+ и выступает в качестве конечного звена трансформации азота при сложном и еще недостаточно изученном процессе минерализации органического вещества. Ионы аммония усваиваются растениями при фотосинтезе или окислении в нитриты и нитраты. Помимо образования аммонийного азота в процессе круговорота органического вещества, основными его источниками в море являются также речной сток и атмосферные осадки.

В морских водах органический азот входит в состав аминокислот и белков тканей организмов, а также продуктов их распада. Последние возникают при отмирании организмов и в процессе распада продуктов их жизнедеятельности. Органический азот находится в воде в самых различных состояниях: взвесей (остатков организмов), растворенной и коллоидной формах. Процесс перехода сложных азотсодержащих органических соединений в более простые минеральные формы совершается при биохимическом распаде с различной скоростью. Наиболее интенсивно регенерация протекает для веществ, выделяемых животными (полупереваренная пища, фекалии), гораздо продолжительней — у сложных белковых соединений.

Пространственно-временная изменчивость содержания нитритного азота в водах моря в период до зарегулирования речного стока достаточно подробно изучена в работах, например, П. Т. Данильченко и Н. И. Чигирина [59, 177], С. В. Бруевича [28], М. А. Добржанской [70], Б. А. Скопинцева [150]. На основании исследований этих авторов сложились следующие представления о режиме нитритов в Черном море.

В поверхностном 200-метровом слое концентрация нитритов изменяется в узком диапазоне (0,4—2,5 мкг/л). С последующим заглублением содержание нитритов увеличивается и на глубине 150—300 м достигает своего максимума. Максимум нитритов в этом слое обусловлен интенсификацией процесса окисления диффундирующего из глубинных слоев аммиака. Далее с глубиной нитриты не обнаруживаются, поскольку в восстановительной среде образование этой формы азота невозможно. В период проведения синхронных съемок моря в 1951—1956 гг. [71] на большей части акватории четко выраженный максимум нитритов не обнаруживался, более того, в слое 150—200 м и глубже они вообще отсутствовали. В теплый период года, согласно данным М. А. Добржанской [70], в большинстве случаев нитриты отсутствуют в поверхностном 50—75-метровом слое, а иногда и по всей исследуемой водной толще. Установлено, что горизонтальное распределение нитритного азота характеризуется увеличением их концентраций по мере приближения к прибрежным районам и особенно устьевым взморьям. В этой связи определенный интерес представляет информация о поступлении нитритов в Черное море с речным стоком в период до его зарегулирования (табл. 69). Как видно из

Таблица 69

Поступление нитритов в Черное море с речным стоком до его зарегулирования [4]

Река	Период наблюдений	Водный сток, км³	Сток нитритов, т
Дунай	1948	211,17	—
	1949	142,91	1860
	1950	145,73	2040
	Среднее за период	166,60	1950
Днестр	1952	7,26	70
	1953	8,29	260
	1954	6,58	430
	Среднее за период	7,38	250
Днепр	Среднее за 1951—1954 гг.	41,87	500
Южный Буг	1952	2,10	60
	1953	2,73	50
	1954	1,39	150
	1955	2,39	50
	Среднее за период	2,15	80
Всего (среднее за период наблюдений)		218,00	2780

табл. 69, со стоком четырех наиболее крупных рек в море в среднем ежегодно поступает 2,78 тыс. т нитритов.

На основании систематических наблюдений в Севастопольской бухте установлено, что сезонная динамика содержания нитритов показывает максимум в холодный (декабрь—январь) и минимум — в теплый периоды года [70].

Исследованию основных закономерностей пространственно-временной изменчивости нитратного азота в период до зарегулирования речного стока посвящены работы, например, П. Т. Данильченко и Н. И. Чигирина [59, 177], С. В. Бруевича [28], М. А. Добржанской [64, 66, 67] и др. В результате сложились следующие представления о режиме нитратов в водах моря.

В поверхностном 100-метровом слое концентрация нитратного азота изменялась в широком диапазоне — от нуля до 150 мкг/л. Его минимальное содержание наблюдается в зоне фотосинтеза, что связано с интенсивным потреблением нитратов фитопланктоном. Вертикальное распределение нитратного азота ограничено аэробным слоем, и на глубине 300 м он, как правило, отсутствует. Сезонная динамика содержания нитратов показывает максимум зимой и минимум летом. В теплый период года нередки случаи, когда количество нитратов от поверхности до глубины 75 м падает до нуля. В то же время в некоторые годы сезонный ход содержания нитратного азота нарушается. На примере наблюдений, выполненных в Севастопольской бухте, изучен суточный ход содержания нитратов. Исследования показали, что суточные отношения выражены весьма неясно. В отдельных случаях в в период интенсивного развития фитопланктона в дневное время наблюдалось падение концентрации нитратов до нуля, в темное время суток их количество иногда возрастало до 4—15 мкг/л.

По содержанию и распределению аммонийного азота Черное море существенно отличается от других районов Мирового океана. В поверхностном слое, в том числе в зоне активного фотосинтеза, концентрация аммония такая же, как и в морях нормального типа. По данным Н. И. Чигирина и П. Т. Данильченко [177], в открытой части моря на поверхности содержание аммонийного азота составляет 40—80 мкг/л. Последующие наблюдения Севастопольской биологической станции дали примерно такие же результаты. В отдельных случаях аммонийных азот не обнаруживался. Имеющие место незначительные отклонения содержания аммонийного азота по вертикали в зоне фотосинтеза обусловлены причинами, общими с другими морями. С дальнейшим заглублением, особенно с появлением и последующим увеличением содержания сероводорода, концентрация аммонийного азота резко возрастает. Наибольшие ее положительные градиенты (3—4 мкг/л на 1 м) характерны для слоя 150—200 м. Высокие градиенты аммонийного азота сохраняются до 500—1000 м. В слое 1500—2000 м градиент наименьший и составляет 0,2 мкг/л. По наблюдениям 1924—1927 гг. в придонном слое глубоководного района моря концентрация аммонийного азота достигает 1500 мкг/л, в то время как в морях нормального типа она составляет 70—130 мкг/л [70, 177].

Аккумуляция аммония в анаэробной зоне моря обусловлена двумя процессами:

— восстановлением сероводородом в глубинной части моря нитратов и нитритов до азота и аммиака;

— распадом органического вещества, поступившего из поверхностных слоев, при минерализации которого образуются ионы аммония.

Сведений о содержании органического азота в водах моря явно недостаточно.

6.3.1. Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы

Материалы наблюдений за период 1951—1985 гг. (свыше 16 000 анализов на нитриты, 830 анализов на нитраты, 587 анализов на аммонийный азот, 66 анализов на органический азот) представлены в табл. 49.

На протяжении нескольких десятилетий содержание нитритов определяли методом Грисса — Илосвая, в который вносились изменения в конечную стадию методики по мере развития химической океанографии. Метод основан на диазотировании содержащихся в морской воде нитритов сульфаниловой кислотой при последующем взаимодействии образовавшегося диазосоединения с α-нафтиламином, вызывающим появление красной азоокраски [70, 125].

В 50-х гг. определение нитритов на Черном море проводили по методу Грисса — Илосвая с использованием цилиндров Генера [70, 125]. Минимальная концентрация нитритов, определяемая таким образом, 0,1 мкг/л. С 1973 г. содержание нитритов находили фотометрированием окрашенных растворов с помощью фотоэлектроколориметров. Минимально определяемая этим методом концентрация нитритов 0,5 мкг/л со средней квадратической погрешностью 15 % [26]. Результаты определений нитритного азота по методу Грисса — Илосвая в различных модификациях хорошо согласуются.

До 1963 г. нитратный азот определялся по методу, основанному на их окислении дифениламином в кислой среде. В результате реакции образуется хиноидное производное дифенилбензидина сине-фиолетового цвета. Содержание нитратов определялось путем сравнения окраски морской воды с окраской подходящего стандарта. Колориметрирование производилось визуально или в электрофотоколориметре. Метод позволял определять нитраты в количестве от 5,0 до 200—300 мкг/л.

В дальнейшем определение нитратов проводили по методу восстановления нитратов до нитритов на амальгаме кадмия с последующим определением нитритов по методу Грисса — Илосвая. Для восстановления использовали редукторы Джонса с двумя кранами. Степень восстановления нитратов проверяли путем пропускания через амальгамированный кадмий стандартных растворов азотнокислого калия. Чувствительность метода составляла 0,07 мкг/л нитратного азота.

В настоящее время [126] определение нитратов проводят по модифицированному в Институте океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР методу Вуда, Армстронга и Ричардса. В качестве восстановителя используется омедненный кадмий, а комплексующего агента — щелочной раствор Трилона Б. При pH = 9,6 в морской воде достигается наибольшая полнота восстановления нитратов до нитритов (98 ± 2 %). Чувствительность метода

позволяет определять около 2 мкг/л нитратного азота. Омедненный кадмий при работе со щелочным раствором трилона Б не теряет своих восстановительных свойств в течение 1,5 лет. В связи с тем, что для отбора проб морской воды применялись батометры БМ-48, результаты определения нитритов несколько завышены, а результаты определения нитратов в связи с этим несколько занижены. Длительность отбора проб из батометра составляла менее 15 мин, поэтому мы нашли возможным использовать экспедиционные материалы для обобщения.

Все данные по содержанию аммония, полученные в экспедиционных исследованиях АзЧерНИРО, определены по методу Ваттенберга, основанному на применении реактива Несслера, образующего с аммонием коллоидно-дисперсные частицы, окрашивающие раствор в желтый цвет. Содержание аммиака определялось прямым сравнением со стандартными растворами. В 1966 г. предложен фенолят-гипобромитный метод определения аммонийного и органического азота. Метод основан на образовании индофенолового красителя, окрашивающего раствор в голубой цвет при добавлении к пробе, содержащей аммоний-ионы гипобромита натрия и фенолята натрия. Чувствительность метода составляет 10 мкг/л, точность определения на фотоэлектроколориметре составляет около 5 %.

С 1978 г. определение аммиака проводится по методу, основанному на реакции аммиака в щелочном растворе с избытком гипохлорита натрия с образованием индофенолового голубого в присутствии фенола и иона нитропруссида. Содержание аммиака определяют фотометрированием окрашенного комплекса. Наименьшая концентрация, которую можно надежно определить этим методом, составляет 1 мкг/л [126].

Данные по содержанию органического азота в море получены в СО ГОИНа по методике [125, 126]. Сжигание пробы органического азота проводили серной кислотой в колбах Кьельдаля. После сжигания в пробу вносили фенолят натрия и гипобромит натрия. Находили суммарное содержание аммонийного азота фотометрированием индофенолового красителя. Вычитая содержание аммонийного азота, полученное ранее, находили содержание органического азота.

С 1981 г. определение органического азота в СО ГОИНа проводится по методике [126]. Метод основан на окислении органических соединений азота и солей аммония до нитратов и нитритов при кипячении с персульфатом калия в щелочной среде. Пропусканием пробы морской воды через колонку с омедненным кадмием восстанавливают нитраты до нитритов и находят суммарное содержание нитритов с помощью реактива Грисса — Илосвая. Заранее зная содержание в пробе нитритов и нитратов, по разнице находят содержание органического азота. Предел обнаружения общего азота этим методом составляет около 1 мкг/л.

6.3.2. Нитритный азот

Динамика концентраций нитритного азота. Изученность нитритного азота в водах моря иллюстрируется на рис. 71. Здесь же дано среднее годовое распределение нитритного азота.

Наибольшее содержание нитритов наблюдается в прибрежных участках, наименьшее — в центральных районах моря. К самым продуктивным районам моря по концентрации нитритов, как, впрочем, и другим биогенным веществам, можно отнести северо-западный и юго-восточный районы. Здесь средняя годовая концентрация нитритного азота превышает 3 мкг/л, а в устьевой части Дуная и узкой прибрежной полосе, прилегающей к г. Батуми, их содержание составляет 6,7 и 7,1 мкг/л соответственно. Максимумы содержания нитритов в этих районах безусловно связаны с

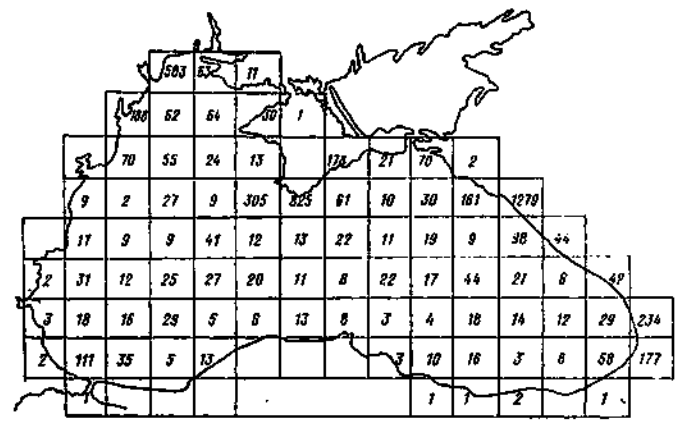

Рис. 71. Распределение по квадратам станций, на которых определялся нитритный азот, изученность и среднее годовое его распределение в поверхностном слое моря, мкг/л.

влиянием речных и сточных вод. Относительно высокое содержание нитритов в прикерченском участке моря (более 3 мкг/л) обусловлено поступлением из пролива азовоморских вод. Абсолютный максимум нитритного азота в поверхностном слое, составляющий 71 мкг/л, зарегистрирован на устьевом взморье р. Дунай. В подавляющем большинстве районов моря во все сезоны года среди общего количества наблюдений имел место хотя бы один случай, когда нитритный азот не был обнаружен.

Особый интерес представляет распределение нитритного азота в юго-западном районе моря [53]. Согласно данным А. В. Рождественского [132], колебания в концентрации нитритов в этой акватории в течение года составляют 0—15 мкг/л. Как показали наши наблюдения (март 1981 г.), в период прохождения паводка на р. Дунае и поступления смешанных речных и морских вод в прибосфорский район Черного моря концентрация нитритного азота в поверхностном слое воды может увеличиваться до 30 мкг/л. Во время наибольшего поступления смешанной речной и морской водной массы в районе многосуточных наблюдений в прибосфорском районе (серия 10, 11) при минимальных значениях температуры (6,6 °С) и солености (15,00 ‰) наблюдалось максимальное содержание нитритов (рис. 72).

Как видно из табл. 70, после прохождения через район исследований трансформированной водной массы, образовавшейся при смешении речной воды с морской, поверхностный 75-метровый слой предпроливной зоны существенно обогатился нитритами.

Вертикальное распределение нитритов характеризуется следующими особенностями. По срав-

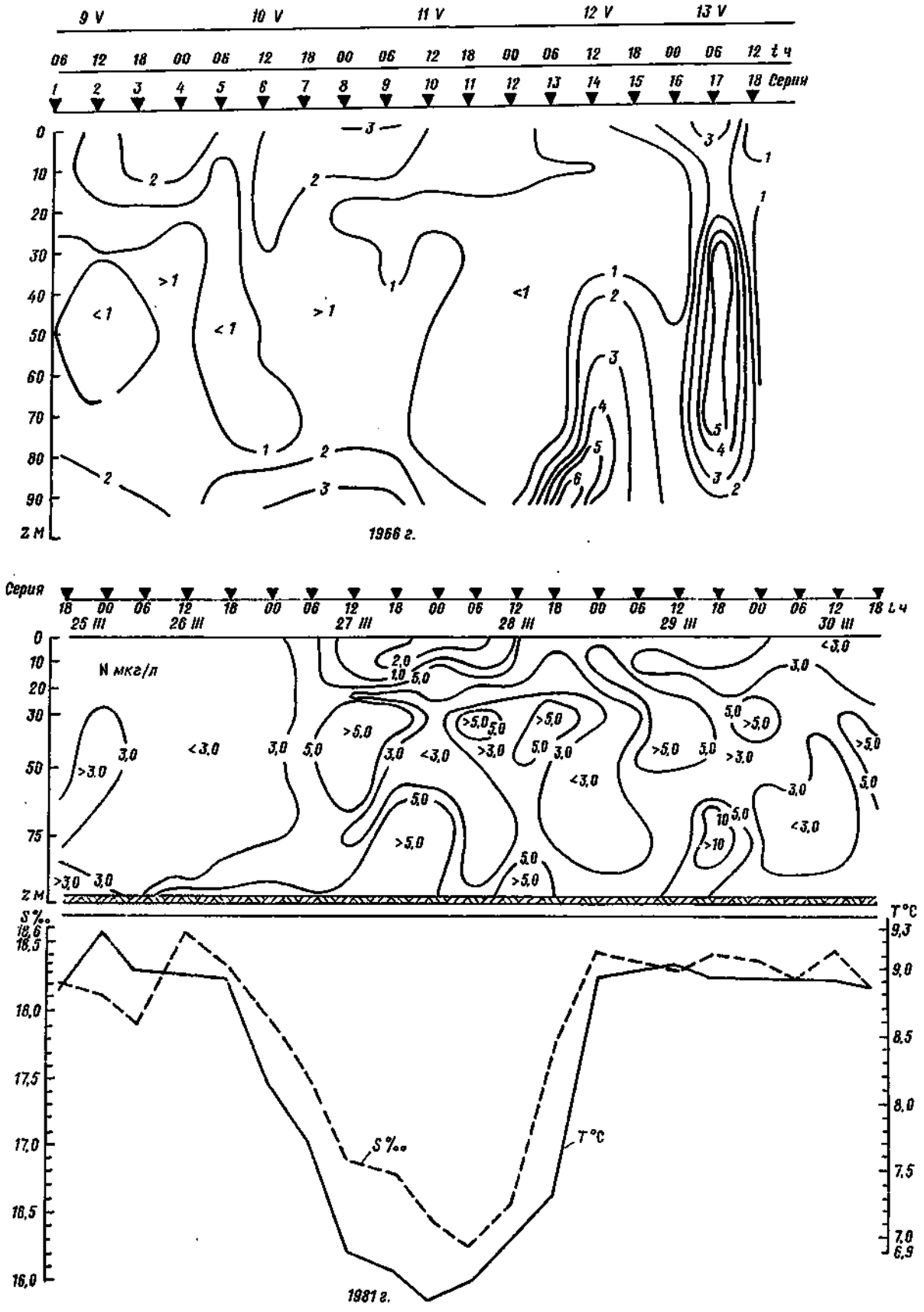

Рис. 72. Временной ход содержания нитритов, температуры и солености на многосуточных станциях в прибосфорском районе в 1981 г. и нитритов в 1966 г.

Таблица 70

Средняя концентрация нитритного азота на многосуточной станции в воде прибосфорского района Черного моря 25—30 марта 1981 г., мкг/л

Глубина, м	До поступления дунайской воды (средняя из 6 серий)	В период поступления дунайской воды (средняя из 5 серий)	После прохождения дунайской воды (средняя из 10 серий)
0	2	19	3
10	2	13	3
20	2	2	3
30	2	6	5
50	3	4	4
75	2	5	3
98 (придонный)	6	6	5

нению с другими морями в Черном море максимум концентрации нитритного азота залегает глубже. Наличие наибольших концентраций нитритов у верхней границы восстановительного слоя позволяет предположить, что максимум нитритов

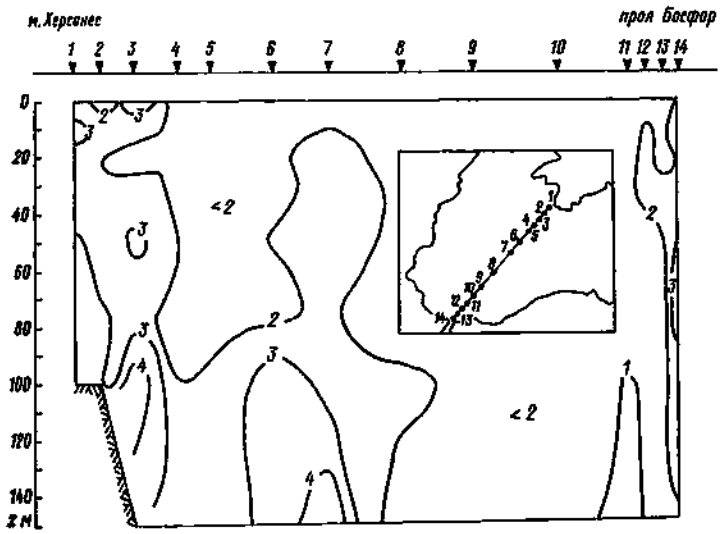

Рис. 73. Среднее годовое распределение нитритного азота на разрезе м. Херсонес — прол. Босфор, мкг/л.

образуется главным образом за счет процесса денитрификации. В юго-западном районе максимум нитритного азота располагается на глубине 100—200 м. Как уже отмечалось выше, вертикальное распределение нитритов в водах Черного моря ограничено аэробной зоной. В то же время поступление из прол. Босфор средиземноморской воды и ее последующее заглубление способствуют их проникновению в глубинные слои. Этим можно объяснить наличие нитритного азота в юго-западной части моря на глубине 600 м [132]. На рис. 73 представлено типичное распределение нитритов по вертикали на примере разреза м. Херсонес — прол. Босфор.

Анализируя данные наблюдений в открытой акватории моря в периоды до зарегулирования речного стока и после зарегулирования, приходим к выводу, что режим нитритов, в отличие от кремния и фосфатов, характеризуется устойчивостью, а их содержание стабилизировалось на уровне 0—<5 мкг/л. Сведения о средних годовых и максимальных концентрациях нитритного азота в поверхностном 100-метровом слое открытой акватории моря в 1981—1985 гг. представлены в табл. 71.

Сезонная динамика содержания нитритов претерпевает существенные изменения как в поверхностном слое, так и по глубине. Как следует из рис. 74, в поверхностном слое вод существует четко выраженный сезонный ход в содержании нитритного азота. Заметные увеличения в количестве нитритов начинаются осенью и достигают

Таблица 71

Концентрация нитритного азота в открытой части Черного моря в 1981—1985 гг.

Год	Горизонт, м	Концентрация, мкг/л	
		средняя	максимальная
1981	0	<5	19
	10	6	40
	50	<5	17
	100	<5	10
1982	0	<5	7
	50	<5	9
	100	8	10
1983	0	<5	33
	10	<5	13
	50	<5	16
	100	<5	6
1984	0	<5	24
	10	<5	21
	50	5	14
	100	<5	17
1985	0	<5	19
	50	<5	8
	100	<5	12

своего максимума в зимний сезон года. В этот период средняя многолетняя концентрация нитритов в северо-западном, юго-восточном и прикерченском районах превышает 7 мкг/л, а в устьевой части р. Дуная — 9 мкг/л. В весенний и летний сезоны года концентрация нитритов в открытой части моря обычно снижается до нуля. Незначительное количество нитритного азота в теплый период года наблюдается и в прибрежных районах. Исключение составляют лишь небольшие по площади акватории моря, прилегающие к устью р. Дуная и городам Батуми и Поти, где концентрация нитритов составляет 3—7 мкгN/л.

Максимумы содержания нитритов по сезонам изменяются в более широком диапазоне. В поверхностном слое воды они составляют весной — 41, летом — 24, осенью — 71, зимой — 41 мкг/л; на глубине 10 м весной — 35, летом — 30, осенью — 62, зимой — 40 мкг/л; на глубине 20 м весной — 84, летом — 30, осенью и зимой — 25 мкг/л. В слое 50—100 м диапазон максимальных концентраций нитритного азота внутри года сужается, что, впрочем, естественно и характерно также для других биогенных веществ. Максимумы нитритов в этом слое достигают в весенний сезон года 32, в летний — 28, в осенний — 17 и в зимний — 26 мкг/л.

Что касается сезонных минимумов содержания нитритного азота, то как в теплый, так и в холодный периоды года имели место случаи, когда нитриты отсутствовали по всей водной толще.

Суточные отклонения в содержании нитритов иллюстрируются также на примере наблюдений,

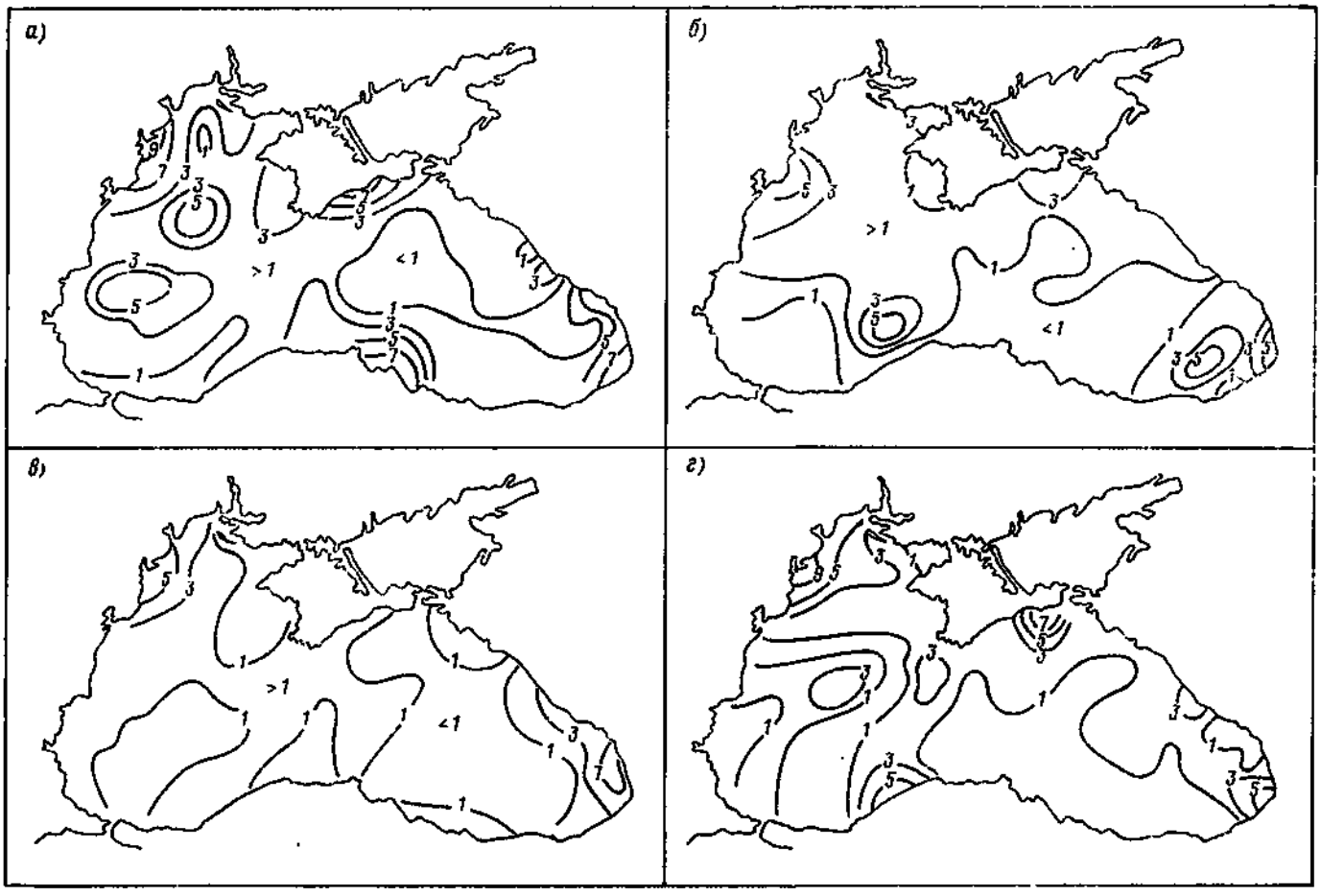

Рис. 74. Распределение нитритного азота в поверхностном слое вод моря, мкг/л.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

выполненных 9—13 мая 1966 г. на многочасовой станции, расположенной в прибосфорском районе моря (см. рис. 72). В результате этих исследований установлено, что в динамически активных районах Черного моря (каким является прибосфорский район) суточный ход содержания нитритного азота в первую очередь определяется сменой водных масс. В северо-западном районе моря, а также у Крымского и Кавказского побережий выявить какие-либо тенденции в суточных отклонениях содержания нитритов также не удалось. В то же время, по данным М. А. Добржанской [70], экспериментальные исследования по скорости регенерации биогенных веществ показали заметный прирост в содержании нитритного азота, достигающий в ряде случаев 5—10 мкг/л после 5-суточной экспозиции в темных склянках.

Элементы баланса. Уравнение внешнего баланса нитритного азота аналогично таковому для кремния и фосфатов. Современное состояние гидрохимической изученности Черного моря не позволяет количественно оценить все составляющие баланса нитритов. Однако наиболее важные приходные и расходные статьи баланса нитритного азота рассчитать все же удалось. Что касается нитратного, аммонийного и органического азота, то ввиду полного отсутствия информации по поступлению и расходу этих форм азота не представляется возможным даже ориентировочно оценить главные составляющие их баланса в Черное море. Поэтому из всех форм нахождения азота в морской воде рассматривается лишь баланс нитритов, расчет основных составляющих которого приведен ниже.

Поступление с речным стоком. По данным А. М. Алмазова, в Черное море до зарегулирования речного стока с водами Дуная, Днепра, Днестра и Южного Буга ежегодно в среднем поступало 2,78 тыс. т азота нитритов [4]. При этом между водным стоком и стоком нитритов наблюдалась прямая зависимость. В современный период приток нитритного азота с этой составляющей баланса увеличился почти в 4 раза и в 1981—1985 гг. составлял 10,70 тыс. т. (табл. 72). Одновременно с этим прогрессирующее загрязнение больших и малых рек привело к более сложной зависимости между их водным стоком и стоком нитритов.

Поступление с атмосферными выпадениями. Концентрации нитритов в дождевых водах, по данным единичных наблюдений, выполненных в центральных районах моря, изменяются от 0 до 5 мкг/л при среднем значении 0,7 мкг/л. В этом случае в море с атмосферными осадками при их объеме 218 км³ ежегодно поступает 153 т нитритного азота.

Обмен через прол. Босфор. Исследования СО ГОИНа [52] позволили количественно оценить обмен нитритным азотом через прол. Босфор.

В поверхностном 50-метровом слое юго-западного района Черного моря, водами которого формируется верхнее течение в Босфоре, средняя годовая концентрация нитритного азота составляет 2,5 мкг/л. Расход нитритов через пролив состав-

Таблица 72

Поступление нитритов в Черное море с речным стоком за 1981—1985 гг., т/год

Река	1981	1982	1983	1984	1985	Среднее поступление, т
Дунай	—	7 130	2 869	14 939	13 968	9 727
Днестр	—	287	91	274	329	245
Днепр	837	348	331	172	689	475
Южный Буг	90	136	27	92	134	96
Риони	—	86	240	—	—	—
Чорох	—	73	—	—	—	—
Ингури	—	—	—	—	—	—
Кодори	—	—	114	—	—	—
Мзымта	—	—	(14)	—	—	—
Бзыбь	—	—	(28)	—	—	—
Супса	—	—	11	—	—	—
Малые реки Кавказа	—	—	—	—	—	—
Реки Турции	—	—	(204)	—	—	—
Реки Румынии и Болгарии	—	54	(19)	(69)	(72)	54

Примечание. В скобках представлен вынос фосфатов, расчет которого проведен методом аналогии со смежными реками.

ляет 1000 т/год. В проливной зоне (Босфор, Мраморное море и Дарданеллы) происходит обогащение черноморской воды нитритами. Здесь их средняя концентрация (по данным 36 определений) увеличивается до 3 мкг/л. Процесс обогащения протекает в основном в зимне-весенний сезон года. В этот же период наблюдается и повышенное содержание нитритов в воде Черного моря. Летом и осенью нитритный азот в воде верхнего босфорского течения обычно отсутствует или его концентрация незначительна (до 1,2 мкг/л).

В целом в Эгейское море с черноморскими водами ежегодно поступает 1200 т нитритного азота.

На основании анализа 42 проб средняя годовая концентрация нитритного азота в воде средиземноморского потока в прибосфорском районе Черного моря составляет 4,6 мкг/л. Полученное содержание значительно превышает концентрацию нитритного азота в Эгейском море (2,8 мкг/л). Очевидно, что при следовании через зону проливов средиземноморская вода обогащается нитритами. По-видимому, процесс обогащения наиболее интенсивно протекает в Босфоре, который является самым загрязненным участком на пути движения средиземноморской воды из Эгейского в Черное море. В результате расчетов установлено, что из прол. Босфор в Черное море ежегодно поступает 1000 т нитритов, т. е. приход нитритного азота с водой нижнего течения соответствует его расходу с водой верхнего течения. Не оказывая заметных изменений в балансе нитритов в Черном море, массообмен через Босфор в то же время способствует их перераспределению по вертикали, а именно: проникновению нитритного азота в глубинные слои, в том числе в анаэробную зону.

Обмен через Керченский пролив. Концентрация нитритов в черноморских водах, поступающих в Азовское море, с 1981 по 1985 г. изменялась от 1 до 5 мкг/л при среднем значении 3 мкг/л.

В азовоморских водах средняя концентрация нитритного азота — 5 мкг/л при экстремальных значениях 3—7 мкг/л. Используя данные по расходу через Керченский пролив, рассчитали, что в Черное море из Азовского в среднем ежегодно поступает 200 т азота нитритов; из Черного моря в Азовское выносится в среднем 100 т нитритного азота в год. Таким образом, в результате массообмена через Керченский пролив в Черном море ежегодно аккумулируется 100 т нитритного азота (табл. 73).

Таблица 73

Обмен нитритами через Керченский пролив

Год	Приток из Азовского моря			Сток в Азовское море		
	$Q_{вод}$ км³	C_N мкг/л	Q_N т	$Q_{вод}$ км³	C_N мкг/л	Q_N т
1981	59,2	~ 4	~ 240	22,4	~ 3	~ 70
1982	48,4	~ 3	~ 150	33,2	~ 1	~ 33
1983	43,1	~ 4	~ 170	34,2	~ 2	~ 70
1984	38,9	5	190	35,3	5	180
1985	35,3	7	250	33,8	~ 4	~ 140
Среднее	45,0	~ 5	~ 200	31,8	~ 3	~ 100

Имеющиеся в нашем распоряжении сведения позволили рассчитать большинство приходных и некоторые расходные составляющие баланса нитритного азота (табл. 74). Большая невязка между правой и левой частями уравнения баланса является следствием того, что нитриты представляют собой промежуточную нестабильную форму нахождения азота в морской воде. В одних условиях часть нитритного азота окисляется до нитратов, а в других восстанавливается до аммонийного азота. Поэтому основной расходной составляющей баланса нитритов в Черном море является их переход

Таблица 74

Некоторые статьи баланса нитритного азота в Черное море

Статья баланса	Приход, тыс. т	Статья баланса	Расход, тыс. т
Поступление		Вынос	
с речным стоком	10,70	в прол. Босфор	1,00
с атмосферными выпадениями	0,15	в Керченский пролив	0,10
из прол. Босфор	1,00		
из Керченского пролива	0,20		
Всего из учтенных приходных статей	12,05	Всего из учтенных расходных статей	1,10

в другие формы азота. Среди приходных статей баланса ведущая роль принадлежит поступлению нитритного азота с речным стоком (84 %).

В целом вопросы, касающиеся баланса нитритов в Черном море, требуют дальнейшей разработки. В первую очередь необходимо оценить поступление нитритов с материалами абразии берегов и дна, в результате антропогенной нагрузки; расходная часть уравнения баланса требует расчета захоронения нитритов в донные отложения и их перехода в другие формы азота.

6.3.3. Нитратный азот

Имеющаяся информация свидетельствует, что режим нитратного азота после зарегулирования речного стока практически не изменился. Характерной особенностью распределения нитратов как

по поверхности, так и по вертикали остается наличие существенных пространственных и сезонных различий в их содержании.

В поверхностном слое внутригодовой размах средних концентраций нитратов составляет 0—40 мкг/л при абсолютном максимуме 290 мкг/л. Повышенное содержание нитратного азота (свыше 10 мкг/л) наблюдается в северо-западном и прибосфорском районах моря. На остальной части акватории его средняя годовая концентрация не превышает 10 мкг/л, что меньше нижнего предела используемого в современной практике метода определения нитратов. Средний годовой максимум концентрации нитратов (31 мкг/л) расположен вблизи устья р. Дунай и обусловлен их выносом с речными водами. Известно, что среднее содержание нитратов в дунайской воде составляет 1043 мкг/л, причем в последние годы намечалась четкая тенденция увеличения их концентрации [127, 130], связанная, по-видимому, с эвтрофикацией рек. Именно поэтому содержание нитратов в западной половине значительно больше, чем в восточной.

В слое 10—50 м характер пространственного распределения нитратного азота остается прежним, в то же время диапазон его средних годовых концентраций расширяется (0—110 мкг/л). В летний сезон года на глубине 20 м в северо-западном районе зарегистрирован абсолютный максимум концентрации нитратного азота, составляющий 770 мкг/л. В целом для данного слоя по сравнению с поверхностным характерно некоторое увеличение содержания нитратов.

Начиная с глубины 50 м, средняя концентрация нитратного азота возрастает и достигает своего максимума (37 мкг/л) на глубине 100 м [159]. При этом следует отметить, что среднее содержание нитратов и значения средних квадратических отклонений в данном слое по акватории моря изменяются в более узком диапазоне, чем в вышележащем. Это безусловно связано с уменьшением и полным отсутствием влияния речного стока.

С дальнейшим заглублением концентрация нитратов уменьшается и составляет: на глубине 150 м — 8, на 200 м — 7, на 300 м — 0,4 мкг/л [159]. Ниже 300 м нитраты обычно не обнаруживаются. В прибосфорском районе в период отдельных экспедиционных исследований нитраты в крайне малых количествах наблюдались на глубине 500 м, т. е. в анаэробной зоне [132]. Это состояние является следствием поступления средиземноморской воды с нижним босфорским течением и последующим ее заглублением.

Наблюдениями установлено наличие многолетних отклонений в содержании нитратов. По всей акватории моря многолетние отклонения проявляются в различной средней концентрации и имеют немонотонный характер. Выявить какую-либо тенденцию в многолетней изменчивости нитратного азота представляется возможным лишь на примере отдельных районов, где проводятся систематические наблюдения за их содержанием, например, в Севастопольской бухте.

Поскольку Севастопольская бухта является в значительной степени изолированным водоемом, негарантированным от случайных сбросов всякого рода загрязнений, содержащих различные азотные формы, представляет интерес получить прогноз качественного состояния вод по этим показателям хотя бы на ближайшую перспективу. С этой целью была предпринята попытка выявить тенденцию в 10-летнем режиме нитратов и оценить интенсивность происходящих с ними процессов. Данные натурных наблюдений были подвергнуты специальному испытанию на тренд по методике, описанной в работе [62]. Каждый член анализируемого ряда непрерывных наблюдений сравнивался со всеми последующими членами ряда. При этом подсчитывалось число последующих членов n, чьи значения превышали значения сравниваемого члена ряда.

В условиях отсутствия тренда сумма n характеризуется величиной n_0, которая определяется по формуле

$$n_0 = N(N-1)/4.$$

Для характеристики значимости тренда вычислялась статистика P по формуле

$$p = \left(\sum_1^n n_i - n_0\right) \Big/ n_0.$$

Для практических расчетов статистика P приводилась по формуле

$$Y = 3\sqrt{n_0 P/(N+2{,}5)}$$

к нормированному виду.

По таблице для нормальной функции распределения по значению Y определялась $\Phi(Y)$ — доверительная вероятность наличия тренда в исследуемом ряду ($\Phi(Y) = 0{,}995$).

Далее оценивалась интенсивность изменения содержания нитратов в Севастопольской бухте по уравнению регрессии.

$$C_t = \bar{C} + B(t_i - \bar{t}_0).$$

Коэффициент регрессии B определялся по формуле

$$B = \sum_{i=1}^{N} (t_i - \bar{t})(C_i - \bar{C}) \Big/ \sum_{i}^{N} (t_i - \bar{t})^2.$$

Ошибка коэффициента регрессии рассчитывалась по формуле

$$\delta_B = \frac{1}{\sqrt{N-2}} \sqrt{\frac{\sum_{i}^{N} (C_i - \bar{C})^2}{\sum_{i}^{N} (t_i - \bar{t})^2} - b^2}.$$

Уравнение линии регрессии: $C = 140 \pm 9(t - 1974)$. Это означает, что за последние 10 лет при средней многолетней концентрации нитратов 140 мкг/л их содержание в водах Севастопольской бухты уменьшалось в среднем на 9 мкг/(л·год). Если интенсивность процесса останется без изменений, то к 1990 г. следует ожидать сравнимое со средним многолетним содержание нитратного азота, т. е. существенных изменений в эволюционно сложившихся биоценозах бухты не произойдет.

Внутригодовая изменчивость в содержании нитратного азота по сравнению с многолетней прослеживается более четко и наглядно иллюстрируется схемами его распределения в различные сезоны года (рис. 75). Из рис. 75 следует, что в целом по акватории в поверхностном слое сезонная динамика содержания нитратов показывает максимум в зимне-весенний и минимум в летне-осенний перио-

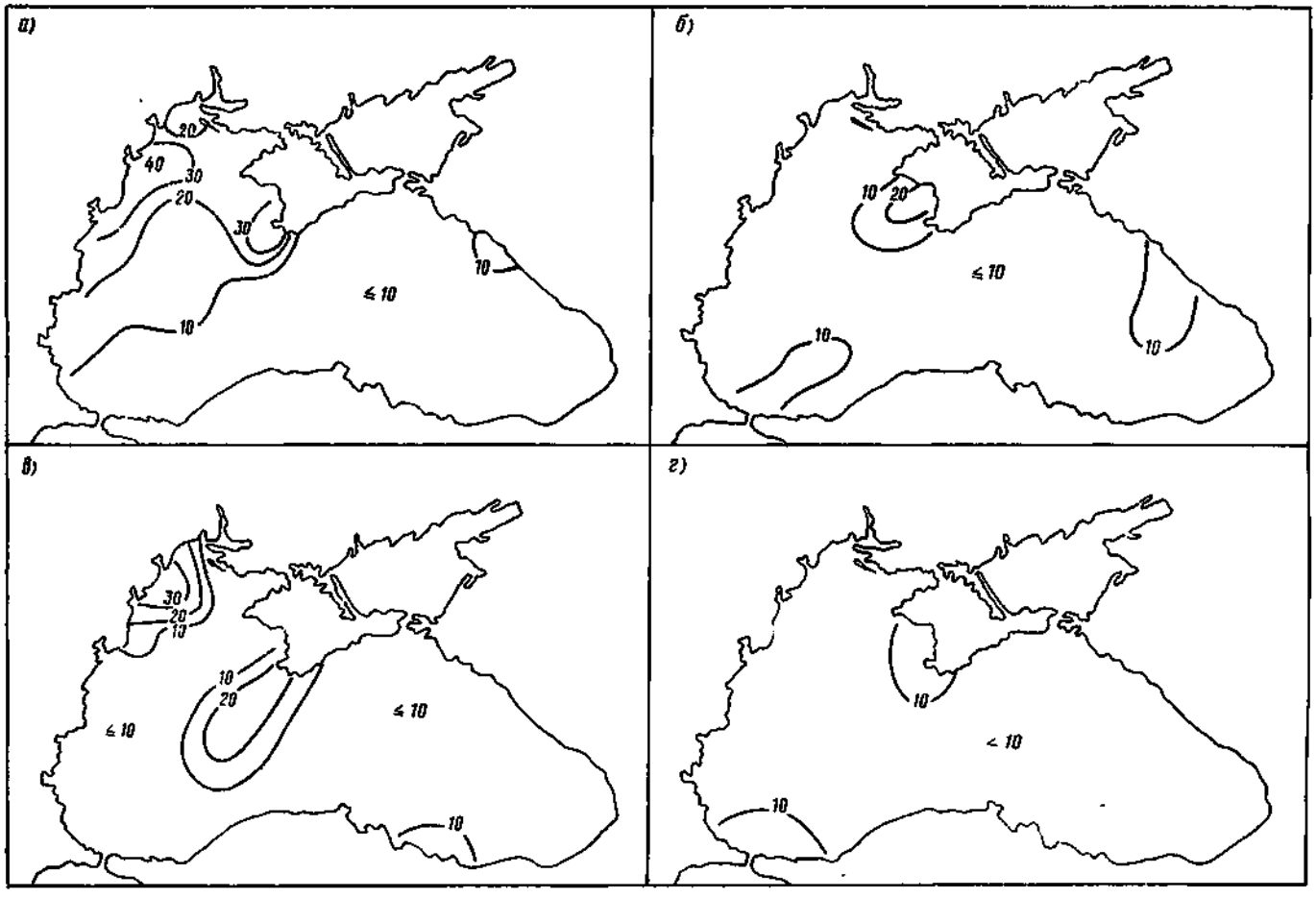

Рис. 75. Распределение нитратного азота в поверхностном слое вод моря, мкг/л.
а — зима; *б* — лето; *в* — весна; *г* — осень.

ды года. В то же время в различных районах моря экстремумы в содержании нитратов наблюдаются в разные сезоны года. В северо-западной части моря максимальное содержание нитратного азота приходится на начало весны. Это благоприятствует интенсивному развитию фитопланктона летом при прогреве вод. В этом районе в потреблении нитратов, помимо фитопланктона, также участвуют макрофиты (филлофора) [132]. Поэтому в теплый период года даже в самом продуктивном районе моря, каким является северо-западный район, нередки случаи, когда содержание нитратов падает практически до нуля. Следует отметить, что в дунайском стоке такое явление не отмечается никогда [132]. В прибосфорском районе максимум нитратов наблюдается зимой, а минимум — летом. Некоторое уменьшение содержания нитратного азота в глубоководной части юго-западного района зимой по сравнению с его концентрацией весной А. В. Рождественский [132] связывает с сильными зимними «цветениями», имеющими место в последние годы. В прикерченском районе повышенное содержание нитратов характерно для зимы, а в остальные сезоны года их количество обычно падает до нуля. Что касается юго-восточной части моря, то здесь сезонная динамика нитратов близка к таковой в прибосфорском районе.

Наблюдения на многочасовых станциях не выявили закономерного суточного хода в содержании нитратного азота. Результаты экспериментальных исследований по скорости регенерации нитратов при 5-суточной экспозиции проб в темных склянках показали, что в течение этого времени отмечены случаи прироста их содержания в количестве до 20 мкг/л. Наиболее высокие значения прироста получены при отборе проб в период интенсивного развития процесса фотосинтеза (июль — август) во второй половине дня [70].

6.3.4. Аммонийный азот

Закономерности в режиме аммонийного азота, выявленные в период первых наблюдений за его содержанием, остаются справедливыми и для настоящего времени. В то же время последующие исследования показали, что диапазон концентраций аммония в водах моря расширился, а его среднее содержание в кислородной зоне увеличилось в 3—4 раза. Причину таких изменений В. А. Жоров и С. Г. Богуславский [82] видят в циклических колебаниях интенсивности атмосферной циркуляции.

В современный период в поверхностном слое среднесезонные концентрации аммонийного азота изменяются от <5 до 430 мкг/л. Максимум содержания аммония для фотического слоя (2 000 мкг/л) зарегистрирован в поверхностном слое вблизи устья р. Дунай.

Исследования А. В. Рождественского показали, что в открытой части моря среднее содержание аммонийного азота в поверхностных водах — 27 мкг/л, на глубине 40 м — около 40 мкг/л, в районе Одессы — о. Тендра — 16—54 мкг/л, против устья Дуная в открытом море — 23—78 мкг/л, против Констанцы — 8—66 мкг/л. Значительные

концентрации аммонийного азота обнаружены в Варненском заливе — 389 мкг/л [132].

Весной в поверхностных водах моря содержание аммонийного азота в прибрежных районах составляет 167, а центральных — около 100 мкг/л; летом — 42 и 3 мкг/л соответственно; осенью в прибрежных районах — 192 мкг/л; зимой — 269 мкг/л в прибрежных районах и 242 мкг/л — в глубоководных. Таким образом, в распределении аммония по акватории моря прослеживается тенденция увеличения его концентраций по мере приближения к прибрежным участкам.

Сезонная динамика содержания аммонийного азота показывает его максимум зимой и минимум летом. Внутригодовой ход содержания аммония связан с различной степенью его потребления фитопланктоном. Известно [41], что «аммонийная форма азота может рассматриваться как более доступная» для растений.

6.3.5. Органический азот

Согласно В. Г. Дацко (цит. по [28]), содержание органического азота в море на глубине 25 м 220 мкг/л, на 300 м — 270 мкг/л. А. В. Смолин и Т. Ю. Зеленина (цит. по [150]) получили концентрации, лежащие в диапазоне 150—250 мкг/л. В табл. 64 приведены средние данные по содержанию органического азота, полученные в августе 1960 г. на четырех станциях [159].

Таблица 75

Среднее содержание органического азота в воде Черного моря в августе 1960 г. [159]

Глубина, м	Среднее содержание, мкг/л	Наибольшее отклонение			
		положительное		отрицательное	
		мкг/л	%	мкг/л	%
10	236	18	7	19	8
50	248	34	13	44	18
100	226	26	11	24	11
200	202	66	32	35	18
300	213	37	18	47	22
500	222	66	30	62	28
1000	223	31	14	39	18
1250	212	53	25	32	15
1500	180	7	4	6	3
1850—2000	206	—	—	—	—

Как следует из табл. 75, в отличие от аммонийного азота количество органического азота с глубиной уменьшается, органическое вещество в глубинных водах Черного моря не аккумулируется. Средневзвешенное содержание органического азота по вертикали составляет 220 мкг/л, что в 2 раза больше, чем в океанских водах. Одновременно с этим убыль количества органического азота с глубиной в Черном море значительно меньше по сравнению с океаном.

В годовом аспекте средняя концентрация органического азота в поверхностном слое моря изменяется в следующих пределах: 98—750 мкг/л — весной, <30—2820 мкг/л — летом, 440—2570 мкг/л — осенью. Зимой, согласно разовому наблюдению, выполненному в открытой части северо-западного района, концентрация органического азота составляет 560 мкг/л.

Абсолютный максимум содержания органического азота (4490 мкг/л) наблюдался в осенний сезон года в поверхностном слое акватории, прилегающей к Южному берегу Крыма. Здесь же, на этом же горизонте и в этот же сезон года, органический азот в ряде проб не обнаруживался.

Выводы

В результате проведенных исследований установлены закономерности режима биогенных веществ в водах Черного моря, к основным из которых можно отнести следующие:

— наиболее продуктивными районами моря по большинству исследуемых параметров является северо-западный и юго-восточный, повышенное содержание биогенных веществ в которых связано с интенсивным влиянием речных вод и сбросом промышленных и хозяйственно-бытовых стоков;

— в целом по акватории моря в поверхностном слое прослеживается тенденция увеличения содержания биогенных веществ по мере приближения к прибрежным участкам. На нижележащих горизонтах повышенные концентрации кремния, фосфатов, органического фосфора и аммонийного азота наблюдаются в центрах, а пониженные — на периферии восточного и западного циклонических круговоротов;

— вертикальное распределение кремния, фосфатов, органического фосфора и аммонийного азота характеризуется увеличением их концентрации с глубиной. Исключение составляет лишь слой фотосинтеза, где содержание всех биогенных веществ вследствие интенсивного потребления их фитопланктоном минимальное;

— вертикальное распределение нитритного и нитратного азота в водах Черного моря, в отличие от других районов Мирового океана, ограничено аэробным слоем, поскольку образование и длительное существование этих форм неорганического азота в условиях восстановительной среды невозможно. В то же время в период проведения отдельных экспедиций нитриты и нитраты в малых количествах обнаруживаются в юго-западной части моря на глубинах до 600 и 500 м соответственно, что, по-видимому, связано с поступлением из прол. Босфор и последующим заглублением средиземноморских вод;

— установлено, что динамика содержания биогенных веществ подвержена макро-, мезо- и микромасштабным временным изменениям, определяемым глобальными циклическими колебаниями интенсивности атмосферной циркуляции, внутригодовыми отклонениями гидрометеорологических параметров, существующей системой течений и в меньшей степени суточным ходом фитопланктона;

— макромасштабная (межгодовая) изменчивость содержания биогенных веществ в кислородной зоне проявилась в уменьшении содержания кремния в 10 раз, содержания фосфатов в 2 раза и увеличении содержания аммонийного азота в 3—4 раза. Отмеченные изменения произошли в период после зарегулирования речного стока, однако, с последним они не связаны, поскольку в современный период водный сток рек, впадающих в Черное море, характеризуется положительным трендом. Уменьшение концентрации кремния и

фосфатов обусловлено увеличением биомассы суммарного фитопланктона (для восточной части моря — в 2,9 раза, цит. по [82]). Рост концентрации аммонийного азота связан с подъемом глубинных вод [101, 150];

— мезомасштабная (сезонная) временная динамика для большинства исследованных биогенных веществ показывает максимум в холодный и минимум в теплый периоды года. Однако в отдельных районах моря могут наблюдаться незначительные отклонения от наметившейся тенденции;

— в микромасштабной (суточной) временной динамике биогенных веществ выявить какой-либо закономерности не удалось. По-видимому, имеющие место непериодические изменения в концентрациях кремния, минеральных и органических форм фосфора и азота на многочасовых станциях определяются в первую очередь динамикой водных масс.

Проведен расчет основных элементов баланса кремния, фосфатов, нитритов и общего фосфора в водах Черного моря. Результаты расчета показали, что для всех перечисленных биогенных веществ наиболее главными приходными составляющими являются поступление с речным стоком и приток из прол. Босфор (для общего фосфора — также поступление с атмосферными осадками), расходными — захоронение в донные отложения (для нитритов учесть не удалось) и отток в Босфор. В то же время вопросы, касающиеся баланса этих биогенных веществ, требуют дальнейшей разработки и уточнения. Это относится к следующим составляющим: поступление биогенных веществ с атмосферными выпадениями, материалами абразии берегов и дна, а также в результате антропогенной деятельности. Необходимо оценить обмен биогенными веществами на границах водный слой — донные отложения и водный слой — грунтовые растворы.

Недостаточная гидрохимическая изученность моря не позволила к настоящему времени составить хотя бы ориентировочный баланс нитратного, аммонийного и органического азота. Работы в этом направлении необходимо начать в ближайшем будущем.

7. МИКРОЭЛЕМЕНТЫ

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлементы, к которым относятся все элементы (за исключением биогенных элементов) с концентрациями $\leqslant n \cdot 10^{-1}$ мг/л и число которых достигает более 80 % из общего количества определенных элементов (74), изучены в водах моря значительно хуже, чем другие группы элементов и их соединения. Нужно также отметить, что по большинству микроэлементов в Черном море известные сведения не систематичны ни во времени, ни в пространстве. В то же время для вод Черного моря содержание и закономерности изменчивости концентраций полей микроэлементов являются, с современных позиций экологии и научного развития народного хозяйства, важнейшими химическими характеристиками. Дело в том, что многие микроэлементы относятся к группе так называемых тяжелых металлов и физиологически активных (в том числе токсичных) элементов и к группе ценных в промышленном отношении элементов. Участие микроэлементов в физиологической деятельности морских организмов должно приводить к зависимости биологической продуктивности моря от уровня концентраций микроэлементов (так же, как от содержания в воде, например, микроконцентраций фосфора). Среди элементов-биофилов, т. е. элементов, обязательно входящих в состав живого организма (их по принятым представлениям — 21), к микроэлементам относятся 10 (I, Fe, Cs, V, Mn, Cu, Zn, Mo, Co, Se). Однако по современным теоретическим представлениям, основанным на законе микроскосмического рассеяния, предполагается наличие всех естественных элементов в любом организме.

По-видимому должны существовать в Черном море закономерности взаимного влияния полей концентраций микроэлементов, обладающих свойством непрерывности, и морских экосистем. Например, на уровень «урожайности» марикультур должен влиять уровень концентраций тех или иных микроэлементов. Поэтому (наряду с предельно-допустимыми концентрациями некоторых элементов, обладающих токсичными свойствами) должны существовать предельно низкие концентрации физиологически активных микроэлементов.

Понимание такого рода научно-практических задач наряду с новыми задачами, относящимися к проблемам изучения запасов минерального сырья в море, сделало остронеобходимым исследование микроэлементов в Черном море.

Большим сдерживающим фактором в изучении полей микроэлементов в воде моря было до недавнего времени относительно слабое развитие аналитической химии морской воды. Использовались либо трудоемкие моноэлементарные методики анализа, либо многоэлементные методики, обладающие недостаточно высокими метрологическими характеристиками.

В работе рассматриваются в основном только систематические данные последних лет по ртути, цинку, свинцу, кадмию, меди, кобальту, хрому, которые получены в СО ГОИНа. Данные, полученные в СО ГОИНа и в других научных учреждениях, по другим микроэлементам (сурьма, мышьяк, серебро, селен, золото, тербий, скандий, никель, марганец, молибден, ваданий, уран, торий, и др.) не рассматриваются из-за их малой изученности.

7.1. Информация о материалах наблюдений. Аналитические методы

Информация о материалах наблюдений и аналитических методах, использованных в данной работе, представлена в табл. 76.

Все методики определения тяжелых металлов, указанные в табл. 76, по нашему мнению, по своим объективным характеристикам давали

Таблица 76

Материалы наблюдений и аналитические методики

Период наблюдений	Количество наблюдений	Аналитическая методика	Источник информации
Медь			
1945, 1955	3	Полярографическая, визуально-колориметрическая	[112, 149]
1959—1964	—	Химико-спектральная	[18]
1965	13	Эмиссионно-спектральная	[95]
1965	—		[99]
III—IV 1969	133	Нейтронно-активационная	[189]
1971	39	Химико-спектральная	[38]
VI—VIII 1972	60	Атомно-абсорбционная (пламенная)	[116]
VII—VIII 1972	9	Спектральная	[12]
III 1974	860	Спектрометрическая	[140]
IV 1975			
II—IV 1977	401	Атомно-абсорбционная (электротермическая)	[135]
VIII—XI 1979			
IX 1981	24		
VIII—XI 1982	90	Атомно-абсорбционная (электротермическая)	[105]
Свинец			
1959—1964	—	Химико-спектральная	[18, 19]
1965	4		[95]
1971	39	Химико-спектральная	[38]
1972	60	Атомно-абсорбционная (пламенная)	[116]
1976	9	Атомно-абсорбционная (электротермическая)	[143]
VIII—IX 1979; III—IV 1980; IX—XI 1981	200	Атомно-абсорбционная (электротермическая)	[135]
VIII—XI 1982	90	То же	[105]
Кадмий			
VI—VIII 1972	51	Атомно-абсорбционная (пламенная)	[116]
1976,	10	Нейтронно-активационная	[143]
II 1977, XI 1979, 1981	400	Атомно-абсорбционная (электротермическая)	[135]
IX 1982	19	Атомно-абсорбционная (электротермическая)	[105]
Ртуть			
III—IV 1969	75	Нейтронно-активационная	[189]
1970	18	Фотометрическая	[145]
1976	10	Нейтронно-активационная	[143]
1974—1978	581	Визуально-колориметрическая	СО ГОИН
XI 1979	36	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
III—IV, XII 1980	186	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
II, IX 1981	57	То же	СО ГОИН
III—IV, VIII—X, XI 1982	255	»	СО ГОИН

Продолжение табл. 76

Период наблюдений	Количество наблюдений	Аналитическая методика	Источник информации
Кобальт			
1945	3	Полярографическая	[112]
1965	4	Эмиссионно-спектральная	[95]
1969	—	Нейтронно-активационная	[189]
XI 1979	36	То же	СО ГОИН
III—IV, XII 1980	186	»	СО ГОИН
II, IX 1981	57	»	СО ГОИН
III—IV, VIII—X, XI 1982	245	»	СО ГОИН
Цинк			
1969	—	Нейтронно-активационная	[189]
VI—VIII 1972	51	Атомно-абсорбционная	[116]
1976	10	Нейтронно-активационная	СО ГОИН, [143]
XI 1979	36	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
III—IV, XII 1980	186	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
II, IX 1981	57	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
III—IV, VIII—X, XI 1982	245	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
Хром			
XI 1979	36	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
III—IV, XII 1980	186	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
II, IX 1981	57	Нейтронно-активационная	СО ГОИН
III—IV, VIII—X, XI 1982	245	Нейтронно-активационная	СО ГОИН

относительно верные результаты. Методики отличались только нижними пределами определения металла и погрешностями анализа, а также трудоемкостью аналитической работы. Например, сопоставление визуально-колориметрической и атомно-абсорбционной методик определения ртути [80], позволило считать первую методику правильной. Поэтому все данные по содержанию тяжелых металлов, полученные различными методами анализа (табл. 76), являются сопоставимыми в интервалах обнаруживаемых концентраций металлов по акватории и толще вод моря. Далее, концентрации металлов, полученные различными методами, как правило, совпадали по своим значениям, хотя исследования проводились в разное время различными исследователями в различных научных лабораториях. Как правило, также, метрологические характеристики методик анализа (нижний предел обнаружения и погрешность измерения концентраций металлов) приведены исследователями в научных публикациях и качество их данных легко оценивается. Следует подчеркнуть, что высказываемые иногда сомнения в сопоставимости данных по содержанию тяжелых металлов в воде моря, полученных различными методами, не имеют под собой объективной почвы, так как все методики определения этих металлов основаны на измерении

Таблица 77

Относительные стандартные отклонения S_r от среднего значения концентраций (мкг/л) при анализе пяти параллельных проб (28 марта—6 апреля 1982 г.)

Номер пробы	Глубина отбора проб, м	Цинк		Ртуть		Кобальт		Серебро		Хром	
		мкг/л	S_r	мкг/л	S_r	мкг/л	S_r	мкг/л	S_r	мкг/л	S_r
1	0—0,5	20,4	0,21	2,08	0,30	0,61	0,30	1,74	0,26	4,33	0,12
2	98	6,00	0,22	0,58	0,11	0,090	0,30	0,49	0,13	0,92	0,32
3	0—0,5	8,60	0,17	0,57	0,30	0,10	0,30	0,49	0,16	0,47	0,28
4	2060	1,00	0,17	0,47	0,11	0,16	0,34	0,07	0,08	0,16	0,16
5	0—0,5	0,66	0,04	0,15	0,13	0,022	0,20	0,12	0,22	0,14	0,07
6	25	3,38	0,02	0,11	0,14	0,036	0,25	0,06	0,07	0,18	0,08
7	0—0,5	11,5	0,07	0,77	0,18	0,25	0,13	0,95	0,05	2,00	0,07
8	85	3,67	0,11	0,23	0,21	0,056	0,16	0,20	0,13	0,45	0,09
9	0—0,5	9,00	0,12	0,50	0,24	0,21	0,06	0,32	0,12	0,75	0,14
10	2028	0,73	0,20	0,17	0,30	0,050	0,26	—	—	0,24	0,04
11	0—0,5	6,00	0,11	0,77	0,08	0,042	0,23	0,07	0,07	0,15	0,21
12	25	8,45	0,11	2,00	0,06	0,037	0,26	0,14	0,10	0,46	0,15

аналитических сигналов, возбуждаемых атомами или ионами (но не химическими соединениями металла) определяемых металлов. В этом состоит коренное отличие обсуждаемых методик анализа морских вод на содержание тяжелых металлов от методик анализа на содержание, например, нефтяных углеводородов.

В СО ГОИНа использовались четыре методики: визуально-колориметрическая для ртути, спектрофотометрическая для меди, атомно-абсорбционная для меди, кадмия и свинца, нейтронно-активационная для цинка, ртути, кобальта, железа и хрома. Так, например, нижний предел определения ртути визуально-колориметрическим методом достигал [80] 0,01 мкг/л. Относительные стандартные отклонения от среднего значения концентрации (Sr), полученные при анализе пяти параллельных проб (пробы подготовлены к нейтронно-активационному анализу в экспедиционных условиях в лаборатории НИС «Яков Гаккель»), представлены в табл. 77.

7.2. Характеристики содержания и распределения микроэлементов

7.2.1. Медь в открытой акватории моря

Карта изученности меди в море по данным СО ГОИНа представлена на рис. 76, а обобщенные цифровые данные по содержанию меди в воде, содержащей растворенный кислород, в табл. 78 (спектрофотометрический метод анализа) и в табл. 79 (атомно-абсорбционный метод анализа). Распределение меди в сероводородной воде моря показано на рис. 77.

По результатам наблюдений в 1974—1975 гг. концентрации общей меди не выходили за пределы $<0{,}3$—30,2 мкг/л. Эти данные находятся в согласии с более ранними наблюдениями других авторов [14, 38, 79, 95, 112, 116, 149, 166, 189]. Так, Малюга [112] находил медь в количествах 16—17 мкг/л, Жаворонкина [79] — 4—25 мкг/л, Виноградова с сотрудниками [38] — от $1{,}63 \pm 0{,}33$ до $23 \pm 7{,}90$ мкг/л, Морозов с сотрудниками [116] — 1—8 мкг/л.

В первую половину 1974 г. средние концентрации меди не превышали 2 мкг/л, а максимальные значения не превышали 6,3 мкг/л. Однако в период экспедиционных исследований по второй половине 1974 г. и в первой половине 1975 г. наблюдались более высокие концентрации меди. Рассчитанные средние концентрации меди в течение указанного времени также существенно менялись. В соответствии с этим изменялось рассчитанное содержание меди. Например, для слоя воды 0—100 м в западной части моря (объем слоя воды

Таблица 78

Концентрация общей меди в толще моря, мкг/л (спектрофотометрический метод анализа)

Дата	Район исследования	Горизонт, м	Количество проб	Концентрация меди	
				интервал	среднее
1974 г., март — апрель	Вся акватория	0—0,5	19	0,5—4,6	1,6
		50	15	0,5—1,6	0,9
		100	14	0,3—1,8	0,7
		0—100	69	0,3—4,6	1,0
1974 г., март — апрель	Западная часть	0—0,5	11	0,5—4,2	1,3
		50	9	0,5—1,6	0,7
		100	8	0,3—0,5	0,4
		0—100	41	0,3—4,2	0,8
1974 г., август — сентябрь	Западная часть	0—0,5	15	1,0—5,0	3,1
		50	14	1,4—10,4	3,7
		100	14	1,0—15,0	3,7
		0—100	45	1,0—15,0	3,5
1974 г., октябрь — ноябрь	Каркинитский залив	0—0,5	10	1,0—15,0	4,2
		Придонный	10	2,6—12,2	5,0
1974 г., ноябрь — декабрь	Вся акватория	0—0,5	54	0,3—12,8	2,0
		50	49	1,0—13,6	3,0
		100	36	1,4—5,0	2,9
		0—100	137	0,3—13,6	2,5
1974 г., ноябрь — декабрь	Западная часть	0—0,5	31	0,5—4,2	2,0
		50	28	1,0—13,6	3,8
		100	8	1,6—2,6	2,3
		0—100	74	0,5—13,6	2,7
1975 г., март	Западная часть	0—0,5	29	1,0—6,0	2,2
		50	5	1,4—4,6	2,4
		100	7	1,8—4,6	2,3
		0—100	41	1,0—6,0	2,2
1975 г., апрель	Западная часть	0—0,5	42	1,0—30,2	4,2
		50	4	1,0—3,8	2,2
		100	11	1,0—2,4	1,3
		0—100	57	1,0—30,2	3,5
1975 г., апрель	Северо-западный район	0—0,5	5	3,0—25,7	11,8
		10—45	4	3,8—19,2	9,0
		0—45	9	3,0—25,7	10,6

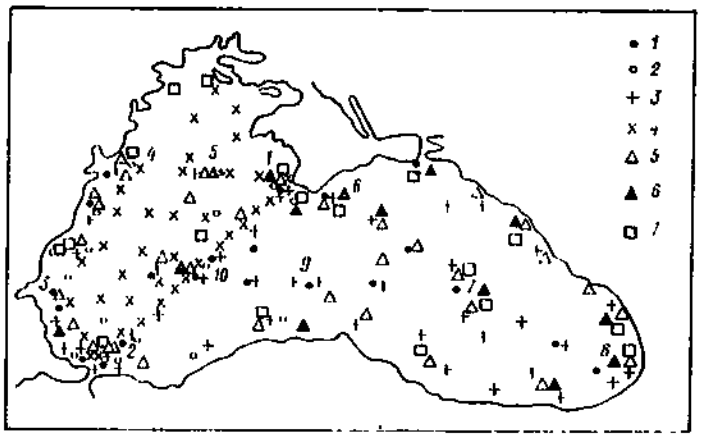

Рис. 76. Схема расположения и номера станций отбора проб для определения меди в воде.

1 — март — апрель 1974 г.; *2* — август — сентябрь 1974 г.; *3* — ноябрь — декабрь 1974 г.; *4* — март — апрель 1975 г.; *5* — февраль 1977 г.; *6* — май 1978 г.; *7* — сентябрь — октябрь 1979 г.

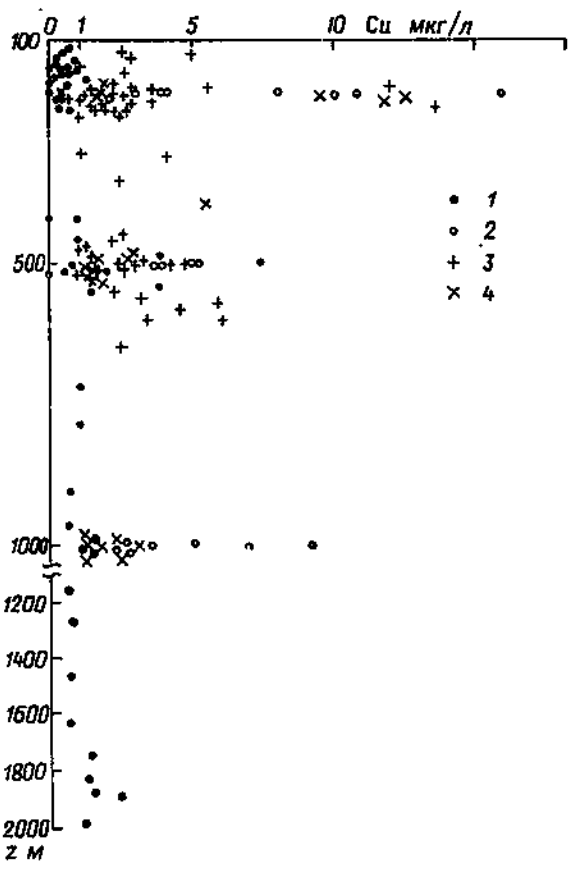

Рис. 77. Распределение общей меди в сероводородной зоне Черного моря.

1 — март — апрель 1974 г.; *2* — август — сентябрь 1974 г.; *3* — ноябрь — декабрь 1974 г.; *4* — март — апрель 1975 г.

примерно $1{,}38 \cdot 10^4$ км^3), в котором концентрация меди по глубине изменялась незначительно, количество меди увеличилось на $37 \cdot 10^3$ т за период с марта — апреля по август — сентябрь 1974 г. Затем к ноябрю — декабрю того же года количество меди уменьшилось на $11 \cdot 10^3$ т, а к марту — апрелю 1975 г. вновь возросло на $2{,}7 \cdot 10^3$ т. В марте и апреле 1975 г. содержание меди в западной части моря увеличилось на $18 \cdot 10^4$ т, так как средняя концентрация меди увеличилась на 1,3 мкг/л. При этом изменился характер вертикального распределения меди от равномерного (в марте) до возрастания концентрации меди в поверхностном слое и уменьшения ее на горизонте 100 м (в апреле). Эти изменения произошли на фоне перестройки гидрологической структуры вод западной части моря. Так, средняя соленость и температура на горизонтах 0—0,5 м, 50 м и 100 м соответственно 18,15; 18,35; 19,73 ‰ и 8,0; 7,7 и 8,2 °С в марте, а в апреле 17,94; 18,46; 20,60 ‰ и 11,0; 8,0 и 8,5 °С. Менее соленым водам были свойственны более высокие концентрации меди.

Однако столь резкое увеличение содержания меди в течение одного месяца не может произойти

Концентрация меди в водной толще моря, мкг/л (атомно-абсорбционный метод анализа)

Таблица 79

Дата	Горизонт, м	Восточная часть моря *				Западная часть моря				Вся акватория моря	
		Растворенная форма		Нерастворенная форма		Растворенная форма		Нерастворенная форма		Растворенная форма	Нерастворенная форма
		интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее	среднее	среднее
1977 г., февраль	0—0,5	0,06—2,10	0,47	—	—	0,21—2,73	1,10	—	—	0,78	—
	42—65	0,28—3,77	1,00	—	—	0,65—2,74	1,19	—	—	1,07	—
	85—100	0,12—0,67	0,28	—	—	0,07—6,30	1,35	—	—	0,85	—
1978 г., май — июнь	0—0,5	0,64—1,44	1,14	0,07—0,26	0,19	0,48—2,88	1,19	0,09—0,29	0,16	1,17	0,17
	20—65	1,04—1,26	1,17	0,21—0,49	0,35	0,70—3,24	1,63	0,26—0,77	0,48	1,40	0,42
	85—100	0,64—1,26	1,05	0,26—2,29 **	0,97	0,56—0,92	0,76	<0,06—1,03	0,33	0,88	0,61
1979 г., сентябрь — октябрь	0—0,5	0,46—0,84	0,61	0,08—0,23	0,17	0,48—1,00	0,74	<0,06—0,39	0,10	0,69	0,13
	22—60	0,55—0,74	0,62	0,09—0,15	0,11	0,34—0,67	0,52	0,09—0,13	0,10	0,57	0,10
	85—100	0,36—0,57	0,44	0,08—0,15	0,12	0,38—0,82	0,63	<0,06—0,67	0,13	0,57	0,12
1981 г., сентябрь	0—0,5	0,83—1,14	1,03	0,16—0,47	0,31	0,32—1,61	1,00	0,13—0,24	0,20	1,00	0,25
	100	0,94—1,66	1,30	0,22—0,52	0,37	0,68—1,35	1,00	0,35—0,94	0,69	1,15	0,53
Весь период	Вся толща	—	0,83	—	0,32	—	1,00	—	0,27	0,90	0,29

* — Границей между восточной и западной частями моря принят 35 ° в. д.

** — Максимальное значение 63 мкг/л не учтено при расчете среднего значения.

Примечание. Количество наблюдений: 145 (растворенная форма) и 84 (нерастворенная форма).

в результате только поступления ее с атмосферными осадками и речным стоком. Так, по оценкам работы [140], с атмосферными осадками в этот период меди поступило не более $0{,}3 \cdot 10^3$ т (объем осадков примерно 13,8 км³), а с водами рек Дуная и Днепра — не более $0{,}42 \cdot 10^3$ т (объем стока примерно 42 км³). Такое несоответствие между изменчивостью содержания меди и ее поступлением нельзя объяснить только ориентировочностью расчета средних концентраций меди, проводимому по малому массиву наблюдений. По-видимому, данное явление возникло в результате интенсивного обмена вод открытой части моря с водами северо-западного района, средняя концентрация меди в которых в 1975 г. достигала 10,6 мкг/л. Формирование повышенного уровня концентраций общей меди в северо-западном районе (1975) и Каркинитском заливе (1974) можно объяснить только возникновением условий для поступления общей меди в воду из донных отложений.

Вторая половина 1974 г. характеризовалась значительным количеством штормовых дней (например, в летней экспедиции 1974 г. 70 % времени составила штормовая погода), поэтому, по-видимому, происходило перераспределение меди между водой и донными отложениями. Донные отложения северо-западного района, согласно работе [143], содержат значительные концентрации меди (примерно $2 \cdot 10^{-3}$ %), а в отдельные периоды воды могут содержать повышенные концентрации меди во взвешенной форме. Так в мае 1978 г. глубинные воды кислородной зоны моря (см. табл. 79) отличались от поверхностных вод более высокими концентрациями взвешенной меди. В этот период относительное содержание взвешенной меди в глубинных водах также было повышенным. В отдельных пробах были обнаружены аномально высокие концентрации взвешенной меди (63,3 мкг/л на глубине 100 м и 87 мкг/л в слое 0—0,5 м на станциях центральной части моря). Но в период экспедиции 1979 г. распределение взвешенной меди по глубине было уже практически однородным (см. табл. 79): 0,12—0,13 мкг/л и 15—16 % общей меди.

Концентрации общей меди были меньше (по данным 1974—1975 гг.) в сероводородной зоне, чем в слое воды 0—100 м, и с увеличением глубины уменьшались (см. рис. 77). Поэтому очевидно, что источники поступления меди в воды моря находятся в контакте с кислородными водами. Так, повышенные концентрации меди наблюдались во второй половине 1974 г. и в 1977 г. на горизонтах 50—100 м, т. е. на глубинах, соответствующих глубинам северо-западного района Черного моря. Кроме того, уровень концентраций меди (1,9—2,1 мкг/л) в водах северо-западного района, наблюдавшийся в июле — августе 1977 г., близок к среднему уровню концентраций этого элемента в 1977 г. в открытой акватории западной части моря (1,20 мкг/л). Следовательно, по средним значениям концентраций меди воды Черного моря можно разделить на поверхностные — аэробные, переходные (50—100 м) и сероводородные воды (глубина 200 м и у дна).

Выполненные оценки степени изменчивости концентраций на станциях, расположенных в различных районах моря, характеризуют определенные районы акватории моря. Например, данные о концентрациях меди в поверхностном слое воды в различные периоды времени на станциях 1—10 представлены на рис. 78. На глубоководных станциях 3, 6, 7, 8 и 10, расположенных в наиболее удаленных от антропогенного влияния районах, наблюдалась минимальная изменчивость концентрации меди (относительное стандартное отклонение менее 0,9). Концентрацию меди на этих станциях в водах кислородной зоны моря можно принять за фоновую концентрацию растворенной меди. Фоновые концентрации меди меняются в определенных пределах под влиянием процессов переноса веществ в море.

Поля концентраций меди (растворенной и взвешенной) неоднородны и динамичны (см.

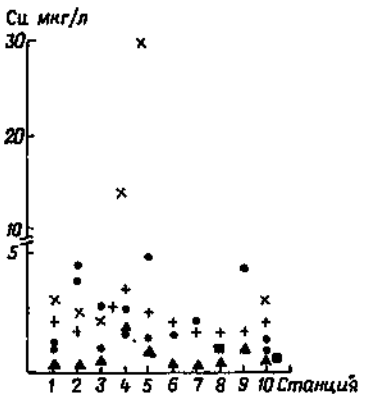

Рис. 78. Распределение меди на станциях 1—10 в поверхностном слое в 1974—1980 гг.
Усл. обозначения см. рис. 76.

табл. 79). Варьирование концентраций достигало двух порядков. Нерастворимая форма меди от ее общей формы составляла по средним значениям для отдельных экспедиций 13—20 % (в слое 0—0,5 м) и 17—40 % (в слое 85—100 м). Воды западной части моря содержали более высокие концентрации растворенной и более низкие концентрации взвешенной меди по сравнению с его восточной частью. Растворенная медь содержалась практически в одинаковых средних концентрациях в поверхностном и глубинном слоях воды, в то время как ее нерастворимая форма концентрировалась в глубинных водах. Однако характер распределения форм меди по глубине является динамичным и в отдельные периоды в локальных районах отмеченные осредненные закономерности не соблюдаются.

Для полей концентраций меди в море свойственна и мелкомасштабная временная изменчивость (часы и десятки часов), данные о которой для растворенной меди представлены на рис. 79 для станции 2 (см. рис. 76).

Экспертная оценка хода кривых концентраций растворенной меди (*9—10*, рис. 79) показывает, что в поверхностном слое максимумы на кривых приходились в основном на светлое время суток (6—18 ч по ГМТ), а минимумы — как на светлое (12—18 ч), так и на темное время суток (0 ч ГМТ). В придонном слое вод распределение растворенной меди во времени несколько отличается от такового на поверхности. Так, максимальные концентрации меди в основном приурочены уже к темному времени суток (0—6 ч), а минимальные ее концентрации наблюдались в светлое время

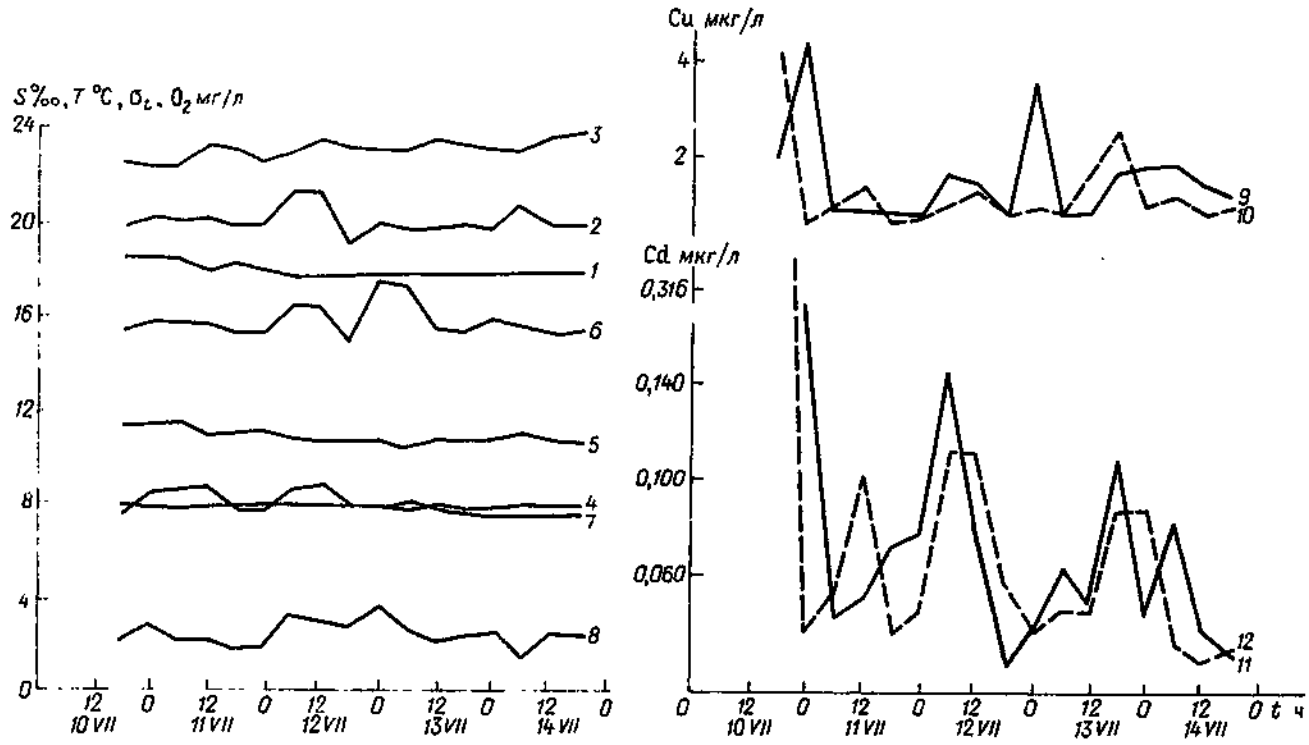

Рис. 79. Распределение растворенных форм меди и кадмия на многочасовой станции в прибосфорском районе 10—14 июля 1978 г.

1, 3, 5, 7, 10, 12 — 0—0,5 м; *2, 4, 6, 8, 9, 11* — 90—96 м; *9* и *10* — медь; *11* и *12* — кадмий; *1* и *2* — соленость; *3* и *4* — температура воды; *5* и *6* — условная плотность; *7* и *8* — растворенный кислород.

суток. Следовательно, изменчивость концентрации растворенной меди имеет в определенной мере внутрисуточный ход, определяемый гидродинамическими факторами, поскольку видимой корреляционной связи с ходом солености, температуры воды, условной плотностью ее и содержанием растворенного кислорода (*1—8*, рис. 79), несмотря на их изменчивость, нет. Влияние гидродинамических параметров на распределение растворенной меди показано ранее на примере исследований на многочасовой станции в Эгейском море [54]. Значительная изменчивость концентраций меди при многочасовых наблюдениях отмечалась и в другие периоды исследований [140]. При этом мелкомасштабная изменчивость была свойственна не только концентрациям растворенной, но и взвешенной форм этого элемента. Например, 10—14 июля 1978 г. согласно работе [140] максимумы концентраций взвешенной формы меди на кривых распределения практически на обоих изучавшихся горизонтах соответствовали минимумам концентраций растворенной меди. Следовательно, зависимость уровня концентраций меди от интенсивности биохимических процессов не прослеживается по имеющемуся массиву многочасовых наблюдений [140], размеры которого, по-видимому, недостаточны для получения надежных выводов о причинах мелкомасштабной временной изменчивости концентраций меди. По аналогии с выводами о причинах мелкомасштабной временной изменчивости концентраций меди в водах Эгейского моря, сформулированных как определяющее влияние динамики вод, в том числе под действием скоростей и направлений ветра, можно предположить, что эти же причины характерны и для Черного моря.

7.2.2. Кадмий и свинец в открытой акватории моря

Обобщенные цифровые данные по этим металлам представлены в табл. 80 и 81. Представленные данные свидетельствуют, что поля концентраций обеих форм кадмия и свинца неоднородны и динамичны. Варьирование обеих форм этих металлов составляло два порядка. Доля нерастворимого кадмия не превышала 20 %. Нерастворимая форма свинца в основном преобладала над его растворенной формой и составляла по средним значениям для разных глубин 44—83 % от его валового содержания. Средние для всего периода наблюдений относительное содержание и абсолютные концентрации взвешенного свинца были выше в восточной части моря, а растворенный свинец и кадмий преобладали в его западной части. Н. П. Морозов с сотрудниками [116] ранее также наблюдали для свинца отмеченную закономерность в поверхностном слое воды. Содержание взвешенного кадмия было фактически одинаковым в обеих частях моря. Для слоя 0—0,5 м по средним концентрациям за весь период наблюдений характерно более высокое содержание растворенных форм свинца и кадмия по сравнению с глубинными водами. Нерастворимые формы металлов концентрировались в глубинных слоях моря.

Пространственно-временная динамика концентраций кадмия в толще вод моря делает условным расчет средних концентраций по малому числу наблюдений. Так, например, в 1977 г. на глубине 50 м на одной из станций была обнаружена концентрация кадмия 2,43 мкг/л, с учетом которой средняя его концентрация поднимается в слое воды 42—65 м от 0,052 до 0,165 мкг/л. В 1978 г. в одной из проб взвешенного вещества было найдено на глубине 100 м 0,095 мкг/л кадмия, и его кон-

Таблица 80

Концентрация кадмия в водной толще моря, мкг/л

Дата	Горизонт, м	Растворенная форма		Нерастворенная форма		Растворенная форма		Нерастворенная форма		Растворенная форма	Нерастворенная форма
		интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее		
		Восточная часть моря				Западная часть моря				Вся акватория моря	
1977 г., февраль	0—0,5	0,010—0,120	0,032	—	—	0,010—0,180	0,075	—	—	0,056	—
	42—65	0,008—0,060	0,022	—	—	0,010—0,290 *	0,084	—	—	0,052	—
	85—100	0,006—0,020	0,011	—	—	0,007—0,030	0,017	—	—	0,014	—
1978 г., май — июнь	0—0,5	0,070—0,370	0,179	0,002—0,008	0,006	0,040—0,700	0,190	0,001—0,010	0,006	0,202	0,007
	20—65	0,019—0,056	0,035	0,002—0,004	0,003	0,027—0,260	0,106	0,004—0,020	0,012	0,071	0,007
	85—100	0,033—0,062	0,050	0,001—0,019	0,011	0,008—0,060	0,031	<0,001—0,028 **	0,006	0,033	0,008
1979 г., сентябрь — октябрь	0—0,5	0,016—0,054	0,027	<0,001—0,023	0,006	0,012—0,077	0,030	<0,001—0,011	0,003	0,029	0,004
	22—60	0,018—0,055	0,032	<0,001—0,012	0,005	0,010—0,032	0,021	<0,001—0,001	0,001	0,027	0,003
	85—100	0,018—0,033	0,023	0,001—0,007	0,004	0,016—0,108	0,039	0,001—0,003	0,001	0,033	0,002
1981 г., сентябрь	0—0,5	0,020—0,034	0,026	0,002—0,003	0,003	0,006—0,049	0,024	0,002—0,003	0,002	0,025	0,003
	100	0,020—0,025	0,023	—	0,002	0,006—0,034	0,019	—	0,003	0,020	0,003
Весь период	Вся толща	—	0,042	—	0,005	—	0,058	—	0,004	0,055	0,005

* Наблюденное максимальное значение 2,43 мкг/л не учтено при расчете среднего значения.
** Наблюденное максимальное значение 0,095 мкг/л не учтено при расчете среднего значения.

Примечание. Количество наблюдений: 143 (растворенная форма) и 84 (нерастворенная форма).

центрация в слое 85—100 м возрастала с 0,008 до 0,015 мкг/л.

Диапазон концентраций растворенного свинца в 1979—1981 гг. в толще вод 0—100 м составлял 0,05—3,78 мкг/л, взвешенного свинца 0,05—6,20 мкг/л. Более ранние наблюдения в поверхностном слое дали результаты: 0,5—100 мкг/л при среднем значении 3 мкг/л (для центральной акватории — 10,6 мкг/л). Согласно работам [14, 15] содержание свинца в поверхностных водах составило примерно 5 мкг/л, в глубинных водах (на 1600 м) примерно 7 мкг/л, а с 1959 по 1964 г. средние концентрации возрастали у берегов Крыма с 0,5 до 9,2 мкг/л. Авторы работы [38] обнаруживали свинец в количествах до 20 мкг/л, но средние концентрации для поверхностных вод составили 1,6 мкг/л, для глубинных вод — 2,2 мкг/л. Лазарева и Жариков [144] в поверхностных водах находили свинца 2 мкг/л, в глубинных — 0,94 мкг/л. По Морозову с сотрудниками, летом 1972 г. в поверхностном слое воды центральной акватории моря среднее содержание кадмия составляло 2 мкг/л в диапазоне <0,2—11,6 мкг/л, в районах гидрофронтов рек среднее содержание 1,1—1,6 мкг/л с диапазоном их колебаний < 0,2—6 мкг/л [116]. Распределение кадмия по акватории моря охарактеризовано как пятнистое (неоднородное) распределение.

Для полей концентраций кадмия и свинца также свойственна и мелкомасштабная временная

Таблица 81

Концентрации свинца в водной толще моря, мкг/л

Дата	Горизонт, м	Растворенная форма		Нерастворенная форма		Растворенная форма		Нерастворенная форма		Растворенная форма	Нерастворенная форма
		интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее	интервал	среднее	среднее	среднее
		Восточная часть моря				Западная часть моря				Вся акватория моря	
1979 г., сентябрь — октябрь	0—0,5	0,13—0,52	0,24	0,24—2,70	1,60	0,10—0,58	0,27	0,11—1,80	0,65	0,26	0,76
	22—60	—	—	—	—	0,13—0,28	0,16	0,23—1,32	0,78	—	—
	85—100	0,15—0,20	0,18	0,38—6,20	2,67	0,12—1,26	0,36	0,07—0,67	0,35	0,33	1,19
1980 г., март — апрель	0—0,5	0,05—0,20	0,12	—	—	0,25—3,78	1,06	—	—	0,71	—
	100	0,05—0,58	0,23	—	—	0,05—0,94	0,42	—	—	0,36	—
1981 г., сентябрь	0—0,5	0,30—0,53	0,39	0,06—1,06	0,55	0,12—0,29	0,21	0,05—0,10	0,08	0,30	0,28
	100	0,38—0,52	0,45	0,10—0,59	0,35	0,18—0,48	0,29	0,07—0,55	0,27	0,38	0,30
Весь период	Вся толща	—	0,27	—	1,29	—	0,39	—	0,43	0,34	0,82

Примечание. Количество наблюдений: 56 (растворенная форма)и 40 (нерастворимая форма).

изменчивость по аналогии с полями концентрации меди, данные о которой для примера представлены на рис. 79 и 80 для ст. 2 (см. рис. 76).

Анализ данных по временной изменчивости концентраций растворенного кадмия (*11* и *12*, рис. 79) показывает, что в поверхностном горизонте (слой 0—0,5 м) прослеживается фактическая положительная корреляция с изменчивостью концентраций растворенной меди (сравнение кривых *10* и *12* на рис. 79). Характер хода кривой *11*, отражающей изменчивость концентрации растворенного кадмия в придонных водах, в сравнении с ходом кривой *12* несколько отличен. Наблюда-

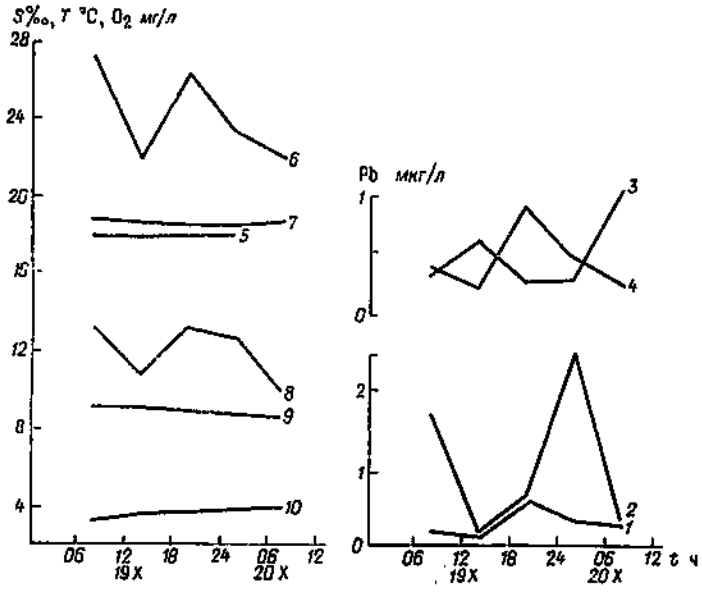

Рис. 80. Распределение растворенного и взвешенного свинца на многочасовой станции в прибосфорском районе 19—20 октября 1979 г.

1 и *3* — растворенный и нерастворимый свинец соответственно в слое 0—0,5 м и на глубине 90—94 м; *5*, *7* и *9* — соответственно соленость, температура и растворенный кислород в слое 0—0,5 м; *6*, *8* и *10* — соответственно соленость, температура и растворенный кислород на глубине 90—94 м.

2 и *4* — растворенный и нерастворимый свинец соответственно в слое 0—0,5 м и на глубине 90—94 м.

лись максимальные концентрации кадмия, как правило, в вечернее или утреннее время. Исследование временной изменчивости концентраций растворенного кадмия на этой же станции в 1979 г. [141] показало практическое совпадение хода кривых их изменчивости в поверхностном и придонном слое вод. Временная изменчивость концентраций взвешенного кадмия также, как правило, находится в противофазе изменчивости концентраций его растворенной формы по данным многочасовых наблюдений в 1978 и 1979 гг. Несмотря на некоторые различия в изменчивости концентраций кадмия и меди, можно считать, что причины, определяющие мелкомасштабную динамику концентраций кадмия, являются теми же самыми, что и в случае меди. Не прослеживается видимая корреляция концентраций кадмия с параметрами, ход которых отражается кривыми *1*—*8* (см. рис. 79), а также внутрисуточный ход концентраций не свидетельствует о заметном влиянии биохимических процессов. Возможно, что продление рядов наблюдений и математические методы их обработки дадут возможность выявить и вклад этих параметров в формирование временной динамики концентраций кадмия.

Анализ данных по внутрисуточной изменчивости концентраций растворенной и взвешенной форм свинца (см. рис. 80) показывает, что 19—20 октября 1979 г. максимумы его концентраций приходятся на дневное, вечернее и ночное время в глубинных водах, но в это же время наблюдались максимумы температуры воды и солености. Следовательно, обе формы свинца распределялись во времени под влиянием гидрологических характеристик (возможно, всплески высоких концентраций свинца возникали в связи с проявлением мраморноморских вод, обладающих повышенной соленостью и температурой). В поверхностном слое вод максимум концентрации растворенной формы свинца приходился на вечернее время, а максимумы концентраций взвешенной его формы на дневное и утреннее время. Гидролого-гидрохимические показатели поверхностного слоя воды (*5*, *7* и *9*, рис. 80) не оказывают влияния на характер распределения свинца и можно допустить, что в светлое время суток концентрирование свинца в виде взвешенной формы определяется продукцией биомассы. Или же опять, как в случае меди и кадмия, концентрации свинца распределяются под влиянием гидродинамических факторов. Для получения более определенных ответов на данные вопросы также необходимы определенные, более существенные массивы наблюдений за мелкомасштабной временной изменчивостью концентраций свинца.

7.2.3. Некоторые общие закономерности распределения меди, кадмия и свинца в открытой акватории моря

Пространственно-временная изменчивость концентраций металлов охарактеризована относительными стандартными отклонениями от среднего значения концентраций S_r (табл. 82).

Таблица 82

Значения S_r для акватории моря (по данным табл. 68—70) и для многочасовой ст. 2 (по данным рис. 80)

Район наблюдений	Горизонт, м	Медь		Свинец		Кадмий	
		р	н	р	н	р	н
Акватория	0—0,5	0,67	0,60	1,76	1,10	1,47	1,00
	22—100	0,96	1,25	0,90	1,58	4,00	2,40
	Вся толща	0,80	0,95	1,30	1,30	2,70	1,70
Станция	0—0,5	0,68	0,78	0,56	0,70	1,19	1,00
	95	0,69	0,78	0,90	0,65	0,95	0,80

Примечание. р — растворимая; н — нерастворимая формы.

Сопоставимость значений S_r для каждого элемента, относящихся к акватории моря, со значениями S_r, полученными на многочасовой станции и характеризующими временную изменчивость концентраций, приводит к выводу, что природа изменчивости полей концентраций меди, кадмия и свинца определяется природой изменчивости концентраций в мелкомасштабном временном интервале (десятки и сотни часов). Поэтому статистические характеристики полей этих металлов можно получить по результатам наблюдений на единичных многочасовых станциях. Степень изменчиво-

сти полей металлов, определяемая величинами S_r, находится в обратной зависимости от уровня средних концентраций металлов. Так, из табл. 82 следует, что S_r возрастает в ряду медь, свинец, кадмий, а средние концентрации в этом году уменьшаются: соответственно для растворимой и нерастворимой форм меди 0,90 и 0,26, свинца — 0,033 и 0,078, кадмия — 0,045 и 0,001 мкг/л.

Физическая неравновесность полей создается, в частности, возможной локальностью и непостоянством местоположения источников поступления металлов в море. Из табл. 83, характеризующей

Таблица 83

Содержание элементов в атмосферных осадках, выпадающих на поверхность Черного моря, мкг/л

Район отбора проб и вид пробы	Период исследования	Время отбора пробы осадков	Медь	Свинец	Кадмий	Серебро
Станция в восточной части моря, дождевая вода	1979	7 октября	64,4	2,70	2,85	0,19
Прибосфорский район, дождевая вода	1979	19 октября	73,5	6,70	1,92	0,38
Побережье Крыма, дождевая вода	1981	17 ноября	7,1	2,80	0,10	0,40
Побережье Крыма, снег	1982	8 января	5,5	5,20	0,13	0,30
Вся акватория	1979—1982	Среднее значение	38	4,35	1,25	0,32

источник поступления металлов с атмосферной водой, видно, что концентрации меди, свинца и кадмия в атмосферной воде, во-первых, достаточно велики по сравнению с концентрациями в морских водах и, во-вторых, варьируют в зависимости от времени и географического положения. Рассчитанное для 1979 г. (объем атмосферных осадков над морем в этом году примерно 240 км³) поступление металлов в слой воды 0—100 м моря 0,19 (медь), 0,025 (свинец) и 0,007 мкг/л (кадмий). Это поступление металлов составило от их содержания в воде соответственно 24,8 и 22 %. Следовательно, потоки металлов с атмосферной водой, поступающие на водную поверхность моря импульсами, могут создавать в ограниченные периоды времени заметную неоднородность в поле концентраций микроэлементов при одновременном изменении динамики водных масс. Рентгенорадиометрическим анализом проб аэрозолей, выпавших на водную поверхность моря в 1975 г., определено поступление меди до 17,5; свинца до 22 кг/(км²·год) [143], что близко к данным 1979 г. (медь примерно 22 и свинец — 2,5 кг/(км²·год)).

Металлы, поступающие на поверхность моря с атмосферной водой, имели в основном естественное происхождение, если принять серебро в качестве реперного элемента, т. е. элемента неантропогенной природы (см. табл. 83). В этом случае отношения массовых кларков меди, свинца и кадмия к кларку серебра в литосфере соответственно 670, 230 и 2, не ниже отношений концентраций меди и свинца к концентрации серебра в атмосферных водах (табл. 83), соответственно 120 и 14 или близких для кадмия — 4. Если выбор реперного элемента достаточно надежен, то поля концентраций металлов в море находятся под влиянием достаточно устойчивого по интенсивности потока металлов из атмосферы (антропогенный компонент сравнительно мал). Этим также можно объяснить отмеченную зависимость величины S_r от концентраций металлов. Действительно, чем ниже концентрация металла в поле, тем легче внести в него возмущения физического, химического и биологического характера, так как значительнее влияют различного рода флюктуации.

Биологическая неравномерность создается потреблением микроэлементов живыми организмами с различной интенсивностью, зависящей от времени и биопродуктивности.

Короткопериодные временные колебания концентраций кадмия являются, вероятно, причиной существования динамики его концентраций, в основе которых лежит динамика вод и мелкомасштабная неравномерность распределения кадмия в водном пространстве. Например, наблюдения на многочасовой станции в прибосфорском районе в 1978 г. показали, что наряду с кадмием в широких пределах варьировали температура (22,4—23,8 °С в поверхностном, 7,89—8,96 °С в глубинном слоях воды) и соленость (17,65—18,28 ‰ в поверхностном, 19,00—21,28 ‰ в глубинном слоях воды).

Неравномерность распределения кадмия в водной толще создается пространственной и временной неравномерностью поступления кадмия. Например, согласно выполненным нами расчетам, повышение средней концентрации кадмия в поверхностном слое в течение года с 0,056 (по данным 1977 г.) до 0,209 мкг/л (по данным 1978 г.) может наступить в результате увеличения поступления кадмия на водную поверхность по сравнению с предыдущим годом на 0,1 кг/км². Такие колебания в средних годовых значениях поступления кадмия на водную поверхность из атмосферы реальны. Так, например, найдено содержание кадмия в дождевых водах восточной части моря, прибосфорского района и Крыма, которое в 1979—1982 гг. составляло 0,10—2,85 мкг/л при ориентировочном среднем значении 1,25 мкг/л. Поэтому за год может выпадать примерно 250 т кадмия или 0,6 кг/км² (423 000 км² — площадь моря), а по расчетам на 1979 г. выпало кадмия примерно 570 т или 1,35 кг/км². Этими причинами можно объяснить высокие концентрации кадмия в поверхностном слое воды летом 1972 г. [116], т. е. потоки металла с атмосферной водой, поступающие на водную поверхность моря импульсами, могут создавать в ограниченные периоды времени заметную неоднородность и динамику концентраций при одновременном воздействии динамики водных масс.

7.2.4. Цинк, ртуть, кобальт, хром

Наблюдения выполнялись на девяти станциях (три станции в северо-западном районе, две на разрезе м. Херсонес — прол. Босфор, три станции на разрезе Ялта — Батуми и одна станция в районе Туапсе) (табл. 84).

Наблюдавшиеся за 1979—1982 гг. интервалы концентраций для каждого элемента достаточно велики и различны для различных периодов времени (периодов экспедиций). Следовательно, для концентраций изученных микроэлементов, раство-

Таблица 84

Концентрация растворенных микроэлементов, мкг/л

Горизонт, м	Дата	Цинк	Ртуть	Кобальт	Хром
0—0,5	XI 1979 г.	0,57—12,6	<0,002—0,62	0,059—2,05	<0,001—0,11
Глубинный (15—2000)		1,06—7,80	<0,002—0,25	0,10—0,29	<0,001
0—0,5	III—IV 1980 г.	2,10—13,9	<0,002—0,052	0,021—0,084	<0,001—0,01
Глубинный (20—100)		1,40—17,0	0,020—0,053	0,025—0,10	<0,001—0,036
0—0,5	XII 1980 г.	0,20—7,80 *	0,52—3,50	<0,001—0,11	0,015—0,061
Глубинный (52—100)		0,50—18,8	0,69—1,25	0,007—0,058	0,007—0,061
0—0,5	II 1981 г.	0,06—4,50	0,021—0,60	0,009—0,074	0,008—0,29
Глубинный (75—100)		0,10—4,60	0,063—0,51	0,009—0,054	0,009—0,15
0—0,5	IX 1981 г.	4,90—120	0,10—2,36	0,028—0,053	0,11—0,45
Глубинный (100)		1,40—105	0,21—0,80	0,022—0,041	0,07—0,56
0—0,5	III—IV 1982 г.	0,66—20,4	0,15—2,07	0,020—0,61	0,14—4,33
Глубинный (25—2060)		0,85—8,45	0,11—2,00	0,014—0,34	0,16—0,92
0—0,5	X—XI 1982 г.	2,15—9,20	1,25—3,40	0,100—0,37	0,12—0,63
Глубинный (22—100)		0,60—16,6	0,035—7,40	0,007—0,34	0,013—1,0

Примечание. * Максимальная концентрация 145 мкг/л, обнаруженная в декабре 1980 г., не учтена при расчете среднего значения.

ренных в водах моря, свойственна постоянная пространственно-временная изменчивость. Степень такой изменчивости оценена с помощью относительных стандартных отклонений от средних за весь период наблюдений концентраций S_r. Значения этой величины превышают данные табл. 77 и составляют для горизонтов 0—0,5 м и ~100 м соответственно: 1,40 и 1,30 (Zn), 0,80 и 0,90 (Hg), 1,50 и 1,25 (Co), 1,80 и 1,25 (Cr), поэтому степень пространственно-временной изменчивости концентраций микроэлементов достаточно велика. Вследствие этого, а также ввиду малого числа наблюдений на каждом горизонте в каждой экспедиции, средние концентрации элементов для отдельных периодов наблюдений не рассчитывались. Однако средние концентрации по данным всех экспедиций для поверхностного слоя и глубинных вод рассчитаны, так как каждый ряд наблюдений составлял около 50 значений. Хотя эти расчетные данные и нельзя считать строгими, тем не менее они в определенной мере характеризуют содержание растворенных микроэлементов в 1979—1982 гг. Соответственно для поверхностного горизонта и глубинных вод средние концентрации составляли (мкг/л): 11,6 и 10,9 (Zn), 0,63 и 0,41 (Hg), 0,16 и 0,06 (Co), 0,26 и 0,12 (Cr). По этим данным содержание цинка в западной части моря несколько выше, чем в восточной. Как видно, поверхностный горизонт был обогащен микроэлементами по сравнению с глубинными водами. В глубинных водах (2000 м и более) на станциях в центрах разрезов м. Херсонес — прол. Босфор и Ялта — Батуми концентрации большинства растворенных микроэлементов были относительно низкими, но вместе с тем также отличались определенной изменчивостью во времени. В 1979 г. концентрации на станциях 3 и 5 соответственно составили (мкг/л): 1—2 (Zn), <0,002 (Hg), <0,001 (Cr), 0,11—0,18 (Co), а в 1982 г.: 0,73—1,0 (Zn), 0,17—0,47 (Hg), 0,016—0,051 (Co), 0,16—0,24 (Cr). Можно считать, что воды Черного моря качественно отличаются от океанических вод и вод Азовского моря не только по известным гидрохимическим показателям (например, солености и др.), но и по показателям некоторых микроэлементов.

Данные о пространственно-временно́й изменчивости растворимых форм этих микроэлементов дают возможность объяснить кажущуюся несопоставимость результатов изучения микроэлементов в более ранних работах [1, 116, 124, 144, 145, 156]. Например, согласно работам [116, 144, 156], авторы находили концентрации цинка в пределах от 20 мкг/л [116] до 0,7—4 мкг/л [156]. Ртуть и кобальт в более ранних исследованиях также находили в широком диапазоне концентраций. По работе [145] поверхностный слой содержал ртути 0,4—4 мкг/л, глубинные воды — 0,27—0,8 мкг/л, по работе [124] — 0,19—0,58 мкг/л, по работе [144] и данным СО ГОИНа, полученным колориметрическим методом [80], <0,01—2,0 мкг/л. По работе [1] кобальта в водах Черного моря 1,6—4,0 мкг/л, по работе [156] — 0,2—0,9 мкг/л. Поэтому данные о содержании и распределении микроэлементов, полученные в результате единичных экспедиций, можно считать репрезентативными только для времени проведения исследования на станции. Существенное значение оказывает при этом также явление мелкомасштабной временно́й изменчивости концентраций микроэлементов.

Неравномерно распределяются в водной толще моря и взвешенные формы изучаемых микроэлементов (табл. 85). Кроме того, неравномерно распределяется также относительное содержание взвешенной формы элементов. Как видно, наиболее высокие относительные концентрации взвешенных форм всех элементов присущи прибрежным водам западной части моря. Высокие значения этих концентраций всех элементов наблюдались в глубинных водах в центре разреза м. Херсонес — прол. Босфор (глубина 2060 м), а в центре разреза Ялта — Батуми в глубинных водах наблюдались высокие относительные концентрации цинка. Очевидно, что в воде моря отсутствует физико-химическое равновесие между растворенной и нерастворенной формами элемента, что, по-видимому, может служить самостоятельным фактором, влияющим на пространственную изменчивость концентраций растворенных микроэлементов. Вероятно, концентрации взвешенных форм исследуемых элементов в воде моря имеют также про-

Таблица 85

Содержание нерастворенных (взвешенных) микроэлементов в водах моря в марте — апреле 1982 г.

Район	Горизонт, м	Концентрация микроэлементов в форме взвешенного вещества, мкг/л				Относительное содержание нерастворимой формы микроэлементов, % суммы с растворимой формой			
		цинк	ртуть	кобальт	хром	цинк	ртуть	кобальт	хром
Северо-западный	0—0,5	1,25	0,08	0,02	0,10	65	35	48	42
	25	4,34	0,03	0,01	0,04	56	21	22	18
Прибосфорский	0—0,5	1,82	0,01	0,006	0,02	8	0,4	1	0,5
	98	2,91	0,04	0,010	0,06	3	6	10	6
Центр разреза м. Херсонес — прол. Босфор	0—0,5	3,85	0,05	0,02	0,07	31	8	16	12
	2060	1,35	0,17	0,03	0,24	57	27	18	60
Южный берег Крыма	0—0,5	1,78	0,03	0,01	0,01	13	4	4	0,5
	85	1,72	0,01	0,01	0,02	32	4	15	4
Центр разреза Ялта — Батуми	0—0,5	0,36	0,001	0,004	0,001	4	0	2	0
	2028	3,00	0,002	0,004	0,010	80	1	9	5
Северо-западный	0—0,5	5,0	0,05	0,03	0,06	45	6	42	29
	25	5,1	0,15	0,03	0,20	38	7	45	30

странственно-временну́ю динамику по аналогии с концентрациями растворенных форм, как это имело место для меди, кадмия и свинца.

7.3. Некоторые статьи балансов

Систематических и статистически значимых данных для составления надежных балансов микроэлементов нет. Изучено относительно надежно две статьи баланса: поток микроэлементов из атмосферы на водную поверхность и поток микроэлементов, растворенных в водной толще, в некоторые гидробионты на примере полигона в прибрежном районе юго-запада Крыма.

7.3.1. Потоки микроэлементов из атмосферы

Водная часть полигона площадью 6—7 км² состояла из пяти гидрохимических станций. На суше в 2 м от уреза воды и на высоте 2,5 м над поверхностью моря располагался пункт непрерывного сброса атмосферных осадков. Каждая проба собиралась в течение месяца, после чего анализировалась на содержание растворимых и нерастворимых форм микроэлементов. По данным анализа установлено, что динамика плотности выпадения микроэлементов достаточно велика (табл. 86). Например, максимальное и минимальное внутригодовое варьирование плотности выпадения элементов между месяцами наблюдалось в 1981 г. для растворимых форм цинка (более 700 раз) и кобальта (10 раз). Максимальная межгодовая изменчивость плотностей выпадения элементов была характерной для малорастворимой формы железа (6,5 раза), а минимальная — для растворимой формы ртути (1,4 раза). Более высокие значения плотностей выпадений на водную поверхность и более высокие концентрации для большинства элементов (кром ртути в малорастворимых осадках) наблюдались в 1982 г. В этом же году на водную поверхность выпало большее по сравнению с 1981 г. количество осадков, малорастворимых в воде (3,6 г/м² против 2,6 г/м² в 1981 г.), но меньшее количество жидких атмосферных осадков (349 мм против 570 мм в 1981 г.).

Масса атмосферных выпадений на водную поверхность зависит в определенной степени от повторяемости направлений ветров, приносящих их на полигон. Анализ данных по динамике поступления на водную поверхность ежемесячных масс нерастворимой фракции атмосферных выпадений в зависимости от ветровых ситуаций показал, что внутригодовые распределения масс атмосферных выпадений и розы ветров, построенных по восьми румбам, варьируют в широких пределах. Методом линейной регрессии на ЭВМ М-222 были получены уравнения (1) для 1981 г. и (2) для 1982 г.,

Таблица 86

Плотность выпадения элементов на водную поверхность из атмосферы, мкг/(м² · мес)

Год	Железо		Кобальт		Цинк		Ртуть		Кадмий		Хром	
	C	$\bar{C}$	C	$\bar{C}$	C	$\bar{C}$	C	$\bar{C}$	C	$\bar{C}$	C	$\bar{C}$
	Малорастворимая форма											
1981	30—6 590	3 180	0,2—11	5,2	<6—3 250	320	0,0—13	—	не опр.	—	40—240	110
1982	1 550—34 000	20 800	3,8—17	9,2	<20—5 600	1 550	<1,5—5,0	—	<5—30	—	80—440	260
	Растворимая форма											
1981	61—4 650	740	1—13	4,5	7—5 090	780	0,4—6,5	2,2	не опр.	—	не опр.	—
1982	58—4 730	1 360	1—26	8,5	120—3 540	1 590	0,5—7,9	3,0	<10—87	32	не опр.	—

Примечание. не опр.—не определено по техническим причинам; C—интервал изменчивости плотности выпадения; $\bar{C}$—среднее значение плотности.

которые характеризуют зависимость массы малорастворимой фракции атмосферных выпадений M от повторяемости направления ветров J:

$$M = -0{,}026J_{с} + 0{,}020J_{сз} + 0{,}281; \quad (1)$$

$$M = 0{,}076J_{с} + 0{,}044J_{св} + 0{,}062J_{в} + 0{,}06J_{ю} + 0{,}107J_{з} - 5{,}108, \quad (2)$$

где M — масса малорастворимой фракции атмосферных выпадений, г; J — повторяемость направлений ветров, %; индексы: с — северное, сз — северо-западное, св — северо-восточное, в — восточное, ю — южное, з — западное направления.

Критерий Фишера для уравнений (1) и (2) 2,13 при критическом его значении 4,96 для уровня значимости 90 %. Критерий Стьюдента для того же уровня значимости 2,20, в то же время как для направлений ветров имеет следующие значения: 2,43 ($J_с$), 2,20 ($J_{св}$), 2,80 ($J_в$), 2,70 ($J_ю$), 3,00 ($J_з$), что свидетельствует о достоверности полученных уравнений. Коэффициент корреляции 0,8—0,9. Эти уравнения позволяют выявить наиболее значимые направления ветров на формирование малорастворимой массы атмосферных осадков для каждого из исследуемых годов. Учитывая географическое положение полигона, на первый взгляд, кажется неожиданным большое влияние западных и южных ветров на формирование массы малорастворимых атмосферных выпадений в 1982 г. По-видимому, отсутствие значимой доли этих направлений ветров в 1981 г. способствовало выпадению меньшей массы малорастворимой и большей массы жидкой фракций атмосферных осадков по сравнению с 1982 г. Очевидно, что формирование различий в химическом составе осадков, в том числе соотношений между растворимыми формами элементов, также зависит от повторяемости направлений ветров.

Для исследования поверхностного слоя морской воды на полигоне проведено шесть отборов проб воды из слоя 0—0,5 м, из них по одному отбору в июле, августе, октябре и три отбора в сентябре.

Вклад атмосферных выпадений рассчитан как отношение плотности выпадения форм элементов из атмосферы к плотности содержания форм элементов в воде.

Плотность содержания всех изученных элементов в поверхностном слое воды полигона значительно меняется от месяца к месяцу (табл. 87). Однако прямой зависимости между плотностями содержания элементов в воде и их выпадением из атмосферы не обнаруживается. Соотношение между поступлением элементов из атмосферы на поверхность воды и их содержанием в поверхностном слое варьируют в широких пределах. Поступление элементов в воду и их содержание в воде в ряде случаев сопоставимы, а в отдельных случаях поступление существенно превышает содержание элементов. Следовательно, на полигоне на изменчивость распределения микроэлементов в толще воды большое влияние оказывает динамика вод. Для условий поверхностного слоя воды полигона существен горизонтальный обмен поверхностных вод с водами окружающих полигон акваторий моря и с глубинными водами на самом полигоне, содержание микроэлементов в которых также динамично во времени.

В качестве примера в табл. 88 даны результаты исследования динамики средних концентраций элементов на полигоне на глубине 12—15 м. Видно, что концентрации элементов в глубинных водах не менее изменчивы, чем в поверхностных.

Таким образом, полученные данные позволяют сделать следующие выводы: поступления элементов в морскую воду прибрежных районов с атмо-

Таблица 87

Плотность содержания (*С*) в поверхностном слое воды и плотность выпадения из атмосферы на поверхность воды форм элементов в 1982 г. и доля вклада атмосферных выпадений (%) в содержание элементов в воде

Период наблюдений	Объект	Железо		Кобальт		Цинк		Кадмий		Ртуть		Хром	
		С	%	*С*	%	*С*	%	*С*	%	*С*	%	*С*	%
						Растворимая форма							
Июль	Выпадение	1 000	—	12	100	2 310	34	15	100	1	20	не опр.	—
	Вода	не опр.	—	12	100	6 800	100	15	100	5	100	7	—
Август	Выпадение	137	5	1,2	2,5	620	17	13	10	0,5	0,5	не опр.	—
	Вода	2 630	100	48	100	3 580	100	125	100	100	100	48	—
Сентябрь	Выпадение	95	1	8	2	3 550	40	<10	<5	1	1	не опр.	—
	Вода	7 190	100	430	100	8 890	100	220	100	100	100	30	—
Октябрь	Выпадение	4 330	—	7	1 400	1 700	515	12	—	1,7	9	не опр.	—
	Вода	не опр.	—	0,5	100	330	100	не опр.	—	19	100	40	—
						Малорастворимая форма							
Июль	Выпадение	34 000	80	10	280	<70	<8	не опр.	—	2,5	—	250	1 400
	Вода	43 200	100	3,6	100	850	100	не обн.	—	не обн.	—	18	100
Август	Выпадение	17 000	55	4	—	<50	<3	не опр.	—	<1,5	—	120	—
	Вода	30 700	100	не обн.	—	1 630	100	620	—	0,5	—	не обн.	—
Сентябрь	Выпадение	25 800	180	10	20	5 470	300	не опр.	—	4,6	1	210	300
	Вода	14 600	100	50	100	1 780	100	300	—	320	100	80	100
Октябрь	Выпадение	13 200	52	4	12	<35	<20	не опр.	—	<1,5	<1	270	245
	Вода	25 400	100	35	100	180	100	не опр.	—	260	100	110	100

Примечание. не обн. — не обнаружено; не опр. — не определялось.

Таблица 88

Средние концентрации растворимой (р) и малорастворимой (м) форм элементов на глубине 12—15 м, мкг/л

Период наблюдения	Железо		Кобальт		Цинк		Кадмий		Ртуть		Хром	
	р	м	р	м	р	м	р	м	р	м	р	м
28 июля	не опр.	400	0,055	0,190	13,2	0,5	0,10	1,40	0,020	0,003	0,01	0,65
17 августа	7,7	76	0,100	0,001	25,0	9,7	0,30	2,00	0,180	не обн.	0,06	0,01
16 сентября	9,5	55	0,830	0,110	20,6	10,0	0,42	2,00	0,160	0,800	0,06	0,20
23 сентября	27,7	276	0,520	0,016	8,3	2,5	0,64	0,50	0,100	0,010	0,04	0,30
30 сентября	4,5	113	0,028	0,120	3,1	25,4	0,22	не обн.	0,100	0,600	0,04	0,30
14 октября	не опр.	84	0,002	0,050	0,3	8,4	не опр.	не опр.	0,050	0,600	0,12	0,32
16 ноября	5,8	42	0,018	0,001	5,0	2,2	0,12	1,20	0,100	0,100	0,07	0,03

сферными выпадениями должны приводить к усилению временной изменчивости концентраций микроэлементов в пунктах наблюдений за уровнями концентраций; влияние динамики водных масс и динамики поступления элементов из атмосферы на поверхность прибрежных вод моря на уровень содержания элементов в пунктах наблюдения делает непредставительными результатами единичных наблюдений в одном и том же пункте, выполненных в больших временных интервалах; атмосферные выпадения микроэлементов являются значимой составляющей приходных статей баланса микроэлементов; повышенные содержания микроэлементов в поверхностном слое вод моря формируются под влиянием атмосферных выпадений. Эти выводы подтверждаются и исследованиями пяти

Таблица 89

Состав аэрозолей, мкг/м³

Дата	Хром	Железо	Кобальт	Цинк	Ртуть	Барий
29 марта	0,05	1,8	0,004	0,35	0,03	0,09
1 апреля	0,05	2,0	0,002	0,33	0,02	0,01
5 апреля	0,07	1,5	0,000	0,27	0,03	0,09
7 апреля	0,00	0,9	0,003	0,65	0,02	0,00
10 апреля	0,00	0,7	0,000	0,36	0,02	0,14

проб аэрозолей (табл. 89), отобранных 29 марта — 10 апреля 1982 г.

Если принять по работе [40], что 1 л дождевой воды, падая с высоты 1 км омывает 300 м³ воздуха, то дождевая вода должна содержать значительные концентрации микроэлементов даже при их неполном вымывании из воздуха, а при условии полного вымывания в среднем: Zn ~ 100, Hg ~ 6, Co ~ 0,6, Fe ~ 300, Cr и Ba ~ 12 мкг/л.

7.3.2. Потоки микроэлементов в гидробионты на примере Севастопольской бухты

Содержание свинца, ртути, цинка и кадмия в ряде гидробионтов Севастопольской бухты по данным Г. Г. Поликарпова, Л. Г. Кулебакиной и В. И. Егорова представлено в табл. 90 [122]. Основными продуцентами биологических взвесей являются фитопланктон и фитобентос. Первичная продукция фитопланктона в пересчете на сырую массу составляет 2500 г/м² в год с максимальным значением в период «цветения» (З. З. Финенко). Продукция водорослевых ассоциаций претерпевает меньшие изменения в течение года и процессы биосидементационного выведения металлов из воды в результате функционирования фитобентоса интенсивны постоянно. Так, по подсчетам А. А. Калугиной-Гутник средняя годовая продукция ассоциации ульвы составляет 6 000 г/м², цистозиры — 8000 г/м², энтероморфы — 1500 г/м². По оценкам К. М. Хайлова и В. Е. Ерохина 25—30 % созданного органического вещества переходит в растворенную органическую форму и служит пищей животным других трофических уровней. С учетом

Таблица 90

Содержание металлов в гидробионтах, мкг/кг

Вид	Свинец	Ртуть	Цинк	Кадмий
Водоросли				
Бриопсис	15	0,007	14	—
Ульва	4,6	0,020	8,8	0,410
Энтероморфа	6,3	0,027	11	0,350
Цистозира	5,0	0,007	10,9	0,590
Церамиум	10	0,026	14	2,93
Высшие растения				
Зостера	12	—	22	2,55
Кишечнополостные				
Гребневики	318 *	—	17	803 *
Моллюски				
Мидии (целиком)	80	—	26	2,12
Мидии (тело)	2,2	0,048	12	3,00
Рапана (раковины)	122	—	14	—
Рапана (тело)	3,6	—	10	—
Ракообразные				
Креветки	2,25	—	10	0,380
Краб травяной	26	—	50	1,15
Рыбы				
Бычки	2,2	—	2,8	0,300
Зеленуха	1,7	—	25	0,343
Камбала-калкан	0,14	0,270	0,85	—
Кефаль	1,0	—	5,6	—
Ласкирь	2,2	—	23	0,520
Ставрида	1,8	0,070	20	0,600

* В пересчете на сухую массу.

этой величины и лизиса преобразуется 50 % органического вещества. При условии заселения всей бухты указанными тремя ассоциациями фитоценозов ежегодно должно выводиться из вод бухты: свинца — 103 кг, ртути — 0,22 кг, цинка — 210 кг, кадмия — 10,3 кг. Однако на дне бухты имеются значительные участки без макрофитных биоценозов. В то же время при расчетах не учитывалось выведение металлов в результате функционирования фитопланктона. Поэтому представленные цифры являются первыми приближенными оценками.

Таким образом, потоки тяжелых металлов из вод бухты в гидробионты соизмеримы по массе с

Таблица 91

Содержание микроэлементов в растворенной и взвешенной формах в водах болгарской экономической зоны

Станция	Горизонт, м	Соленость, ‰	Мышьяк	Селен	Литий	Рубидий	Молибден	Железо	Медь	Цинк
					Разрез против Варненского залива					
					Общее содержание, мкг/л					
1	ПМС	15,64	4,378	0,045	87,70	40,01	1,80	691,3	51,72	138,55
	0	15,22	1,853	0,045	88,009	79,03	1,811	9,0	3,94	10,97
	10	16,54	1,553	0,045	83,04	37,08	1,309	22,9	1,49	7,66
	22	17,74	1,353	0,045	89,01	64,02	2,071	11,0	1,33	7,85
2	ПМС	12,29	2,022	0,301	80,24	44,56	1,176	398,6	47,74	143,16
	0	14,74	1,555	0,045	87,02	27,02	1,242	15,9	6,36	16,04
	10	16,64	1,725	0,045	79,06	74,002	1,79	30,0	7,11	15,01
	18	17,71	2,568	0,058	83,15	95,001	2,60	49,5	25,09	15,09
3	ПМС	16,60	2,233	0,301	82,5	83,33	2,03	386,5	26,11	107,36
	0	16,06	1,603	0,045	66,08	66,03	1,451	8,4	1,74	11,71
	10	16,85	1,553	0,045	77,01	77,05	1,878	8,8	2,41	9,70
	23	18,09	1,353	0,045	83,02	83,04	0,978	12,8	2,17	3,99
4	ПМС	15,95	2,455	0,243	66,39	67,19	1,58	533,3	39,46	85,34
	0	15,27	2,103	0,243	63,01	63,02	1,34	16,5	2,88	20,99
	25	18,04	1,503	0,243	61,005	61,01	1,724	16,6	4,11	11,44
	55	18,21	1,653	0,243	63,005	63,03	1,641	6,8	4,46	13,35
					Растворенная форма, % общего					
1	ПМС	15,64	71,3	88,9	99,2	98,5	96,1	1,1	27,1	41,7
	0	15,22	99,8	88,9	100,0	100,0	99,9	15,6	91,4	92,0
	10	16,54	99,8	88,9	99,95	99,8	99,3	17,9	80,5	86,2
	22	17,74	99,8	88,9	100,0	100,0	100,0	39,0	90,2	93,0
2	ПМС	12,29	84,1	86,7	99,70	98,7	96,9	2,5	50,3	49,9
	0	14,74	99,7	88,9	99,98	99,9	99,8	22,6	94,3	87,9
	10	16,64	99,7	88,9	99,92	100,0	81,0	37,0	87,2	93,9
	18	17,71	99,3	—	99,80	100,0	86,5	46,0	95,7	92,8
3	ПМС	16,60	95,4	86,7	99,4	98,4	76,4	3,8	99,1	57,2
	0	16,06	99,8	88,9	99,9	100,0	99,9	19,0	80,5	95,6
	10	16,85	99,8	88,9	100,0	99,9	99,6	18,2	91,3	88,7
	23	18,09	99,8	88,9	100,0	100,0	99,2	11,7	92,2	90,2
4	ПМС	15,95	91,6	84,4	99,4	98,2	87,3	1,2	52,7	51,2
	0	15,27	99,9	84,4	100,0	100,0	83,6	9,7	90,3	91,0
	25	18,04	99,8	84,4	100,0	100,0	99,8	12,7	87,6	60,3
	55	18,21	99,8	84,4	100,0	100,0	99,9	29,4	89,7	97,4
					Разрез против устья р. Камчии					
					Общее содержание, мкг/л					
1	ПМС	12,29	—	—	—	—	—	—	—	—
	0	14,08	1,953	—	66,02	66,03	1,211	22,5	3,49	18,93
	4	14,49	1,873	—	63,03	63,03	1,351	17,6	2,93	3,42
	8	15,97	1,783	—	80,02	80,04	1,712	—	3,73	4,29
2	ПМС	14,62	3,228	0,045	78,48	50,70	1,923	466,8	109,70	51,86
	0	13,96	1,931	0,045	76,03	79,08	1,431	26,5	1,96	3,13
	10	15,62	2,023	0,045	89,005	67,03	1,855	14,8	1,74	2,75
	21	17,64	1,557	0,045	95,06	72,01	1,923	30,3	2,12	3,41
3	ПМС	14,63	2,883	—	88,23	67,35	1,611	229,9	—	35,0
	0	14,01	2,153	—	89,03	46,07	1,642	24,3	6,85	3,20
	10	15,14	1,833	0,045	82,01	59,04	1,656	13,7	1,55	4,12
	20	17,44	1,583	0,045	95,08	71,05	1,871	10,4	1,45	2,72
4	ПМС	14,39	2,699	—	84,29	64,35	1,481	336,9	59,97	96,23
	0	13,84	1,607	—	78,02	71,05	1,141	18,1	3,36	3,38
	10	15,77	0,743	—	80,005	59,02	1,301	7,6	2,24	3,30
	27	17,74	1,109	—	90,02	71,05	1,392	20,1	0,74	5,15
					Растворенная форма, % общего					
1	ПМС	12,29	—	—	—	—	—	—	—	—
	0	14,08	99,8	—	100,0	100,0	100,0	7,1	74,4	94,0
	4	14,49	99,8	—	99,97	100,0	99,9	11,9	88,7	43,8
	8	15,97	99,8	—	100,0	100,0	99,9	—	91,2	74,6
2	ПМС	14,62	92,0	88,9	99,4	99,9	99,8	2,3	49,4	48,6
	0	13,96	99,4	88,9	99,97	99,9	99,9	4,2	66,3	57,5
	10	15,62	99,9	88,9	100,0	100,0	99,7	9,5	80,5	54,5
	21	17,64	99,6	88,9	99,9	100,0	99,8	6,9	80,2	38,1
3	ПМС	14,63	99,9	88,9	99,7	99,5	97,5	10,7	—	49,7
	0	14,01	99,9	88,9	100,0	99,8	99,9	25,5	86,1	56,3
	10	15,14	99,8	88,9	100,0	99,9	99,6	9,5	64,5	63,1
	20	17,44	99,8	88,9	99,9	99,9	99,9	7,7	34,5	77,2
4	ПМС	14,39	95,2	—	99,7	99,5	99,9	2,3	48,4	62,4
	0	13,84	99,6	—	100,0	99,9	99,9	2,8	74,4	32,5
	10	15,77	99,6	—	100,0	100,0	99,9	6,6	62,5	54,5
	27	17,74	99,2	—	100,0	99,9	99,8	30,3	54,0	52,4

содержанием этих металлов в водах бухты. Следовательно биосидементация тяжелых металлов в море является важной балансовой статьей.

7.4. Некоторые выводы и суждения

В последнее десятилетие вопросы гидрохимии широкого спектра микроэлементов интенсивно исследуются специалистами Болгарской академии наук [188, 191—194] с применением экстракционно-атомно-абсорбционного метода анализа вод и современной аппаратуры. Например, А. Стояновым, Г. Андреевым и Д. Димитровым в мае — июне 1988 г. на станциях двух разрезов с максимальным удалением от берега на 20 миль (под углом 90° против Варненского залива и против устья р. Камчии) исследовались содержания ряда микроэлементов (табл. 91).

Пробы поверхностного микрослоя (ПМС) были отобраны сеткой Гаррета [191], а с других горизонтов — полиэтиленовыми батометрами объемом 10 л. Пробы воды фильтровались под вакуумом через ядерные фильтры диаметром 47 мм и размером пор 0,45 мкм, после чего подкислялись дистиллированной концентрированной азотной кислотой. Предварительно фильтры обрабатывались 2 М соляной кислотой в течение трех недель, промывались бидистиллированной водой при нагревании. Разлагались фильтры в тефлоновых автоклавах под давлением 8 атм при температуре 150 °С в течение 2 ч в растворе 1 мл деионизированной воды и 2 мл царской водки. Для экстракции использовался метилизобутилкетон и пирролидиндитиокарбамат аммония с ацетатным буфером. Все пробы анализировались на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Перкин-Елмер» 2380, графитовой кювете ХГА-400, гидридной системе МХ-20, дейтериевый корректор.

В глубоководных районах моря Е. Пенчева и А. Стоянов [188] ранее обнаруживали железа до 72 мкг/л и бария 50—85 мкг/л. Из представленных выше и литературных [188, 191—194] данных следует, что эти данные по значениям концентраций хорошо совпадают с данными, полученными в СО ГОИНа для одних и тех же микроэлементов. Например, нами по результатам экспедиционных исследований в октябре — ноябре 1982 г. в слое вод 0—100 м было найдено растворенных форм селена в пределах 0,005—0,08 мкг/л и бария 2—21 мкг/л. Кроме того, тогда же было обнаружено содержание скандия 0,01—0,001 мкг/л, олова 0,3—3,9 мкг/л, тербия до 0,010 мкг/л и золота 0,0001—0,0010 мкг/л. Относительно серебра [198, 200] его содержание по данным атомно-абсорбционного и нейтронно-активационных методов анализа достигает 0,6 мкг/л. Сравнимые результаты с данными табл. 80 были получены нами ранее по мышьяку, который [199] определялся нами колориметрическим и нейтронно-активационным методами. Таким образом, сравнительные данные подтверждают выводы п. 7.2 о сопоставимости различных методик анализа.

Общие выводы состоят в следующем. Концентрации микроэлементов в Черном море имеют значительную пространственно-временную изменчивость. Изменчивость полей концентраций микроэлементов во времени и пространстве существенно превышает изменчивость полей концентраций других химических характеристик вод Черного моря. Поэтому оценки среднего содержания микроэлементов в море являются справедливыми только на период экспедиционного исследования. Динамика концентраций микроэлементов в море определяется динамикой водных масс, динамикой потоков поступления микроэлементов из источников (из атмосферы, например) и динамикой очищения и самоочищения вод (например, потребление гидробионтами), гидрометеорологическими условиями. Следовательно, существует сезонная изменчивость средних концентраций микроэлементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные многолетние исследования гидрохимического режима Черного моря поистине огромным отрядом исследователей, собравших более 100 000 наблюдений за показателями водной среды (главными ионами солевого состава, элементами и соединениями главного биогенного цикла, компонентами газового состава — растворенным кислородом и сероводородом, водородным показателем и др.) и систематизировавших материалы наблюдений современными математическими методами, позволили осветить целый ряд вопросов, ответы на которые ранее отсутствовали. Эти ответы относятся, прежде всего, к выводам о существовании в современный период в Черном море нестационарного состояния гидрохимического режима по солевому составу, щелочности, водородному показателю, растворенному кислороду, соединениям кремния, фосфора и азота. Нестационарность состояния заключается не только в наличии мезомасштабных процессов, протекающих в том или ином, достаточно постоянном направлении, но и в короткопериодной пространственно-временной динамике целого ряда гидрохимических характеристик.

Можно полагать, что нестационарность химического состава солевой массы черноморских вод по хлорности, кальцию, магнию, бору формируется под влиянием нескольких причин. Так, в водах поверхностного слоя моря формирование солевого состава происходит под действием изменяющихся речного и атмосферного стока и водообмена с сопредельными морями. В частности, выявлен положительный тренд речного стока и отрицательный тренд испарения воды с поверхности [5], что привело к распреснению поверхностного слоя [6]. В глубинных водах изменчивость химического состава солевой массы может формироваться водообменом с сопредельными морями, субмаринной разгрузкой вод и биохимическими процессами обмена веществ на границе вода — дно и вода — живое вещество. Кроме того, установлено, что водам моря свойственна фактическая независимость распределений солености и щелочности за исключением поверхностного горизонта в осенний сезон (коэффициент корреляции 0,54). Тенденции в изменчивости щелочности, оцененные для ряда прибрежных районов угловыми коэффициентами трендов, определяются сезонностью. Угловые

коэффициенты трендов водородного показателя на глубинах 100 м и ниже являются отрицательными для большинства исследованных районов. При этом угловые коэффициенты трендов концентраций сероводорода, солености и температуры воды имеют положительный знак.

Динамика содержания биогенных веществ подвержена макро-, мезо- и микромасштабным временным изменениям, определяемым глобальными циклоническими колебаниями интенсивности атмосферной циркуляции, внутригодовыми отклонениями гидрометеорологических параметров, существующей системой течений и, в меньшей степени, суточным ходом фитопланктона. Макромасштабная (межгодовая) изменчивость биогенных веществ в кислородной зоне проявилась в уменьшении содержания кремния в 10 раз, содержания фосфатов в 2 раза и увеличении содержания аммонийного азота в 3—4 раза. Отмеченные изменения произошли в период после зарегулирования речного стока, однако с последним они не связаны, поскольку в современный период водный сток рек, впадающих в Черное море, практически не изменился (характеризуется незначительным положительным трендом). Уменьшение концентрации кремния и фосфатов обусловлено увеличением биомассы суммарного фитопланктона в 2,9 раза (Г. П. Маштанова, цит. по [82]). Рост концентрации аммонийного азота связан с подъемом верхней границы сероводородной зоны, которая в 1977—1984 гг. залегала на глубине 75 м [101], в то время как в 1948—1965 гг.— на 100—125 м [150].

Мезомасштабная (сезонная) временная динамика для большинства исследуемых биогенных веществ показывает максимум в холодный и минимум в теплый периоды года. Однако в отдельных районах моря могут наблюдаться незначительные отклонения от общей тенденции.

В микромасштабной (суточной) временной динамике биогенных веществ выявить какой-либо закономерности не удалось.

Результаты расчета основных элементов баланса кремния, фосфатов, нитритов и общего фосфора показали, что для всех перечисленных биогенных веществ наиболее главными приходными составляющими являются их поступление с речным стоком и приток из прол. Босфор (для общего фосфора также поступление с атмосферными осадками), расходными — захоронение в донные отложения (для нитритов учесть не удалось) и отток в Босфор.

В то же время вопросы, касающиеся баланса этих биогенных веществ, требуют дальнейшей разработки и уточнения. Это относится к следующим составляющим: поступление биогенных веществ с атмосферными осадками, материалами абразии берегов и дна, а также в результате антропогенной деятельности. Необходимо оценить обмен биогенными веществами на границах водный слой — донные отложения и водный слой — грунтовые растворы.

Недостаточная гидрохимическая изученность моря не позволила к настоящему времени составить хотя бы ориентировочный баланс нитратного, аммонийного и органического азота.

В слое совместного сосуществования кислорода и сероводорода на горизонте 150 м коэффициент корреляции в период 1963—1985 гг. составил —0,7. При приближении к границам этого слоя (75—200 м) корреляция ослабляется. В слое до 200 м обнаруживается хорошая корреляционная связь между температурой воды и содержанием растворенного кислорода (коэффициент корреляции для ряда районов достигал —0,97). Сезонные изменения содержания растворенного кислорода проявляются до глубин 150 м. Для межгодовой изменчивости содержания кислорода характерно его понижение на горизонте 75 м в годы максимумов солнечной активности и повышение кислородосодержания в слое 0—50 м в эти годы. На фоне выявленной пространственно-временной изменчивости средних характеристик поля концентраций растворенного кислорода для структуры последнего свойственна немонотонность за определенные и различные периоды времени в отдельных районах моря.

Концентрации микроэлементов в Черном море имеют значительную пространственно-временную изменчивость. Изменчивость полей концентраций микроэлементов во времени и пространстве существенно превышает изменчивость полей концентраций других химических характеристик вод Черного моря. Поэтому оценки среднего содержания микроэлементов в море являются справедливыми только на период экспедиционного исследования. Динамика концентраций микроэлементов в море определяется динамикой водных масс, динамикой потоков поступления микроэлементов из источников (из атмосферы, например) и динамикой очищения и самоочищения вод (например, потребление гидробионтами), гидрометеорологическими условиями. Следовательно, существует сезонная изменчивость средних концентраций микроэлементов. Ввиду таких закономерностей распределения микроэлементов в море и наличия их биологического потребления (коэффициенты накопления свинца, например, у травяных крабов достигают 126 000 ед., кобальта у мидий — 40 000, цинка у мидий — 17 500 и у крабов — 9 230, меди у мидий — 10 000 и у крабов — 7 000) необходимы систематические («вековые») наблюдения за содержанием и распределением микроэлементов (в том числе тяжелых металлов). Очевидно, балансы микроэлементов в Черном море могут быть составлены только ориентировочные, если иметь многолетние наблюдения, или краткосрочные, справедливые для заданного периода экспедиционных исследований.

Вместе с тем и это, пожалуй, закономерно в научном познании, ответы на поставленные вопросы породили значительно большее количество новых вопросов, которые ждут своего разрешения в будущем, и поэтому задавать их авторам данного исследования — совершенно бесперспективное дело. Эти вопросы, скажут авторы книги, нужно ставить в виде новых научных программ по гидрохимическому исследованию Черного моря, которое для нашей страны имеет значение, трудно поддающееся даже примерной оценке.

По затронутым вопросам прежде всего хотелось бы отметить следующее. Несмотря на то, что в данную книгу заложено огромное количество информации по сравнению с ранее изданными монографиями и статьями по гидрохимии Черного моря, проведенные в ней исследования остро продемонстрировали фактическую скудность мате-

риалов наблюдений вследствие исключительной гидролого-гидрохимической сложности такого водного объекта, каковым является Черное море. Именно поэтому оказалось невозможным химико-океанографическое описание состояния и динамики концентраций даже наиболее изученного гидрохимического показателя — растворенного кислорода (около 50 000 наблюдений) для многих районов (квадратов) Черного моря. И именно вследствие статистической необеспеченности, разрывности и малой временной длины рядов наблюдений для многих квадратов моря его современный гидрохимический режим по многим направлениям остается мало или примерно изученным. В этом, как раз, и имеет место существенный разрыв в состояниях изученности моря по гидрологическим (температура, соленость), с одной стороны, и гидрохимическим параметрам, с другой стороны, в пользу гидрологии моря. Во-первых, массированное изучение гидрологических характеристик моря началось раньше. Во-вторых, измерению температуры и солености, в общем-то исторически, отдавалось предпочтение руководителями океанографических программ, в том числе, наверное, вследствие большей развитости методов измерения температуры и солености в экспедиционных условиях. В-третьих, «ассортимент» гидрохимических наблюдений не только существенно шире «ассортимента» гидрологических, но и более трудоемок по исполнению. Поэтому, естественно, для получения одноквалитетной информации экспедиционные суда должны иметь соответствующие гидрохимические лаборатории и штаты гидрохимических отрядов, на которые в системе Госгидромета СССР к тому же еще возлагаются задачи по определению солености в пробах морской воды. Следовательно, если необходимо знание гидрохимического режима моря на уровне современного его знания гидрологического режима, а оно, несомненно, необходимо, то для реализации соответствующих гидрохимических программ требуется в корне пересмотреть установившуюся структуру комплексных гидролого-гидрохимических программ с соответствующим материально-техническим обеспечением. Необходимость приоритетности гидрохимических исследований Черного моря на современном этапе диктуется, в частности, тем, что, как мы стали понимать сейчас, многие гидрохимические параметры более чувствительны, как индикаторы, к динамике вод по сравнению с температурой и соленостью.

К районам моря, гидрохимический режим которых наиболее изучен, в основном относятся прибрежные воды, закрепленные за сетевыми гидрохимическими лабораториями подразделений Госгидромета СССР (Дунайской устьевой станцией, Одесской морской гидрометстанцией, СО ГОИН, Ялтинской морской гидрометстанцией, Туапсинской морской гидрометстанцией, Аджарской гидрометобсерваторией). В то же время на прибрежные воды непрерывно увеличивается антропогенная нагрузка, и их естественный гидрохимический режим из года в год становится наиболее уязвим вследствие роста указанных нагрузок. Одновременно непрерывно возрастают требования к качеству прибрежных вод Черного моря в связи с проблемами сохранения его экологии и проблемами экологии человека. Именно эти проблемы формируют неотложные задачи дальнейшего массированного исследования гидрохимического режима прибрежных вод моря с учетом интенсивности антропогенных нагрузок с конечной прогностической целью для различных масштабов времени.

Одновременно необходимо усилить внимание к гидрохимическому режиму отдельных районов открытой акватории моря. Имеются в виду районы (квадраты), являющиеся, со статистической точки зрения, «белыми» пятнами, и районы, в которых выявлены однозначные тренды гидрохимических характеристик. Последнее важно и потому, что продление рядов наблюдений позволит уточнить уже приведенные в данной книге коэффициенты корреляции и значения трендов. При этом важно иметь в виду, что если в данной работе впервые применены и использованы математические методы анализа массивов наблюдений за представленными гидрохимическими параметрами благодаря наличию необходимых рядов этих наблюдений, то продление последних даст возможность применить метод множественной корреляции, еще не использовавшийся в гидрохимических исследованиях Черного моря.

Вырисовывается и еще одна, специфическая, проблема, уже не связанная непосредственно только с химическим качеством вод, это формирование качества атмосферного воздуха под влиянием изменчивости качества вод. В этой проблеме хотелось бы в первую очередь выделить задачу о динамике содержания озона в приводном слое атмосферы, источником которого служит также озон водной среды. Предварительные исследования, выполненные в СО ГОИНа, показывают наличие такого влияния, а также влияния сезонных временных характеристик. Вполне допустимо, что при решении такого рода задач могут выявиться определенные связи между динамикой химического качества вод моря, в том числе при учете условий, определяющихся динамикой солнечной активности.

Последнее замечание относится и к другим химическим особенностям вод моря, которые оказывают сильнейшее влияние на его гидрохимический режим, но не рассмотренные в данной книге. Здесь мы имеем в виду общую нестационарность химических процессов в водной толще моря, которая делает котловину Черного моря удивительнейшим природным «химическим котлом», в котором бушуют с выделением энергии в масштабах, единственных в своем роде, два типа химических реакций:

— восстановление $S^{6+} \rightarrow S^{2-}$ в анаэробной зоне при взаимодействии сульфат-ионов с органическими веществами или аммиаком и

— окисление S^{2-} растворенным кислородом. Последняя реакция изучена достаточно хорошо по сравнению с первой. Масштабы этих процессов видны уже из известных в литературе данных: образуется в море и окисляется там же ежегодно примерно $30 \cdot 10^6$ т сероводорода. К столь грандиозной массе выделяющейся энергии, следует иметь в виду, дополняется и энергия радиоактивного распада калия-40, которая в условиях глубокого моря с затрудненным водообменом с океаном (каковым является Черное море) имеет более высокое значение по сравнению с последним.

Реакции восстановления $S^{6+} \rightarrow S^{2-}$ с участием природных органических веществ в условиях

анаэробной зоны исследованы теоретически в работе [9], так как исследовать их экспериментально в условиях лаборатории весьма затруднительно по техническим причинам вследствие чрезвычайно низких значений константы скорости (не более $6{,}7 \cdot 10^{-7}$ моль/л) и средних скоростей ($5{,}9 \times \times 10^{-14}$ моль/л). Термодинамические расчеты показали, в частности, возможность протекания следующих реакций в воде в стандартных термодинамических условиях:

$$SO_4^{2-} + 2HCHO \longrightarrow H_2S + 2HCO_3^-; \quad (1)$$

$$SO_4^{2-} + CH_3COOH \longrightarrow H_2S + 2HCO_3^-; \quad (2)$$

$$3SO_4^{2-} + C_6H_{12}O_6 \longrightarrow 3H_2S + 6HCO_3^-; \quad (3)$$

$$3SO_4^{2-} + CH_3(CH_2)_3NH_2CHCOOH + 4H_2O \longrightarrow$$

$$\longrightarrow H_2S + NH_3 + 6HCO_3^- + 3H_2; \quad (4)$$

$$SO_4^{2-} + CH_4 \longrightarrow HS^- + HCO_3^- + H_2O \quad (5)$$

со значениями ΔG (кДж/моль) соответственно —22,4; —29,7; —433,0 и —22,6. Из числа представленных реакций (1), (3) и (5) являются экзотермическими. Только реакция (3) при условии ее единственности может создать тепловую мощность, равную $1{,}9 \cdot 10^{16}$ кал/год, или $8{,}1 \cdot 10^{16}$ Дж/год, что сопоставимо с радиогенным теплом вод Мирового океана от калия-40 ($5{,}8 \cdot 10^{16}$ Дж/год) по данным работы [171]. И только по этой реакции возможно ежегодное преобразование примерно 10^8 т сульфат-ионов и $6 \cdot 10^7$ т глюкозы в воде Черного моря [9]. Аналогичны рассуждения и относительно реакции (цит. по [139])

$$3SO_4^{2-} + 8NH_3 \longrightarrow 3S^{2-} + 4N_2 + 12H_2O.$$

Результаты исследований гидрохимической структуры вод 200-метрового слоя воды, выполненные в 6-м рейсе НИС «Витязь» (19 апреля — 2 июня 1984 г.) сотрудниками ИОАНа, также показали, что в указанный период времени гидрохимическая ситуация в море не отличалась от описанных выше [139].

Проблемы биогенной сульфат-редукции сероводорода также актуальны на современном этапе гидрохимического режима моря. Особенно это важно для северо-западного района. Так, например, в июле 1989 г. в первом рейсе НИС «Владимир Паршин» в западной части этого района на глубинах около 13 м в придонном слое мощностью до 1 м обнаруживалась анаэробная зона с концентрацией сероводорода до 0,6 мг/л. Вообще же проблема сероводорода в Черном море в данном издании представлена кратко по материалам работы [39], что на первый взгляд может представиться несоразмерным по значимости. Но указанную работу [139] следует рассматривать как органическое целое с представляемой работой.

Массив натурных наблюдений по распределению и содержанию сероводорода, накопленный за период 1960—1985 гг., в сочетании с современными математическими методами анализа и вычислительной техники позволил выявить ранее неизвестные статистические закономерности пространственно-временного распределения концентраций сероводорода. Эти закономерности относятся ко многим районам моря всей его толщи, а именно: верхнему слою анаэробной зоны (75—250 м), глубинным водам (2000 м и ниже) и промежуточному слою (300—1500 м). Вместе с тем выявлено и стало ясно, что ряд областей акватории анаэробной зоны оказалось невозможно описать статистически значимыми закономерностями, так как эти области в этом смысле оказались почти «белыми пятнами» из-за пробелов в экспедиционных программах. Таким образом, из анализа представленных материалов следует вывод, что для полного описания анаэробной зоны Чёрного моря необходим дополнительный массив наблюдений по более плотной сети станций за продолжительный период времени, который может быть собран только при осуществлении программы комплексных гидролого-гидрохимических экспедиций с целевым назначением (с приоритетом по сероводороду).

Другим важным вопросом являются проблема методов изучения сероводорода, к которой относятся прежде всего решения задач отбора проб воды, содержащей химически реакционноспособное и воспроизводящееся в натурных условиях вещество — сероводород.

Особенно важным является вопрос дальнейшего изучения зон постоянного подъема и заглубления вод (в том числе скоростей их перемещения), обнаруженных в процессе исследований и обработки материалов наблюдений, а также выявления таких же зон в других районах акватории.

Можно надеяться, что ввиду проведения ежемесячных систематических наблюдений за солнечной активностью вот уже около 300 лет и существования в настоящее время достаточно удовлетворительных методов прогноза солнечной активности, полученные уравнения могут быть использованы совместно с математической моделью [139] для надежного прогноза содержания и распределения сероводорода в Черном море в современных условиях, исключающих стихийные и антропогенные катаклизмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов А. А. Экосистемы пелагиали Черного моря. — М.: Наука, 1980. — 280 с.
2. Алекин О. А. Химия океана. — Л.: Гидрометеоиздат, 1966. — 210 с.
3. Алекин О. А., Ляхин Ю. И. Химия океана. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984, с. 108—113.
4. Алмазов А. М. Гидрохимия устьевых областей рек. — Киев: Изд. АН УССР, 1962. — 15 с.
5. Альтман Э. Н. Водный баланс Черного моря и антропогенное изменение солености его северо-западной части//Материалы конф. «Экология и рациональное использование природных ресурсов южного региона Украины». Ч. I. — Севастополь, 1984. — С. 9—15. Деп. ВИНИТИ 1984, № 6611—84.
6. Альтман Э. Н., Гертман И. Ф. Реакция поля солености Черного моря на изменение стока рек//Материалы конф. «Совершенствование управления развитием рекреационных систем». — Севастополь, 1985. — С. 231—246. Деп. ВИНИТИ 1985, № 7791—В85.
7. Альтман Э. Н., Кумыш Н. И. Многолетняя и внутригодовая изменчивость баланса пресных вод Черного моря//Труды ГОИН. — 1986. — Вып. 176. — С. 3—16.
8. Альтман Э. Н., Лабунская Л. С., Агарков А. К. Современный баланс пресных вод северо-западного района Черного моря//Труды ГОИН. — 1978. — Вып. 145. — С. 3—15.
9. Афанасьев Ю. А., Рябинин А. И. Исследование термодинамики и кинетики химических процессов сульфат-редукции в анаэробной зоне Черного моря//Труды ГОИН. — 1988. — Вып. 189. — С. 158—168.

10. Афонина А. А., Ермакова Л. Ф., Рябинин А. И. Поле растворенного кислорода в слое вод Черного моря 50—200 м (1965—1979 гг.)//Метеорология и гидрология.— 1984.— № 2.— С. 107—110.
11. Ациховская Ж. М. Интенсивность обмена вод как фактор оценки возможности нагрузки сточными водами северо-западной части Черного моря//Биология моря.— 1977.— Вып. 41.— С. 8—12.
12. Бабинец А. Е., Митропольский А. Ю. и др. Деякі дані про вмісі та розподіл нікелю і міді в воді Чорного моря//Доповіді АН УРСР.— 1975.— Сер. Б, 4.— С. 291—293.
13. Батурин Г. Н. Фосфориты на дне океанов.— М.: Наука, 1978.— 232 с.
14. Беляев Л. И. О распространении и содержании микроэлементов группы тяжелых металлов в черноморской воде (1959—1964 гг.)//Труды МГИ АН УССР.— 1966.— Т. 37.— С. 120.
15. Беляев Л. И. Ускоренный метод упрощенного определения содержания микроэлементов в поверхностных черноморских водах//Труды МГИ АН УССР.— 1969.— Т. 42.— 200 с.
16. Беляев Л. И. К балансу кислорода и сероводорода в водах Черного моря//Труды МГИ АН УССР.— 1971.— Вып. 4.— С. 195—203.
17. Беляев В. И., Давыдова Е. П., Совга Е. Е. Оценка вклада различных факторов в кислородный баланс северо-западного шельфа Черного моря по результатам моделирования//Комплексные исследования Черного моря.— Севастополь, 1984.— С. 63—70.
18. Беляев В. И., Жаров Н. А., Давыдова Е. П. Расчет годового хода компонент экосистемы шельфа// Системный анализ и моделирование процессов на шельфе Черного моря.— Севастополь, 1983.— С. 29—36.
19. Беляев В. И., Совга Е. Е., Жоров В. А., Давыдова Е. П. Антропогенное изменение кислородного режима северо-западного шельфа Черного моря//Природная среда и биологические ресурсы морей и океанов.— Л., 1984.— С. 58—59.
20. Блатов А. С., Бумаков Н. П., Иванов В. А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря.— Л.: Гидрометеоиздат, 1984.— С. 89—127.
21. Богданова А. К. К вопросу о вертикальном распределении кислорода в Черном море//Труды СБС АН СССР.— 1959.— Т. 11.— С. 297—316.
22. Богоявленский А. Н. Распределение и миграция растворенной кремнекислоты в океанах//Геохимия кремнезема.— М., 1966.— С. 11—36.
23. Богоявленский А. Н. Воспроизводимость результатов и ошибки гидрохимических определений в океанах. Сообщение V. Определение pH и расчеты углекислотной системы//Исследования по химии моря.— 1973.— Т. 63.— С. 218.
24. Богуславский С. Г., Жоров В. А. О проблемах сероводородной зоны Черного моря//Морской гидрофизический журнал.— 1985.— № 1.— С. 54.
25. Богуславский С. Г., Ефимов В. В., Черкасов Л. В. Комплексные океанографические исследования Черного моря.— Киев: Наукова думка, 1980.— 183 с.
26. Богуславский С. Г., Жоров В. А., Новоселов А. А. О проблемах сероводородной зоны Черного моря//Морской гидрофизический журнал.— 1985.— № 1.— С. 54—58.
27. Бородовский О. К. Химия океана. Т. 1.— М.: Наука, 1979.— 94 с.
28. Бруевич С. В. Химия и биологическая продуктивность Черного моря//Труды ИО АН СССР.— 1953.— Т. 7.— С. 11—56.
29. Бруевич С. В. К геохимии кремния в море//Изв. АН СССР, сер. геолог.— 1953.— № 4.— С. 67—79.
30. Бруевич С. В. О современных основах электрометрического и колориметрического определения pH в морских водах//Труды ИО АН СССР.— 1961.— Т. 47.
31. Бруевич С. В. Проблемы химии моря.— М.: Наука, 1978.— 64 с.
32. Бряпцев В. А., Фащук Д. Я. Причины черноморских заморов и возможность их предотвращения//Вопросы промысл. океанолог. Мирового океана. Тез. докл. V Всесоюзн. конф. (25—29.10.1979 г.).— Калининград, 1979.— С. 23—25.
33. Бусленко И. П., Горленко Д. И., Соболь И. М. и др. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло).— М.: Физматгиз, 1962.— 331 с.
34. Вернадский В. И. Биологические очерки.— М.-Л.: Изд. АН СССР, 1940.
35. Виноберг Г. Г. Первичная продукция водоемов.— Минск: Изд. АН БССР, 1960.
36. Виноградов А. П. Химический элементарный состав организмов моря//Труды Биогеохим. лаб. АН СССР.— 1935, 1938, 1944.— Т. I, II, III, № 3, 4, 6.
37. Виноградов А. П. Введение в геохимию океана.— М.: Наука, 1967.— 215 с.
38. Виноградова З. А., Еремина Н. З., Коган Г. М. О вертикальном распределении микроэлементов, растворенных в воде Черного моря//ДАН СССР.— 1972.— Т. 204, № 3.— С. 704—706.
39. Владимирцев Ю. А. О гидрологических условиях образования дефицита кислорода в северо-западной части Черного моря//Водные ресурсы.— 1983.— Вып. 2.— С. 95—99.
40. Войткевич Г. В., Закруткин В. В. Основы геохимии.— М.: Высшая школа, 1976.
41. Гершанович Д. Е., Муромцев А. М. Океанологические основы биологической продуктивности Мирового океана.— Л.: Гидрометеоиздат, 1982.— С. 158—207.
42. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР. Т. 4. Черное море.— Л.: Гидрометеоиздат, 1986.— С. 1—98.
43. Глебович Т. А. Бор в море//Труды Биогеохим. лаб АН СССР.— 1946.— Т. 8.
44. Гололобов Я. К. К познанию возраста современной стадии Черного моря//ДАН СССР.— 1949.— Т. 66, № 3.— С. 451—455.
45. Гололобов Я. К. О биогенных элементах в воде Черного моря и причинах изменений некоторых средних гидрохимических величин в трофическом слое водной толщи моря//Труды АзЧерНИРО.— 1955.— Вып. 16.— С. 3—24.
46. Гололобов Я. К., Пирогова М. В. Верхняя граница сероводородной зоны в восточной части Черного моря//ДАН СССР.— 1948.— Т. 63, № 8.
47. Гололобов Я. К., Новицкий В. Л., Ледовский М. С. и др. Пространственное распределение растворенного кислорода, сероводорода и щелочности в Черном море//Труды АзЧерНИРО.— 1968.— Вып. 27.— С. 48—50.
48. Гончаров В. П., Емельянова Л. П., Михайлов О. В., Цыплев Ю. И. Площади и объемы Средиземного и Черного морей//Океанология.— 1965.— Т. 5, вып. 6.— С. 987—998.
49. Горбенко Ю. А., Крымев Н. Н. Статистический анализ динамики морской экосистемы микроорганизмов.— Киев: Наукова думка, 1985.— 142 с.
50. Грезе В. Н. Основы биологической продуктивности Черного моря.— Киев: Наукова думка, 1979.— 390 с.
51. Губанов В. И. Некоторые возмущения в установившемся гидрохимическом режиме юго-западной части Черного моря//Труды II Всесоюз. съезда океанол.— 1982.— Вып. 3, ч. 2.— С. 13—14.
52. Губанов В. И. Роль массообмена через Босфор в очищении вод Черного моря от нефтяных углеводородов и детергентов//Материалы конф. «Экология и рациональное использование природных ресурсов южного региона Украины».— Севастополь, 1984.— С. 32—34. Деп. в ВИНИТИ 08.10.84, № 6611—84.
53. Губанов В. И. Гидрохимия Эгейского и юго-западной части Черного морей с учетом процессов загрязнения и массообмена между ними. Автореф. дис. ... канд. географ. наук.— Ростов-на-Дону, 1985.— 24 с.
54. Губанов В. И., Рябинин А. И. Современный гидрохимический режим Эгейского моря.— М.: Гидрометеоиздат, 1988.— 174 с.
55. Данилевский Н. Н., Иванов Л. С., Каутиш И., Вериоти-Маринеску Ф. Промысловые ресурсы// Основы биологической продуктивности Черного моря.— Киев, 1979.— С. 291—299.
56. Даниленко А. Ф., Рябинин А. И. Сульфаты в водах Черного моря//Океанология.— 1986.— Т. 26, вып. 6.— С. 938—946.
57. Данильченко П. Т., Чигирин Н. И. К вопросу о происхождении сероводорода в Черном море//Труды Особой зоол. лаб. и СБС.— 1925.— Сер. II, № 10.— С. 141—191.
58. Данильченко П. Т., Чигирин Н. И. К вопросу о происхождении сероводорода в Черном море//Труды СБС АН СССР.— 1926.— Сер. II, № 10.— С. 141—187.
59. Данильченко П. Т., Чигирин Н. И. Материалы по химии Черного моря. Т. 1. Азот и его соединения// Труды Крым. научно-исслед. ин-та.— 1929.— Т. 2, вып. 2.

60. Дацко В. Г. Некоторые химические показатели продуктивности Черного моря//Труды ВНИРО. — 1954. — Вып. 28. — С. 188—202.
61. Дацко В. Г. Органическое вещество в водах южных морей. — М.: Изд. АН СССР, 1959.
62. Денисов П. В. Методика для оценки тенденции в ходе речного стока//Метеорология и гидрология. — 1975. — № 4. — С. 101—104.
63. Добржанская М. А. Распределение щелочности в северо-западной части Черного моря//Труды СБС АН СССР. — 1948. — Т. 4. — С. 378.
64. Добржанская М. А. О распределении кремния в Черном море//Труды СБС АН СССР. — 1948. — Т. 6. — С. 372—377.
65. Добржанская М. А. К вопросу о распределении бора в морях//Труды СБС АН СССР. — 1949. — Т. 10.— С. 242—248.
66. Добржанская М. А. Режим фосфатов и нитратов в Черном море//Докл. на совещ. по вопросам изученности и перспективного использования сырьевых ресурсов Черного моря. — Керчь, 1953.
67. Добржанская М. А. О нитратах в Черном море// ДАН СССР. — 1954. — Т. 99, № 1.
68. Добржанская М. А. Основные черты распределения и динамики фосфатов в Черном море//Труды СБС АН СССР. — 1958. — Т. 10. — С. 195—277.
69. Добржанская М. А. Характер вертикального распределения кислорода в зависимости от времени года в верхней 100-метровой толще центральной части Черного моря//Труды СБС АН СССР. — 1959. — Т. 11. — С. 284—296.
70. Добржанская М. А. Основные черты гидрохимического режима Черного моря//Труды СБС АН СССР. — 1960. — Т. 13. — С. 325—378.
71. Добржанская М. А. Содержание и распределение нитритов в Черном море//Труды СБС АН СССР. — 1963. — Т. 16.
72. Добржанская М. А. Закономерности пространственного распределения кислорода на различных глубинах Черного моря.— Киев: Наукова думка, 1967.—С. 154—169.
73. Добржанская М. А. Распределение кислорода и фосфатов в прибосфорском районе Черного моря//Водообмен через Босфор и его влияние на гидрологию и биологию Черного моря. — Киев, 1969. — С. 122—158.
74. Добржанская М. А. Гидрохимические наблюдения в Эгейском море//Экспедиционные исследования в Средиземном море в сентябре — октябре 1970.— Киев, 1973.— С. 27—44.
75. Добржанская М. А. К вопросу о влиянии средиземноморских вод на гидрохимический режим прибосфорского района Черного моря//Экспедиционные исследования в Средиземном море в сентябре — октябре 1970 г. — Киев, 1973. — С. 45—53.
76. Еременко В. Я. К методике установления форм нахождения тяжелых металлов в природных водах//Гидрохимические материалы. — 1966. — Т. 41. — С. 153—158.
77. Ермакова Л. Ф. Режим элементов главного биогенного цикла в Азовском -море (1967—1973 гг.)//Труды ГОИН. — 1981. — Вып. 153. — С. 57—68.
78. Ермакова Л. Я. Сезонные изменения поля растворенного кислорода в Черном море (1963—1979 гг.)//Труды ГОИН. — 1986. — Вып. 176. — С. 85—97.
79. Жаворонкина Т. К. Применение спектрографического метода определения микроэлементов в морской воде//Труды МГИ АН СССР. — 1960. — Т. 19. — С. 38—41.
80. Жидкова Л. Б., Романов А. С., Постернак Л. М. Колориметрический метод определения ртути в морской воде, морских взвесях, биообразцах и грунтах//Методики анализа морских вод: Сборник трудов советско-болгарского сотрудничества. — М., 1981. — С. 102—105.
81. Жоров В. А. Структура полей распределения кислорода в Черном море в летний период//Гидрохимические материалы. — 1984. — Т. 60. — С. 27—37.
82. Жоров В. А., Богуславский С. Г. Тенденции некоторых гидролого-гидрохимических процессов Черного моря//Метеорология и гидрология. — 1985. — № 11. — С. 63—69.
83. Жоров В. А., Богуславский С. Г., Абакумова Т. Н. Свободная углекислота в Черном море в период нагрева вод//Океанология.— 1981.— Т. 21, вып. 3.— С. 456.
84. Жоров В. А., Совга Е. Е., Абакумова Т. Н. Геохимические особенности распределения CO_2 в поверхностных водах некоторых районов Черного моря//Геохимия. — 1979. — Т. 9. — С. 1392.
85. Жоров В. А., Богуславский С. Г., Паненко М. В. Гидрохимия вод и физико-химические процессы в Черном море//Гидрохимические и геофизические исследования в Черном море.— Севастополь, 1984.— С. 35—41.
86. Жоров В. А., Богуславский С. Г., Богатко О. А. и др. Распределение некоторых гидрохимических элементов Черного моря. — Севаст. поль. МГИ АН УССР, 1985. — С. 8—82. Деп. в ВИНИТИ 05.07.84, № 2747.
87. Зайцев Ю. П., Гаркавая Г. П., Нестерова Д. А., Цокур А. Г. Современное состояние экосистемы Черного моря. — М.: Наука, 1987. — С. 216—230.
88. Зеленов К. К. Причины сероводородного заражения вод Черного моря//Новое в современной литологии: Материалы научных заседаний секции осадочных пород МОИП. — М., 1981. — С. 46.
89. Земляной В. М. Гидрометеорологическое районирование Черного моря//Труды УкрНИГМИ. — 1963. — Вып. 38. — С. 34—36.
90. Иваненков В. Н. Защита металлических батометров от коррозии и качество результатов химических определений в сероводородной зоне Черного моря//Морские гидрофизические исследования. — 1975. — № 1(68). — С. 182—191.
91. Иваненков В. Н. Способ оценки продукции кислорода по его суточному балансу в слое фотосинтеза// Гидрохимические процессы в океане. — М., 1985. — С. 111—120.
92. Иванов А. И. Изменение водных экосистем (по фитопланктону) устьевых областей рек и лиманов северо-западной части Черного моря под влиянием хозяйственной деятельности (на примере водохозяйственного комплекса Дунай — Днепр)//Водные ресурсы. — 1987. — Вып. 4. — С. 41—52.
93. Кизиветтер И. В. Биохимия сырья водного происхождения. — М.: Пищевая промышленность, 1973.
94. Книпович Н. М. Гидрологические исследования в Черном море//Труды Азово-Черноморск. научн.-промысл. экспедиции. — 1932. — Вып. 10. — 272 с.
95. Коган Г. М. Определение некоторых микроэлементов в воде Черного моря//Вопросы биоокеанографии. — Киев, 1967.
96. Колотов С. О составе соляной массы Черного моря// Ж. Русского физ.-хим. об-ва. — 1892. — Т. 24, № 23. — С. 77—89.
97. Кондратьева Т. Н., Белогорская Е. В. Распределение фитопланктона в Черном море//Труды СБС. — 1961.— Т. 14. — С. 45—63.
98. Коновалов С. К., Рябинин А. И. Водородный показатель (pH) вод Черного моря в 1985—1986 гг.// Метеорология и гидрология. — 1987. — № 10. — С. 75—81.
99. Коркоран Е. Ф. Распределение меди и железа в Черном море//Тезисы 2-го Международного океанографического конгресса. — М., 1966.
100. Кори Г., Кори Т. Справочник по математике. — М.: Наука, 1968. — 622 с.
101. Кравец В. Н. Многолетняя изменчивость сероводорода в воде Черного моря и скорость его накопления в годы с максимальной солнечной активностью//Материалы конф. «Экология и рациональное использование природных ресурсов южного региона Украины». — Севастополь, 1984. Деп. в ВИНИТИ, № 6611-84.
102. Кравец В. Н. К вопросу о динамике верхней границы сероводородной зоны Черного моря//Совершенствование управления развитием рекреационных систем. — Севастополь, 1985. — Т. 2. — С. 336—351. Деп. 1985. № 7791-В.
103. Кретович В. Л. Биохимия растений. — М.: Высшая школа, 1980. — 268 с.
104. Лазарева Е. А. Оперативная методика для контроля содержания бора в морских водах//Труды ГОИН. — 1975. — Вып. 127. — С. 95—99.
105. Лазарева Е. А. Пространственно-временная динамика концентраций меди, свинца и кадмия в заливе с затрудненным водообменом с открытыми водами Черного моря//Материалы конф. «Экология и рациональное использование природных ресурсов южного региона Украины».— Севастополь, 1984. — С. 108—113.
106. Лебединцев А. А. Предварительный отчет о химических исследованиях Черного и Азовского морей летом 1891 г.//Записки Новороссийского общества естествоиспытателей. — 1892. — Т. 16, вып. 2.

107. Лисицын А. П., Беляев Ю. И., Богданов Ю. А., Богоявленский А. Н. Закономерности распределения и формы кремния, взвешенного в водах Мирового океана//Геохимия кремнезема. — М., 1966. — С. 37—89.
108. Лупачев Ю. В. Методика расчета теплового влияния речного стока на термический режим вод моря//Труды ГОИН. — 1980. — Вып. 159. — С. 3—9.
109. Любимова Е. М. Вертикальное распределение органического фосфора в воде Черного моря//Труды МГИ АН СССР. — 1959. — Т. 16. — С. 127—145.
110. Львовский Е. Н. Статистические матрицы построения эмпирических формул.— М.: Высшая школа, 1982.— 45 с.
111. Ляхин Ю. И. К вопросу о газовом обмене между океаном и атмосферой//Гидрохимические процессы в океане. — М., 1985. — С. 66—75.
112. Малюга Д. П. К содержанию меди, никеля, кобальта и других элементов семейства железа в природных водах//ДАН СССР. — 1945. — Т. 48. — С. 119—124.
113. Маньковская Л. И., Даниленко А. Ф. Результаты определения сульфатов, щелочности и щелочно-земельных элементов (Ca^{2+} и Mg^{2+}) в водах глубинной части Черного моря//Гидрофизические и гидрохимические исследования. — 1969. — Т. 42. — С. 195—214.
114. Методические указания № 30. — М.: Гидрометеоиздат, 1966.
115. Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И. Геохимия Черного моря. — Киев: Наукова думка, 1982. — 144 с.
116. Морозов Н. П., Патин С. А., Никоненко Е. М. Микроэлементы в воде, взвесях и гидробионтах Черного моря//Геохимия. — 1976. — № 9. — С. 1391.
117. Морозова-Водяницкая Н. В. Некоторые результаты количественных исследований фитопланктона в Черном море//Труды Новоросс. биол. стащии. — 1940. — Т. 2, вып. 3.
118. Никольский Б. П., Гортиков В. М. Значение pH для анализа природных вод//Физико-химические методы химического анализа. Вып. 2. — Л., 1935.
119. Океанографические таблицы. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — С. 21.
120. Оль А. И. Каталог индексов солнечной и геомагнитной активности. — Обнинск: ВНИИГМИ — МЦД, 1979. — С. 155—158.
121. Пановский Г. А., Брайер Г. В. Статистические методы в метеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1972.— 209 с.
122. Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Кулебакина Л. Г. и др. Роль биологического фактора в самоочищении Севастопольской бухты от тяжелых металлов// Тезисы научно-практической конференции «Состояние, перспективы улучшения и использования морской экологической системы прибрежной части Крыма». — Севастополь, 1983. — С. 22—24.
123. Полосин А. С. Динамика перемешанного слоя северо-западной части Черного моря в осенний сезон//Материалы симпозиума по изученности Черного и Средиземного морей, использованию и охране их ресурсов. — Киев, 1973. — С. 98.
124. Радиохимэкология Черного моря/Под ред. Г. Г. Поликарпова. — Киев: Наукова думка, 1977.— 232 с.
125. Руководство по морским гидрохимическим исследованиям/Под ред. Л. К. Блинова. — М.: Гидрометеоиздат, 1959. — 251 с.
126. Руководство по методам анализа морских вод. — Л.: Гидрометеоиздат, 1977. — С. 9—26.
127. Рождественский А. В. Какви течения има пред българския бряг//Рибно стоп. — 1958. — № 2/3. — С. 7—10.
128. Рождественский А. В. Сравнителни данни за ионния състав на водата и някои други гидрохимични показатели в Черно, Мраморно и Средиземно море//Изв. НИИ рыбов. и рыбол. (Варна). — 1964. — № 4. — С. 105—124.
129. Рождественский А. В. Хидрохимична характеристика на Средиземноморска вода пред декември 1963 г.// Изв. НИИ рибно стоп. и океаногр. (Варна). — 1965. — № 6. — С. 145—150.
130. Рождественский А. В. Върху биогените елементи в северо-западната част на Черно море//Изв. НИИ рибно стоп. и океаногр. (Варна). — 1968. — № 9. — С. 9—15.
131. Рождественский А. В. Поступление мраморноморской воды на Черное море и черноморский водно-солевой баланс//Изв. НИИ рибно стоп. и океаногр. (Варна). — 1971. — № 11. — С. 5—32.
132. Рождественский А. В. Химические основы продуктивности//Основы биологической продуктивности Черного моря.— Киев, 1979. — С. 34—62.
133. Рождественский А. В., Стоянов А. С., Симеонов В. А., Андреев Г. А. Потенциометрическое определение фтора в морской воде//Методики анализа морских вод: Труды советско-болгарского сотрудничества. — Л., 1981. — С. 99—101.
134. Рыженко Б. Н., Хитаров Н. И. К вопросу о форме кремнезема в водных растворах//Геохимия. — 1968. — № 8. — С. 1120—1270.
135. Рябинин А. И. Перспективы применения метода рентгенорадиометрического анализа (РРА) в неорганической химии морских вод и контроле их качества//Тезисы докладов. III Всесоюзное совещание «Ядерно-физические методы анализа в контроле окружающей среды». — Томск, 1985. — С. 101—102.
136. Рябинин А. И., Еркушов Ю. А. Гидрохимия бора в северо-западной части Черного моря//Труды ГОИН. — 1981. — Вып. 158. — С. 77—82.
137. Рябинин А. И., Кравец В. Н. Сероводород в водах Черного моря (1976—1978 гг.) и математическое моделирование его распределения//Океанология. — 1980. — Т. 20, вып. 3. — С. 468—476.
138. Рябинин А. И., Кравец В. Н. Статистическое описание закономерностей распределения сероводорода в Черном море//Метеорология и гидрология. — 1982. — № 7. — С. 65—70.
139. Рябинин А. И., Кравец В. Н. Современное состояние сероводородной зоны Черного моря. — М.: Гидрометеоиздат, 1989.
140. Рябинин А. И., Лазарева Е. А. Мониторинг меди в водах Черного моря//Мониторинг фонового загрязнения природной среды. Вып. 1. — Л., 1982. — С. 165—174.
141. Рябинин А. И., Лазарева Е. А. Исследование геохимических полей меди, свинца и кадмия в водах Черного моря в слое 0—100 м//Геохимия. — 1984. — № 2. — С. 254—261.
142. Рябинин А. И., Коновалов С. К., Даниленко А. Ф. К вопросам о солености и распределении ионов кальция и магния в водах Черного моря//Геохимия. — 1987. — № 2. — С. 320.
143. Салтыкова Л. В., Рябинин А. И., Мартемьянов И. Н. Нейтронно-активационный и рентгенорадиометрический анализ аэрозолей прибрежных районов Черного моря//Труды ГОИН. — 1981. — Вып. 153. — С. 112.
144. Салтыкова Л. В., Лазарева Е. А., Жариков В. Ф., Гейдаров Ф. А. Содержание переходных элементов в некоторых морях//Труды ГОИН. — 1979. — Вып. 149. — С. 32—36.
145. Сауков А. А., Айдинян Н. Х., Озерова Н. А. Очерки геохимии ртути. — М.: Наука, 1972.
146. Селин П. Ю. Гидрохимические особенности гипоксийно-аноксийных зон на северо-западном шельфе Черного моря. — М., ГОИН, 1987. — 34 с. Деп. в ВИНИТИ 14.01.88 г., № 298—В88.
147. Селин П. Ю., Айзатулин Т. А. Идентификация формально-кинетической модели окисления сероводорода в морских водах и ее использование для полного расчета химической и биохимической динамики верхней границы сероводородных зон. — М., ГОИН, 1987. — 44 с. Деп. в ВИНИТИ 31.08.87 г., № 6377—В87.
148. Селин П. Ю., Айзатулин Т. А., Леонов А. В., Фащук Д. Я. Химическая динамика сероводородной зоны на северо-западном шельфе Черного моря//Водные ресурсы. — 1988. — № 4. — С. 144—153.
149. Скопинцев Б. А. Среднее пребывание некоторых элементов в воде Черного моря//Океанология. — 1973. — Т. 13, вып. 6. — С. 1015—1019.
150. Скопинцев Б. А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 336 с.
151. Скопинцев Б. А. Некоторые результаты гидрохимических исследований в Черном море в 1982 и 1983 гг.// Труды МГИ АН УССР. — 1985. — Т. 5. — С. 71—98.
152. Скопинцев Б. А., Губин Ф. А. Некоторые результаты гидрохимических исследований в Черном море в 1952 и 1953 гг.//Труды МГИ АН СССР. — 1955.— Т. 5.— С. 71—98.
153. Скопинцев Б. А., Карпов А. В. Органический фосфор в водах Атлантического океана, Средиземного и Черного морей//Химические процессы в морях и океанах. — М., 1966.
154. Скопинцев Б. А., Ледовский М. С. Растворенный кислород в воде Черного моря в 1959—1960 гг.// Океанология. — 1963. — Т. 3, вып. 6. — С. 63—69.

155. Скопинцев Б. А., Максимова М. П. Свободная углекислота и отдельные формы сернистых соединений в воде Черного моря//Труды МГИ АН УССР. — 1983. — Т. 38.
156. Скопинцев Б. А., Попова Т. П. Некоторые результаты определения Fe, Mn, Cu в воде Черного моря// Труды МГИ АН СССР. — 1964. — Т. 19.
157. Скопинцев Б. А., Тимофеева С. Н. Органический углерод в водах северной части Черного моря//ДАН СССР. — 1960. — Т. 134, № 3.
158. Скопинцев Б. А., Губин Ф. А., Воробьева Р. В., Вершинина О. А. Содержание главных компонентов солевого состава в воде Черного моря и некоторые вопросы обмена вод//Труды МГИ АН СССР. — 1958. — Т. 13. — С. 89—112.
159. Скопинцев Б. А., Тимофеева С. Н., Даниленко А. Ф., Соколова М. В. Органический углерод, азот, фосфор и их минеральные производные в воде Черного моря//Океанология. — 1967. — Т. 7, вып. 3. — С. 457—469.
160. Соломин Г. А. Ионные равновесия железа в природных водах//Гидрохимические материалы. — 1967. — Т. 43. — С. 37—51.
161. Сорокин Ю. Н. Черное море. — М.: Наука, 1982. — 216 с.
162. Справочник по климату Черного моря./Под ред. Соркиной А. И. — М.: Гидрометеоиздат, 1974. — 406 с.
163. Строение западной части Черноморской впадины. — М.: Наука, 1972. — 243 с.
164. Таблицы растворимости кислорода в морской воде. — Л.: Гидрометеоиздат, 1976. — 165 с.
165. Тиховская З. П. Некоторые данные о величине pH в тканях водорослей Черного моря//Труды СБС АН СССР. — 1932. — Т. 3.
166. Тихонов М. К., Жаворонкина В. К. Полярографический метод определения меди в морской воде// Труды МГИ АН СССР. — 1960. — Т. 19. — С. 120.
167. Толмазин Д. М. Гидролого-гидрохимическая структура вод в районах гипоксии и заморов северо-западной части Черного моря//Биология моря.— 1977.— Вып. 43.— С. 12—16.
168. Толмазин Д. М., Шнайдман В. А., Ациховская Ж. М. Проблемы динамики вод северо-западной части Черного моря. — Киев: Наукова думка, 1969. — 130 с.
169. Уркова Н. В. Объективный анализ гидрометеорологических полей с использованием методов статистических испытаний: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. — Севастополь, МГИ АН УССР, 1979. — 159 с.
170. Успенский В. А. Введение в геохимию нефти. — М.: Наука, 1970.
171. Филиппов Е. М., Рябинин А. И., Кравец В. Н. Радиометрическое определение калия-40 в морских и океанических водах. — М., 1980. — 41 с. Деп. в ВИНИТИ 26.08.80, № 3878-80.
172. Харнед Т., Оуэн Б. Физическая химия растворов. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1952.
173. Хорн Р. Морская химия. — М.: Мир, 1972. — 399 с.
174. Чигирин Н. И. Концентрация водородных ионов в Черном море//ДАН СССР. — 1927. — № 18.
175. Чигирин Н. И. Фосфор в воде Черного моря//Труды СБС АН СССР. — 1930. — Т. II.
176. Чигирин Н. И. Концентрация водородных ионов, щелочность и свободная углекислота в Черном море//Труды II Всесоюзного гидрологического съезда. Ч. III. — Л., 1930.
177. Чигирин Н. И., Данильченко П. Т. Азот и его соединения в Черном море//Труды СБС АН СССР. — 1930. — Т. 2.
178. Шишкина О. В. Методика определения сульфат-иона в морской воде//Труды ИО АН СССР. — 1954. — Т. 8. — С. 253—268.
179. Шишкина О. В. Иловые воды//Геологическая история Черного моря по результатам глубоководного бурения. — М., 1980. — С. 118.
180. Шульгина Е. Ф. О биохимическом потреблении кислорода и процессах нитрификации в районах, загрязненных бытовыми сточными водами//Процессы перемешивания и водообмена в Черном море и их влияние на биологическую продуктивность. — Киев: Наукова думка, 1972. — С. 124—131.
181. Шульгина Е. Ф. Распределение кислорода в Черном море//Комплексные гидрофизические и гидрохимические исследования Черного моря. — Севастополь, 1980. — С. 97—111.
182. Шульгина Е. Ф., Куракова Л. В., Куфтаркова Е. А. Распад нестойкого органического вещества и его зависимость от внешних физико-химических показателей//Химизм вод шельфовой зоны Черного моря при антропогенном воздействии. — Киев, 1978. — С. 17—27.
183. Beers J. R. Studies on the chemical composition of the major zooplancton groups in the Sargasso Sea off Bermuda//Limnol. Oceanogr. — 1966. — N 4. — 11 p.
184. Culberson C., Pytkowicz R. Effect of pressure on carbonic acid, boric and pH in seawater//Limnol. Oceanogr. — 1968. — Vol. 13, N. 3. — P. 403—407.
185. Fonselius S. H. Phosphorus in Black Sea//Black Sea, geol., chem. and biol. — Tulsa, Oklahoma, 1974. — P. 144—150.
186. King E. L., Davidson Viola. The biochemistry of silica acid. IV Relation of Silica to the growth of phytoplankton//Biochem. J. — 1933. — Vol. 27.
187. Kremling Klaus. Relation between chlorinity and conductometric salinity in Black Sea water//Black Sea, geol., chem. and biol. — Tulsa, Oklahoma, 1974. — P. 151—154.
188. Пенчева Е., Стоянов А. За динамиката на металния микросъстав на откритите черноморски води//Инженерна геология и хидрогеология. — 1982. — Т. 12. — С. 41—55.
189. Rojdestvensky A. V. Chemischer und Schwebstoffabluss der Donau in Schwarzen Meer//Limnol. Ber. 10 Jubilaumatagung des Arbeitsgemeinsch. — Donauforschung, 1968. — S. 93—102.
190. Spenser D. W., Brewer P. Q. Vertical advaction diffusion and redox potentials as controls on the distribution of manganese and other trace metals dissolved in waters of Black Sea//J. Geoph. Res. — 1971. — Vol. 76, N 24.
191. Стоянов А. Върху някои резултати от хидрохимични изследвания на граничния слой море — атмосфера в крайбрежния район Варна — Камчия//Океанология.— 1979.— Т. 4. — С. 22—29.
192. Стоянов А., Шерева Г. Промени на pH, амонячния азот и флуоридите в югозападната част на Варненския залив по време на цъфтеж на фитопланктона през юни 1979 г.//Океанология. — 1981. — Т. 8. — С. 40—46.
193. Стоянов А., Шерева Г., Димитров П. Съдържание на общо желязо и общо манган и съотношение между разтворената и суспендираната им форма в югозападната част на Черно мори//Океанология. — 1983. — Т. 11. — С. 16—22.
194. Стоянов А. Върху съдържанието на някои метали в суспендираното вещество в района на подводния каньон на р. Дунав//Океанология. — 1988. — Т. 17. — С. 12—17.
195. Vinogradov A. P. The elementary chemical composition of marine organisme//New Haven, Mem. Seas. Foundat. Marine Res. — 1953. — Vol. 2. — P. 17—24.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЙ СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

196. Белявская В. Б., Явишкина Л. В. Инверсия сероводорода в центральной части восточной половины Черного моря. — М., 1988. — 47 с. Деп. в ВИНИТИ 15.11.88 г. № 8306-В88.
197. Лукашев Ю. Ф., Гусарова А. Н., Налбандов Ю. Р., Сердитенко В. В. Гидролого-гидрохимическая структура вод 200-метрового слоя Черного моря//Современное состояние экосистемы Черного моря. — М., 1987. — С. 13—28.
198. Рябинин А. И., Лазарева Е. А. О содержании кадмия и серебра в верхних слоях водной толщи воды Черного моря (1977—1978 гг.)//Океанология. — 1981. — Вып. 2. — С. 249—256.
199. Рябинин А. И., Романов А. С., Жидкова Л. Б. Вопросы гидрохимии и баланса мышьяка в водах Черного моря//Труды ГОИН. — 1978. — Вып. 145.
200. Рябинин А. И., Салтыкова Л. В., Коноваленко Н. А. Содержание и изменчивость концентраций микроэлементов (кобальт, серебро, хром) в водах Черного моря (1979—1982 гг.)//Труды ГОИН.— 1987.— Вып. 180.— С. 103—111.
201. Рябинин А. И., Коноваленко Н. А., Коновалов С. К. и др. Рентгено-радиометрическое исследование гидрохимии некоторых главных ионов в воде Черного моря//Труды ГОИН. — 1988. — Вып. 189. — С. 169—180.

ЧАСТЬ II. ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ

1. ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ БИОЦЕНОЗА

1.1. Фитопланктон

В настоящее время в планктоне Черного моря насчитывается [68] 746 видов и разновидностей водорослей, в том числе 525 морских, солоноватоводно-морских и солоноватоводных, 211 пресноводных, пресноводно-солоноватоводных и 10 неопределенного отношения к солености (формы Sp.). Как и в других водоемах, фитопланктон состоит из семи отделов водорослей, диатомовых, пирофитовых, золотистых, зеленых, синезеленых, желтозеленых и эвгленовых. Наибольшее видовое разнообразие имеют диатомовые, затем следуют пирофитовые, в составе которых более 97 % перидиниевых и около 3 % криптомонадовых. Большинство отделов состоит почти исключительно из планктонных водорослей. Диатомовые и синезеленые обитают в двух биотопах — в планктоне и бентосе.

Диатомовый планктон Черного моря в основном неритический, в прибрежной зоне большой удельный вес в его составе имеют литоральные виды. Значение разных видов диатомовых водорослей в планктоне в разные сезоны различно. Очень немногие виды обитают в планктоне непрерывно круглый год и в определенные сезоны достигают максимума развития. К ним относятся в основном эвритермные виды. Большинство же других — сезонные стенотермные виды, способные вегетировать в узком диапазоне температур. В их составе имеются одно- и двухсезонные виды. Первые появляются обычно в планктоне в конце лета или в начале осени (имеются в виду биологические сезоны), к середине осени достигают максимума развития, затем выпадают из планктона и вновь появляются на следующую осень. Двухсезонные виды развиваются в максимальном количестве осенью и весной.

Пирофитовые по видовому разнообразию занимают второе место в фитопланктоне. В составе же истинно планктонных водорослей пирофитовым, почти исключительно перидиниевым, принадлежит первое место. Перидиниевые встречаются в море в течение всего года, однако максимального видового разнообразия и наиболее массового развития они достигают в теплое время года.

По систематическому составу диатомовых, их экологии и обилию в планктоне в Черном море выделяется шесть районов [68, 69]. Эти же районы, по-видимому, можно принять и для фитопланктона в целом, поскольку диатомовые в его составе занимают превалирующее значение. Выделяются следующие районы: 1) восточная часть моря от Керченского пролива до Батуми, 2) северный район — от Керченского пролива вдоль Крымского побережья до м. Тарханкут, 3) северо-западная часть моря, 4) центральный район, 5) район, прилегающий к Керченскому проливу, 6) прибосфорский район.

Фитопланктон восточного района сравнительно беден в систематическом отношении. По числу видов здесь преобладают диатомовые над перидиниевыми и ничтожно малый удельный вес имеют другие группы. Средняя биомасса фитопланктона за 1960—1984 гг., по данным АзЧерНИРО, 312 мг/м³. Самые высокие средние годовые биомассы отмечались в 1976—1982 гг. (при средней за 7 лет биомассе 611 мг/м³), в 1983—1984 гг. (337 мг/м³), минимальными они оказались в 1960—1973 гг. (84 мг/м³). Среди фитопланктона во все годы домнинировали диатомовые. В 1960—1969 гг. сезонные колебания суммарной биомассы фитопланктона были незначительными.

В 60-е гг. сезонный максимум биомассы фитопланктона наблюдался весной и летом, в 70-е гг.— или в феврале — марте, или летом, в 80-е гг.— в феврале — марте.

Фитопланктон северного района наиболее богат в систематическом отношении. Здесь диатомовые составляют до 43 % общего числа видов и разновидностей; пирофитовые, главным образом перидиниевые,— 38 %; более 10 % приходится на золотистые водоросли; более 5 % составляют зеленые; около 3 % — другие отделы. В составе диатомовых насчитывается большое число видов, вызывающих «цветение» воды.

Характерной особенностью систематического состава фитопланктона северо-западного района, обусловленного поступлением значительного речного стока, является наличие большого количества пресноводных и пресноводно-солоноватоводных водорослей. Здесь обнаружено 450 видов и внутривидовых таксонов, в том числе около 35 % пресноводных и пресноводно-солоноватоводных форм. В составе морских солоноватоводно-морских и солоноватоводных водорослей значительно больший, чем в других районах, удельный вес в планктоне имеют диатомовые (около 65 %), примерно в 2,5 раза меньше перидиниевых (до 27 %) и очень небольшое значение имеют остальные отделы (8 %).

Средняя биомасса фитопланктона, по данным 25-летнего ряда наблюдений АзЧерНИРО, 866 мг/м³. В разные годы количество его не оставалось постоянным. Если в 1961—1972 гг. средние годовые биомассы фитопланктона в основном не достигали многолетнего уровня (при средней за эти годы биомассе 657 мг/м³), то в большую часть последующих лет средние годовые биомассы превышали многолетний уровень, а средняя за 1973—1984 гг. биомасса составила 1100 мг/м³.

Во все годы в фитопланктоне преобладали диатомовые, но сезонная динамика его биомассы была

неодинаковой. В 1960—1967 гг. максимальное развитие фитопланктона было в июле—августе, в 1968—1975 гг. — в мае—июне и в 1976—1984 гг. — в феврале—марте. В ноябре—декабре биомасса фитопланктона превышала 1000 мг/м³ только в 1975 и 1982 гг.

Фитопланктон центрального района моря отличается обедненным видовым составом. Чем дальше от берегов, тем больше теряют значение литоральные, а затем и истинно планктонные формы, как неритические, так и океанические виды диатомовых. Значительно сокращаются в этом районе и видовые разнообразия перидиниевых. Для фитопланктона предкерченского района характерным

Таблица 1

Биомасса фитопланктона в слое 0—25 м в Черном море, мг/м³

Год	Северо-западный район	Восточная часть моря
1960	—	36
1961	1008	42
1962	696	29
1963	—	45
1964	722	100
1965	741	42
1966	511	120
1967	512	134
1968	282	120
1969	464	96
1970	806	78
1971	369	88
1972	520	135
1973	1621	114
1974	1082	261
1975	484	194
1976	672	1120
1977	1533	1130
1978	786	356
1979	1921	405
1980	2170	505
1981	940	617
1982	733	1363
1983	933	256
1984	418	418
1988	821	300

является наличие видов, проникающих из Азовского моря, даже отдельных пресноводных синезеленых водорослей.

В прибосфорском районе фитопланктон состоит в основном из типичных для Черного моря видов. Характерным является значительное число теплолюбивых перидиниевых водорослей, которые в других районах не встречаются или же обнаруживаются единично.

В различных районах моря средняя годовая биомасса фитопланктона в разные годы неодинакова (табл. 1).

Характер распределения фитопланктона тесно связан с общей схемой течений Черного моря [49]. Богатые фитопланктоном области (250 мг/м³ и более) совпадают с местами схождения различных течений, где более мощная вертикальная циркуляция обеспечивает приток к поверхности биогенных элементов. В глубоководной части моря максимальная биомасса приурочена к местам свала континентальной ступени (изобата 200 м), где выделяются [40] четыре района наиболее интенсивного развития фитопланктона: 1) в глубоководной части между мысами Тарханкут и Херсонес, 2) в прибрежной глубоководной области между Новороссийском и Туапсе, 3) у Анатолийского побережья обширная область против мысов Деликлишим и Инеболу и 4) участок, прилегающий к Керченскому проливу и выдающийся далеко в море с отклонением к югу.

В северо-западной мелководной части на развитие фитопланктона большое влияние оказывают материковый сток, резкие сезонные изменения температуры, интенсивное ветровое перемешивание вод вследствие мелководности района, менее благоприятные, чем в открытой части, условия освещенности в результате малой прозрачности воды и четко выраженная сгонно-нагонная циркуляция вод. Тесной связи развития фитопланктона с общей схемой течений в этой части моря не обнаружено.

Нижняя граница распределения жизни в Черном море совпадает с верхней границей сероводородной зоны [55]. В зависимости от гидрологических условий положение этой границы меняется на протяжении года. Основная часть фитопланктона сосредоточивается в верхней зоне моря [52, 53, 54]. В слое 0—50 м заключено от 56 до 89 % его количества.

Для фитопланктона Черного моря характерны [40] суточные изменения численности и биомассы. Увеличение количества клеток, вследствие размножения и уменьшения их в результате изъятия планктонными животными, происходит круглосуточно, но так как оба эти процесса происходят одновременно, то характер суточных колебаний проявляется неодинаково. Кривые суточного ритма численности и биомассы фитопланктона в основном имеют двувершинный характер с максимумом в 11 ч и 18—20 ч и минимумом в 14—15 ч и 1 ч—1 ч 30 мин. Эти изменения определяются разной скоростью и периодичностью деления массовых видов водорослей, степенью естественного их отмирания, а также ритмом и интенсивностью питания зоопланктона. Существенное влияние оказывают, вероятно, гидрологические и метеорологические условия, главным образом длительность периода солнечного освещения в разные сезоны.

Для сезонных изменений биомассы фитопланктона северо-западной части моря характерны [51] весенний максимум в апреле и летний — в июле—августе. К ноябрю отмечается значительный спад биомассы. В отдельные годы наблюдаются существенные отклонения от такого типичного хода процесса, которые связаны с ветровым и температурным режимом зимой [50]. В годы с относительно тихими зимами обычно бывает два максимума биомассы фитопланктона — в апреле и в июне—июле. В годы со штормовыми зимами возрастание биомассы наблюдалось лишь в июле—августе.

В восточной части моря высокое развитие фитопланктона отмечено в феврале—марте и мае. В противоположность северо-западной части моря штормовые зимы здесь связаны с наиболее значительными зимне-весенними пиками численности фитопланктона. По-видимому, это связано со штормовым перемешиванием вод, вызывающим мобилизацию запасов биогенов глубинной зоны восточной части и с материковым стоком, определяющим обилие биогенов в мелководной западной части моря.

В последние годы отмечаются существенные изменения в структуре фитопланктона Черного моря.

Особенно ярко они проявляются в северо-западной части водоема. Из шести размерных групп водорослей, выделяемых в этом районе [54б], больше всего оказались подверженными изменениям самые мелкие, относящиеся к первой и второй группам — объемы соответственно менее 1000 мкм³ и 1000—5000 мкм³. К первой группе относятся в основном диатомовые, зеленые и синезеленые водоросли. Ко второй — перидиниевые. Значение диатомовых в тотальном фитопланктоне уменьшилось, они составляют 40,1 % биомассы. Сократилась вегетация многих видов, развивавшихся интенсивно в 50—60-е гг. В то же время доля перидиниевых и, в частности, *Exuviaella cordata* в общей биомассе возросла за последние 30 лет с 18,8 до 54,4 %. Ежегодное цветение этой водоросли стало причиной «красных приливов» на устьевых взморьях Днестра, Днепра и Дуная. Максимальная численность организмов в зонах «цветения» достигает 224 млн. кл./л, в то время когда в 50-е гг. в периоды эпизодических «цветений» она не превышала 3,3 млн. кл./л [54а]. Выделенные А. И. Ивановым в 1957 г. три района интенсивного развития водорослей, приуроченные к устьевым взморьям крупных рек, сейчас объединились в одну обширную область, занимающую до 50 % площади акватории шельфа и превышающие прежние по размерам в 8—10 раз [32]. Кроме того, «красные приливы» стали отмечаться у берегов Болгарии и Румынии, где численность *Exuviaella cordata* может теперь достигать 500 млн. кл./л.

Несмотря на снижение роли диатомовых водорослей в структуре фитопланктона западной части Черного моря, в последние годы здесь также стали отмечаться «красные приливы», вызванные «цветением» таких представителей этого вида, как *Cerataulina bergonii*, *Stephanodiscus nantzschii*, численность которых может достигать 6—40 млн. кл./л.

В районах, удаленных от устьев больших рек — побережье Болгарии, «красные приливы» с начала 80-х гг. развиваются по типу океанских, отмечающихся там в зонах интенсивного развития апвеллинга — за счет «цветения» не водорослей, а простейших инфузорий *Mesodinium rubrum*, способных, в силу особенностей своей биологии, к фотосинтезу. Численность и биомасса этих организмов в Черном море в период указанных явлений достигает соответственно 4,6 млн. экз./л и 280 г/м³, что в 2 раза превышает наблюдающиеся у побережья Перу в момент развития здесь «красного прилива» в период Эль-Ниньо [79б]. Этот факт свидетельствует о том, что эвтрофирование вод шельфа происходит не только за счет материкового стока — аутвеллинга, но и вследствие интенсификации апвеллинга — подъема к поверхности глубинных, обогащенных минеральными солями, вод открытой части моря.

Интенсивное развитие перидиниевых водорослей происходит параллельно с увеличением биомассы ранее немногочисленных кокколитофорид. У Днепровско-Бугского лимана постоянное «цветение» воды в настоящее время вызывают отдельные виды синезеленых водорослей, которые в 50—60-е гг. не относились к числу возбудителей «цветения» [33а]. В эти же годы максимальная биомасса фитопланктона в Черном море достигала 52 г/м³, а сейчас она превзошла 800 г/м³.

1.2. Зоопланктон

В составе черноморского зоопланктона насчитывается около 120 видов планктеров, а также около 20 видов пелагических личинок донных беспозвоночных [81]. Более 60 % видов зоопланктона Черного моря составляют животные средиземноморского происхождения. В основной комплекс пелагической фауны планктона входят *Tintinnoinea*, копеподы, кладоцеры, щетинкочелюстные (*Sagitta setosa*), аппендикулярии (*Oikopleura dioica*), гребневики (*Pleurobrachia pileus*) и медузы (*Aurelia aurita, Rhizostoma pulmo*). Для прибрежных вод характерны гидромедузы, а также личиночные формы моллюсков, полихет, донных ракообразных и других бентосных животных. Среди них обильны, особенно летом, велигеры брюхоногих и пластинчатожаберных моллюсков, трохоферы и нектохеты многощетинковых червей, науплиусы и циприсы усоногих раков.

Виды зоопланктона Черного моря имеют различное происхождение, а потому различаются и экологически. Основу холодноводного комплекса, населяющего глубинные слои моря, а в холодный сезон появляющиеся и в поверхностных зонах, составляют копеподы *Calanus helgolandicus, Pseudocalanus elongatus, Oithona similis* и гребневики *P.pileus.*

Другую экологическую группу составляют тепловодные организмы, исчезающие из планктона в холодный период года. Сюда относятся кладоцеры, понтеллиды и инфузории. Ряд видов (*Oithona minuta, Acartia clausi, Paracalanus parvus, O.dioica, S.setosa*) являются эвритермными и встречаются в море во все сезоны года. Характерно для Черного моря и постоянное вторжение средиземноморских видов через Босфор и возможна постепенная их естественная акклиматизация.

Зоопланктон в Черном море ограничивается пределами кислородной зоны и в зависимости от гидрологических особенностей района достигает разных глубин. Основная часть его популяции (80—85 %) сосредоточена в верхнем 50-метровом слое [55, 56, 57, 65], нижняя граница планктона, по данным работы [59], в зонах круговых течений располагается на глубине 175—200 м, а в районе Босфора достигает 225 м. В центральных халистатических областях она может подниматься до 85—100 м. Исследования, проведенные в 1986—1987 гг., показали [4], что в ряде районов моря произошло заглубление нижней границы зоопланктона по сравнению в 1940—1950 гг. Нижнюю границу распространения зоопланктона определяет [16] количество растворенного кислорода, а не наличие в воде свободного сероводорода.

Вертикальное распределение зоопланктона различно и зависит от гидрологической структуры района, сезона и времени суток. Весной (апрель—май) в глубоководной части моря в дневное время в водах верхнего перемешанного слоя и в водах термоклина преобладает *Noctiluca miliaris*, скопления которой отмечаются [17] в слое 0—30 м. В верхней части градиентного слоя или реже в верхнем перемешанном слое распределяются также *O.dioica, P.parvus, O.nana* и молодь *A.clausi*. Копеподы *P. elongatus* и гребневики *P.pileus* распределяются по всей толще кислородной зоны. В водах ниже термоклина, т. е. в нижних слоях кислородной

зоны, преобладают массовые виды черноморского мезопланктона, играющие ведущую роль в его энергетике *C.helgolandicus* и *S.setosa*.

Вертикальное распределение планктона в весенний период ночью кардинальным образом изменяется. Животные, сосредоточенные днем в узком слое нижнего максимума, покидают его, и это скопление планктона исчезает. Основные скопления *C.helgolandicus* и сагитт сосредоточиваются в верхнем 20—30-метровом слое. Псевдокалянус образует максимальные концентрации ночью в водах градиентного слоя, но в отличие от калануса и сагитты, почти не проникает в верхний перемешанный слой. Распределение гребневиков ночью сохраняет двухмаксимальную структуру с нижним максимумом на глубине 70—90 м.

Летом в центральной части моря при прогреве поверхностных вод холодолюбивые формы планктона мигрируют в глубину. В прогретом верхнем перемешанном слое в верхней части градиентного слоя до глубины 25—30 м обитают теплолюбивые и эвритермные формы.

В осенний период (сентябрь—октябрь) в верхнем слое сосредоточены кладоцеры и в меньшей степени паракалянус. Ниже верхней границы градиентного слоя, практически только в холодной воде, обитают псевдокалянус и ноктилюка. Однако максимальные скопления они образуют не под слоем термоклина, а непосредственно в нем. Такие организмы, как сагитты, апендикулярии, акарция и гребневики, населяют в равной степени верхний перемешанный слой, слой термоклина и глубинные воды вплоть до глубины 90—120 м. Дневное и ночное распределение этих групп практически закономерно не различается. Отдельную группу образует калянус, составляющий по биомассе в среднем 30 % зоопланктона. Этот вид совершает суточные миграции большого размаха и высокой интенсивности. Днем его скопления концентрируются в узком слое толщиной несколько метров вблизи от сероводородной зоны, в воде, где содержание кислорода очень низко — 0,33—0,48 мг/л.

Ночью большая часть популяции калануса поднимается и распределяется по всему столбу воды. Как известно [66], при миграциях этот вид не реагирует на скачки температуры и солености и ночью проходит сквозь них к поверхности.

Таким образом, массовые виды, доминирующие в планктоне Черного моря, обитают постоянно или в некоторые сезоны года (*Noctiluca*) или в ночное время во всей или почти во всей толще кислородной зоны.

Это позволяет рассматривать планктонное сообщество кислородной зоны Черного моря как единое сообщество, обладающее, подобно всем морским пелагическим сообществам, определенной гетерогенностью по вертикали, и нет оснований делить его на самостоятельно функционирующие эпи- и батипланктонные сообщества [18, 17].

Численность и биомасса зоопланктона изменяется как во времени, так и в пространстве. В Черном море существуют районы, постоянно обогащенные зоопланктоном. Их формирование связано с обогащением поверхностных слоев воды этих районов биогенами, а также с пассивным сносом зоопланктона в месте фронтов, схождения течений. Районы относительного обилия зоопланктона расположены юго-восточнее побережья Крыма и в северо-западной мелководной части моря. В разные сезоны пятна повышенной его концентрации наблюдаются у берегов Кавказа, Болгарии и Румынии, в центральной части моря между южным Крымом и Анатолийским побережьем [37, 45, 58, 59, 66]. Самые значительные скопления зоопланктона наблюдаются в наиболее опресненных районах северо-западной части моря на мелководье, к северу от линии м. Тарханкут — устье Дуная [23]. Минимальное содержание зоопланктона отмечается в центре западной халистатики и в центральных халистатических зонах восточной половины моря [2].

Исследования, характеризующие численность и биомассу зоопланктона на всей акватории северной половины Черного моря, ведутся в АзЧерНИРО с 1959 г. Сбор материала проводится в регулярных съемках в феврале — марте, мае, августе и ноябре на постоянных разрезах. При этом из зоопланктона выделяется группа кормовых организмов, объединяющая все планктонные организмы, встречающиеся в желудочно-кишечном тракте рыб на разных этапах их жизненного цикла. Практически кормовой зоопланктон включает весь списочный состав планктона Черного моря, за исключением гребневиков, ноктилюки и медуз, которые в желудках черноморских рыб почти не встречаются. Доля кормового зоопланктона в сырой массе сравнительно невелика, в среднем она составляет 27,5 % для северо-западной части моря, 24,5 % для района Южного берега Крыма и 20 % — для восточной части моря. Остальное количество составляют группы организмов с большим содержанием воды (гребневики, ноктилюка, медузы). При выражении же состава биомассы в сухом веществе значение кормового зоопланктона значительно больше и составляет около 73 %. Отлов зоопланктона проводится в слое 0—100 м и 0 м — дно, где глубина менее 100 м. Количество планктона, обитающего глубже 100 м [45], не превышает 2—3 % общей его биомассы. Многолетними исследованиями АзЧерНИРО установлено, что на протяжении последних 30—33 лет биомасса планктона Черного моря подвержена разнопериодным колебаниям (табл. 2).

В качестве критерия развития и продуктивности зоопланктона используется средняя многолетняя его биомасса для каждого сезона и года. Условно принято, что сезоны или годы со средней за этот отрезок времени по району биомассой выше средней многолетней, относятся к продуктивным, а ниже ее — к малопродуктивным.

В северо-западной части моря наиболее продуктивный период развития кормового зоопланктона наблюдался в 1959—1969 гг., когда средняя его биомасса составляла 150 мг/м^3, или в 1,4 раза превышала среднюю многолетнюю (104 мг/м^3). Средняя биомасса гребневиков 39 мг/м^3 (ниже почти в 2 раза средней многолетней), а ноктилюки — 272 мг/м^3, или в 1,5 раза меньше средней многолетней (414 мг/м^3). С 1970 г. отмечено снижение развития кормовых организмов, средняя биомасса которых за период 1970—1975 гг. 96 мг/м^3, т. е. была близка к средней многолетней. Развитие гребневиков в этот период возросло почти в 3 раза, а ноктилюки несколько уменьшилось. С 1976 г. и по настоящее время наблюдается самый низкий уровень развития кормового зоопланктона, средняя биомасса которого с 1976 по 1988 г. 57 мг/м^3,

Таблица 2

Биомасса зоопланктона в Черном море, мг/м³

Год	Северо-западный район			Восточная часть моря			Район Южного берега Крыма		
	Кормовой зоопланктон	Гребневики	Ноктилюка	Кормовой зоопланктон	Гребневики	Ноктилюка	Кормовой зоопланктон	Гребневики	Ноктилюка
1959	93	82	307	44	23	269	42	31	313
1960	209	17	345	45	32	130	57	188	242
1961	118	9	260	45	28	155	75	57	225
1962	172	39	412	63	59	378	148	48	340
1963	158	70	319	50	20	194	54	71	270
1964	178	39	262	61	15	156	65	40	135
1965	109	87	186	55	15	142	46	100	181
1966	78	23	456	85	13	198	107	20	211
1967	276	5	148	133	14	302	110	10	274
1968	90	52	50	107	8	87	97	59	39
1969	171	4	249	81	6	56	111	10	72
1970	89	55	646	103	94	416	—	—	—
1971	142	122	110	110	311	406	98	226	270
1972	61	102	128	85	110	214	63	145	250
1973	84	174	86	161	310	94	79	164	117
1974	116	79	93	99	56	57	161	40	50
1975	82	124	176	61	132	343	127	118	216
1976	43	49	148	47	163	126	28	75	84
1977	44	53	328	42	777	137	28	26	38
1978	61	75	166	27	168	162	40	127	118
1979	70	45	671	65	117	112	113	50	167
1980	225	25	443	113	35	223	46	33	191
1981	67	75	376	118	120	581	84	48	178
1982	58	40	198	44	69	152	44	44	94
1983	44	54	634	70	107	257	53	106	153
1984	43	136	198	85	218	494	54	114	72
1985	78	116	1488	74	223	210	56	111	231
1986	88	19	1878	58	91	191	106	78	62
1987	36	44	1329	77	211	63	47	67	122
1988	47	59	317	84	97	444	68	86	212
Средняя	104	62	414	75	122	225	76	79	170

что в 1,8 раза меньше средней многолетней. И лишь в 1980 г. отмечен очень высокий для этого периода уровень (225 мг/м³) развития кормовых организмов. Гребневики в этот период развивались на среднем многолетнем уровне, их биомасса 61 мг/м³. Самый высокий уровень развития за эти годы отмечен у ноктилюки, средняя биомасса которой 629 мг/м³, или в 1,5 раза превышала среднюю многолетнюю (414 мг/м³). Максимальный уровень развития ноктилюки был в 1985—1987 гг. (1329—1878 мг/м³), в 1988 г. он снизился (317 мг/м³).

В восточной части моря низкий уровень кормового зоопланктона наблюдался с 1959 по 1965 г., средняя биомасса его 52 мг/м³, что было в 1,4 раза меньше средней многолетней (75 мг/м³). Минимальный уровень развития в этот период отмечен и у гребневиков (27 мг/м³, или в 4,5 раза ниже среднего многолетнего). Средняя биомасса ноктилюки (203 мг/м³) за эти годы была близка к средней многолетней (225 мг/м³). С 1966 г. биомасса кормовых организмов в этом районе значительно возросла и за период до 1976 г. составила в среднем 108 мг/м³, т. е. в 1,4 раза превышала среднюю многолетнюю. Биомасса гребневиков также возросла (в среднем до 106 мг/м³), а ноктилюки осталась почти на том же уровне (204 мг/м³). Период с 1975 по 1979 г. характеризуется наиболее низким уровнем развития кормовых организмов (43 мг/м³) и наиболее высоким — гребневиков (271 мг/м³). Ноктилюка развивалась на более низком (176 мг/м³) по сравнению со средним многолетним (225 мг/м³) уровне. С 1980 г. по настоящее время наблюдается сравнительно хорошее состояние кормового зоопланктона (80,4 мг/м³) и самый высокий уровень развития ноктилюки (290 мг/м³). Средняя биомасса гребневиков (130 мг/м³) за эти годы незначительно превышала среднюю многолетнюю (122 мг/м³).

В районе Южного берега Крыма и Керченского предпроливья многолетняя динамика биомассы кормового зоопланктона более стабильна, чем в северо-западной части моря, межгодовые колебания биомассы выражены менее резко. По уровню развития кормового зоопланктона в этих районах четко прослеживаются три периода.

Первый — с 1959 по 1965 г. со средней биомассой кормовых организмов 70 мг/м³, или почти на уровне средней многолетней (76 мг/м³); второй — с 1966 по 1975 г., наиболее продуктивный период (106 мг/м³, или в 1,4 раза больше средней многолетней); третий — с 1976 г. по настоящее время, с наиболее низкой средней биомассой (59 мг/м³) за все 30 лет наблюдений (1959—1988 гг.). Для некормовых организмов наиболее продуктивными были 1959—1965 гг.— для ноктилюки, средняя биомасса которой составила 244 мг/м³ или в 1,4 раза выше средней многолетней (170 мг/м³ и в 1966—1975 гг.— для гребневиков (88 мг/м³). Последние годы (1976—1988) характеризуются пониженным уровнем развития некормовых ноктилюки и гребневиков по сравнению с предыдущим периодом 1959—1975 гг.

Таким образом, последнее десятилетие характеризуется снижением общего уровня развития кормового зоопланктона по сравнению с

предшествующими годами, за исключением восточной части моря. Особенно низкий уровень развития кормовых организмов наблюдался в северо-западной части моря. Вероятно, это результат воздействия антропогенных факторов.

Продукция зоопланктона рассчитана по материалам сезонных съемок АзЧерНИРО в разных районах моря и ИнБЮМа АН УССР на разрезе м. Херсонес — пр. Босфор. Поскольку в исследованиях АзЧерНИРО главное внимание обращается на кормовой зоопланктон, составляющий основу питания рыб, то расчет продукции был выполнен по ракообразным и щетинкочелюстным. При средней годовой биомассе ракообразных в верхнем 100-метровом слое моря 6,1 г/м² их продукция составляет 215,6 г/м², биомасса сагитт 2,2 г/м², а продукция 76 г/м². При пересчете на площадь всей акватории моря годовая продукция ракообразных составляет более 90 млн т, что соответствует ежесуточному образованию этими организмами около 250 тыс. т. биомассы. Годовая продукция сагитт равна 31,7 млн т, суточная — около 87 тыс. т.

1.3. Бентос

Фитобентос Черного моря состоит из водорослей макрофитов, морских трав и перифитонных микроводорослей. В настоящее время известно свыше 380 видов макроводорослей. Годовая динамика донных микрофитов состоит в постепенном увеличении их количества по мере повышения температуры воды и усиления освещенности. Максимальных величин достигают летом и наиболее низких — зимой. Годовая продукция микроводорослей оценивается в 15 млн т при суммарной биомассе 0,2 млн т. Наиболее высокий уровень развития микробентоса отмечается в западных районах Черного моря.

Сезонная динамика макрофитов выражена резко и обусловливается в основном температурным и световым режимами и циклами развития самих водорослей. Флора макрофитов насчитывает 304 вида, из них группа красных водорослей состоит из 140 видов, зеленых — более 80 видов и бурых — более 70 видов.

Водоросли Черного моря по срокам развития подразделяются на 4 группы: многолетние (75 видов), однолетние (120 видов), сезонные летние (39 видов) с беспрерывной сменой циклов во все сезоны и сезонные зимние (31 вид).

У группы многолетних водорослей наблюдаются два максимума развития — весенний и осенний, а у однолетних — наблюдается один максимум в летний период. В массовом количестве водоросли произрастают на глубине от 0 до 10—15 м, а у открытых берегов с крутым склоном опускаются до глубины 20—25 м. Глубже 40 м до глубины 60 м преобладают ассоциации филлофоры.

Фитобентос Черного моря подразделен на 40 ассоциаций. Эти общества совместно с донными животными образуют донные биоценозы, которые будут рассмотрены далее. 12 видов макрофитов имеют промысловое значение.

Среди них ведущее место принадлежит видам филлофоры и цистозиры. Огромные скопления филлофоры не имеют себе равных в мире. Это уникальное так называемое филлофорное поле Зернова расположено в северо-западной части моря на глубинах 30—65 м между 45 и 46° с. ш. и 30—32° в. д. Биомасса филлофорного поля изменяется от 1,5 до 12 кг/м². Общий запас оценивается в 7—10 млн т. В настоящее время вследствие эвтрофикации вод, часто повторяющихся заморов и загрязнения вод запасы макрофитов значительно снижены.

Общий запас биомассы фитобентоса в Черном море близок к 15 млн. т, а продукция сырой биомассы к 50 млн. т в год, что составляет 3 % суммарной продукции органического вещества на его акватории.

Зообентос. В Черном море известно 1518 видов бентосных животных, 80 % из них являются представителями донной фауны средиземноморско-атлантического происхождения (иглокожие, немертины, копеподы, полихеты), преодолевшими пониженную соленость, остальные — виды каспийского происхождения и пресноводные формы (олигохеты, коловратки, бокоплавы, насекомые).

Площадь обитания зообентоса составляет 23 % площади Черного моря. У границы сероводородной зоны донные отложения заселены микробентосом. Нижняя граница обитания донной фауны располагается на глубинах 120—135 м, у берегов Кавказа — 165 м, лишь у прол. Босфор доходит до 170—200 м.

Донные сообщества образуют несколько четко выраженных биоценозов, которые можно подразделить на два типа:

— региональные, охватывающие большие площади, встречающиеся повсеместно на определенных глубинах (биоценоз венуса, мидии, фазеолины и др.);

— локальные (биоценозы бухт и заливов, скал, устричных ракушечников и т. д.).

Донные биоценозы располагаются вдоль побережья концентрическими поясами. Основными факторами, определяющими развитие биоценозов, являются грунты и глубины. В зависимости от глубин обитания зообентоса рассматриваются следующие зоны: 0—15 м — зона верхней сублиторали; 15—20 м — зон мидиевого биоценоза; 50—100 м — зона нижней сублиторали.

Зоны 0—15 м занимают биоценозы инфралиторы с мелкими песчаными или илистыми грунтами. Фауна очень разнообразна, на мягких песчаных грунтах западного побережья доминирует биоценоз мелкого двустворчатого моллюска *Corbula*, его биомасса достигает 300—500 г/м², в северо-западной части моря доминируют биоценозы, формируемые моллюсками *Donacilla*, полихетами и т. д.

Биоценозы ракушечников формируются у нижней границы мелких песчаных грунтов на глубине 10—50 м. Ниже ракушечников на глубинах более 5—10 м в бухтах и на глубинах до 70 м в открытых участках располагается биоценоз мидиевых илов. Руководящей формой является мидия; на некоторых участках биомасса мидий превышает 3 кг/м² [79а].

Биоценоз филлофорного поля Зернова существует на обширной площади в северо-западной части моря на глубине 30—60 м. Он формируется на грунтах, занятых мидиевым илом, в зоне скопления красной водоросли филлофоры.

На глубинах 50—130 м расположен биоценоз фазеолинового ила.

Процесс формирования донной фауны происходит интенсивно и в настоящее время. Это процесс заселения Черного моря средиземноморской фауной, влияние антропогенных факторов и проникновение на судах личинок различных беспозвоночных. Такими вселенцами оказались хищный моллюск рапана, мидия, краб с восточного побережья США и др.

Большинство донных животных размножается летом, поэтому максимальные значения биомассы наблюдаются в этот сезон, осенью происходит уменьшение биомассы и разнообразия бентоса, а зимой — замедление или приостановление роста.

Распределение биомассы бентоса. Биомасса бентоса в Черном море достаточно высока. У побережья Болгарии, западного Крыма она превышает 100 г/м², в некоторых районах Кавказа свыше 500 г/м², у ЮБК биомасса изменяется от 100 до 600 г/м². В районе мысов Меганом и Ай-Тодор биомассы превышают значение 1000 г/м². Наиболее продуктивным является северо-западный район: здесь на значительной акватории биомасса бентоса превышает 500 г/м².

В Одесско-Дунайской части северо-западного района на глубинах 10—30 м и в диапазоне глубин 60—80 м наблюдается слабое развитие бентоса; это связано с ежегодными заморами и траловым промыслом шпрота.

На глубинах 30—50 м наблюдается максимум биомассы бентоса от 200 г/м² до нескольких килограммов (здесь отмечается наибольшее развитие мидий).

Начиная с глубин 50—80 м биомасса бентоса уменьшается до 20—50 г/м², а с глубины 80 м составляет несколько граммов на 1 м². Исключение составляют берега Румынии, где на глубине 100 м биомасса достигает более 200 г/м², а затем резко уменьшается.

Суммарная биомасса бентоса оценивалась в 23,8 млн т, однако в последние годы она снизилась на два порядка. Годовая продукция составляет 50—70 млн т, причем 90 % составляют моллюски. Запас кормового бентоса для рыб оценивается в 7,7 млн т. Все приводимые цифры ориентировочные.

Бентос играет значительную роль в экосистеме Черного моря. Личинки некоторое время ведут планктонный образ жизни и служат пищей для многих животных. Бентос является биофильтратом Черного моря. Мидии, фазеолины и некоторые другие моллюски могут профильтровать и очистить от микровзвесей всю воду 100-метрового слоя за год до 15 раз.

Мидии. Мидия — двустворчатый моллюск, морское животное, встречается по всему побережью Черного моря от уреза воды до глубин 50—80 м. Наибольшее количество мидий сосредоточено в северо-западной части моря, особенно у западных берегов. Численность и биомасса мидий вдоль западных берегов в 2—3 раза превышает численность и биомассу в других районах моря.

Мидии раздельнополы, соотношение полов 1 : 1. Половой зрелости достигают в возрасте 2 лет, при длине 10—50 мм. Размножаются при температуре от 8 до 23 °С, планктонная стадия длится 2—4 нед.

Промысловых размеров (50 мм) достигают на 4—7-м году жизни. В среднем мидии живут 7—8 лет, достигая длины 140 мм. В Каркинитском и Джарылгачском заливах встречаются особи в возрасте 21—28 лет при длине 110—115 мм.

В возрасте 4 лет резко повышается смертность мидий.

Мидии — фильтраторы, основу пищи составляют микроскопические планктонные организмы, в основном фитопланктон, а также детрит из остатков. За 1 ч мидия фильтрует около 3 л воды.

Мидией питаются рапана, молодые крупные осетровые, камбаловые, скаты, бычки. Молодь мидий — излюбленная пища крабов.

Наиболее плотные скопления мидий приурочены к выходам твердых пород.

В 70—80-х гг. по сравнению с 60-ми гг. наблюдается значительное сокращение площадей мидий. Несмотря на то, что мидии выносливы к дефициту кислорода (в течение 5 сут способны жить в анаэробных условиях, находясь в состоянии депрессии, при более длительном периоде погибают) и загрязнению, в результате многоразового действия заморов численность их в северо-западном районе сократилась более чем в 2 раза (Сырьевые ресурсы Черного моря, 1979).

Хотя запас мидий оценивается приблизительно в 6 млн. т, но основу (92 %) составляют мидии непромысловых размеров (до 50 мм). При частичном повышении заморов запасы мидий будут снижены.

Возможный промысел мидий без подрыва запасов в 1963—1967 гг. оценивался в 1 млн ц, начиная с 1974 г., после заморов, возможный промысел снизился до 0,1 млн ц. Фактическая добыча мидий в 1960—1974 гг. колебалась в пределах 12—20 тыс. ц.

Запасы устрицы в Черном море невелики. Устричные банки находятся в некоторых заливах северо-западной части моря: Егорлыцком, Каркинитском, Джарылгачском и в очень незначительном количестве — в Керченском проливе.

Банки в восточной части моря практически уничтожены. Одной из причин гибели устриц является нашествие рапаны. Имеющиеся запасы черноморских устриц (57 млн шт. по данным 1976 г.) недостаточны для рентабельного промышленного лова.

1.4. Ихтиофауна

Черное море населено примерно 2·000 видами животных и почти 1 000 видами растений, часть из которых является традиционными и потенциальными промысловыми объектами. Ежегодно отечественным рыболовным флотом добывается более 200 тыс. т. рыбы и морепродуктов. Из всего богатства черноморской флоры и фауны наибольший практический интерес представляют рыбы, которые составляют основу промысловой продуктивности водоема.

В Черном море обитает 165 видов и подвидов рыб, из них 119 являются исключительно морскими видами, 24 — проходными или частично проходными, 22 — пресноводными. Как и в других морях, в составе ихтиофауны этого бассейна отчетливо различаются пелагические и донные прибрежные рыбы. Они характеризуются определенными экологическими особенностями, сложившимися в

процессе приспособления к специфическим условиям существования.

Морские виды рыб Черного моря принято делить на 4 группы: постоянно обитающие (черноморская раса хамсы, черноморская ставрида, черноморский шпрот, калкан); зимующие в Черном, но нерестующие и нагуливающиеся в Азовском море (азовская раса хамсы, керченская раса сельди); зимующие и нерестующие в Черном море, но нагуливающиеся в Азовском (кефали, черноморская барабуля); осваивающие Черное море как нерестовый и нагульный ареал, но зимующие или нерестующие в Мраморном и Эгейском морях (пеламида, скумбрия).

Численность большинства черноморских рыб зависит не только от условий существования их в Черном море, но и от условий нереста, нагула и зимовки в смежных морях, что и определяет сложный тип динамики сырьевой базы всего моря.

Ихтиофауна Черного моря вследствие зараженности его глубин сероводородом характеризуется большой численностью пелагических рыб и ограниченной численностью донных рыб, поэтому основу промысла составляют пелагические рыбы.

Наиболее массовые виды — хамса и черноморский шпрот — питаются планктоном и играют ведущую роль в использовании кормовых ресурсов моря. Эти рыбы с коротким жизненным циклом. Сохранность вида обеспечивается повышенной воспроизводительной способностью, поэтому большое промысловое изъятие хамсы и черноморского шпрота является биологически обоснованным.

Запасы рыб с более длительным жизненным циклом (осетровые, калкан, кефали и др.) обычно больше подвержены воздействию промысла и влиянию неблагоприятных условий среды. Следовательно, доля изъятия промыслом этих рыб должна быть значительно меньше.

В целом промысловые рыбы в Черном море составляют лишь незначительную часть общего числа видов, формирующих ихтиофауну водоема. Ниже приводится биологическое описание основных объектов лова.

1.4.1. Пелагические рыбы

Хамса (анчоус) *Eugraulis encrasicolus*. Мелкая стайная пелагическая рыба с коротким жизненным

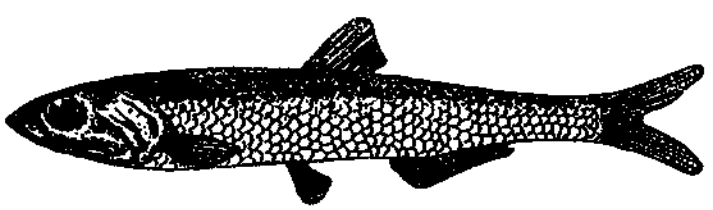

Рис. 1. Хамса.

циклом. Тело хамсы удлиненное (рис. 1), не сильно сжатое с боков, жаберные крышки почти свободные, верхняя челюсть длинная, но не достигает жаберного отверстия. По объему добычи хамса имеет важнейшее значение для советского промысла в Черном море (табл. 3).

В Черном и Азовском морях этот вид представлен двумя географическими расами — черноморской и азовской. Промысловый запас хамсы собственно черноморской расы колеблется в пределах 430—940 тыс. т.

Хамса обитает в относительно теплых водах, в особенности в период размножения. С наступлением осенних холодов косяки хамсы мигрируют на зимовку в южные районы Черного моря, где температура воды не бывает ниже 6 °С. В ходе обратной весенней миграции азовская хамса возвращается в Азовское море, а черноморская распределяется по всему шельфу Черного моря (рис. 2).

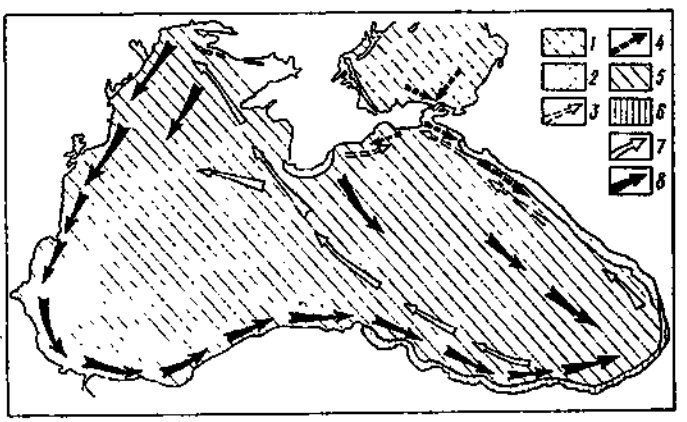

Рис. 2. Распределение и миграции хамсы.
Азовская раса: *1* — район нереста и нагула; *2* — зимовки; *3* — пути весенних миграций; *4* — осенних миграций.
Черноморская раса: *5* — район нереста и нагула; *6* — зимовки; *7* — пути весенних миграций; *8* — осенних миграций.

Широкое распределение хамсы по акватории бассейна связано с ее способностью к размножению в большом диапазоне солености воды: от 9—10 ‰ в Азовском море до 17—18 ‰ в открытых районах Черного моря.

Размножение хамсы происходит при температуре 16—26 °С с конца мая по август. Индивидуальная плодовитость колеблется от 9 тыс. до 25,5 тыс. икринок. В период икрометания рыба продолжает интенсивно питаться и держится рассеянно в поверхностных слоях воды. Основное значение в питании черноморской хамсы имеет *Copepoda*, существенное — *Cladocera*, личинки *Cirripedia Decapoda*, *Mysidae*, также *Sagitta OiRopleura* и личинки моллюсков. Зимой хамса питается значительно слабее, чем летом. Молодь хамсы черноморской расы отличается быстрым темпом роста: уже к ноябрю средний размер сеголешков достигает 70—80 мм. Способность к размножению появляется у нее на 2-м году жизни, а максимальный возраст особей в промысловом стаде 5 лет. Длина рыб в этом возрасте достигает 155 мм (табл. 4). В связи с высокой естественной смертностью доля годовиков в промысловом стаде 50—80 %.

Являясь в Черном море наиболее массовым видом мелких рыб, хамса в свою очередь всегда занимает большое место в рационе пелагических хищников (черноморская ставрида и др.), которые питаются ею круглый год. Высокая концентрация рыбы в зимовальных скоплениях также обеспечивает хорошую кормовую базу калкану, пятнистой колючей акуле, белуге, дельфинам и морским птицам, которые постоянно встречаются вблизи косяков хамсы.

Черноморский шпрот — *Sprattus Sprattus phalericus*. Один из наиболее массовых видов рыб Чер-

Таблица 3

Вылов хамсы в 1981—1985 гг. (тыс. т) *

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Всего
1981	52,1	23,3	8,8	0,5	0,7	1,2	0,2	0,3	0,5	—	0,4	17,4	105,4
1982	29,4	46,3	40,2	3,4	0,8	1,0	0,4	0,1	0,3	2,1	2,5	32,9	159,4
1983	40,3	52,5	47,1	1,8	1,1	1,5	0,6	0,15	0,15	—	1,8	35,1	181,8
1984	65,8	60,5	25,4	2,1	1,8	1,3	0,6	0,2	0,2	—	2,7	46,7	207,3
1985	30,8	3,6	2,6	0,7	0,4	0,4	0,1	0,4	0,2	0,5	4,7	41,1	85,5

* Вместе с приловом азовской хамсы в смешанных скоплениях.

ного моря. Его биомасса в последние годы колеблется в пределах 200—1600 тыс. т. Ведет пелагический стайный образ жизни. Холодолюбивый вид, обитающий преимущественно в слоях воды с температурой 6—18 °С. Распространен по всему морю.

Таблица 4

Длина и масса черноморской хамсы в зависимости от возраста

Возраст, число лет	Длина, мм			Масса, г		
	средняя	минимальная	максимальная	средняя	минимальная	максимальная
1	82	55	110	4,3	1,5	10,5
2	120	108	127	14,2	10,0	16,5
3	127	124	133	15,3	10,5	18,0
4	134	129	141	17,9	17,0	20,5
5	139	134	155	18,0	17,0	23,5

Имеет короткий жизненный цикл. Его предельный возраст 5 лет.

Наибольшая длина тела (от начала рыла до конца средних лучей хвостового плавника) 14 см, наибольшая масса 25 г. Тело низкое, сжатое с боков, покрыто циклоидной чешуей (рис. 3). На всем

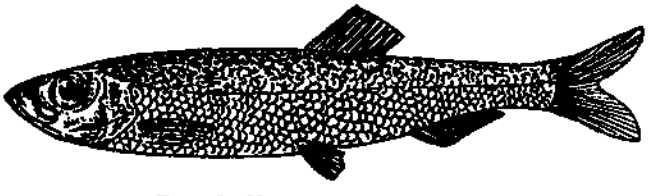

Рис. 3. Черноморский шпрот.

протяжении от горла до анального плавника имеются хорошо развитые брюшные килевые чешуйки. Спина обычно сине-черная, бока серо-серебристые. Вершина рыла и нижней челюсти черноватые.

Половой зрелости черноморский шпрот достигает в возрасте неполного года и нерестится ежегодно. Пол хорошо различим невооруженным глазом у рыб в возрасте 7—8 мес. Икрометание порционное. Среднее количество икринок в одной порции около 2500 шт. Нерестовый период сильно растянут. Особи с текучими половыми продуктами, а также икра встречаются почти весь год. Основная масса черноморского шпрота мечет икру с октября по март при температуре воды 6—19 °С. Растянутость нерестового периода объясняется постепенностью созревания рыб, относящихся к различным генерациям, и порционностью икрометания.

Икра пелагическая встречается по всему морю от поверхности до глубины 150 м. Период развития икры при температуре воды 5—13 °С составляет 8 сут. Выклюнувшиеся личинки держатся в пелагиали. Наибольшее количество икры и личинок отмечается в открытых районах моря над большими глубинами.

Качественный состав популяции черноморского шпрота подвержен значительным изменениям. Промысловое стадо формируется в основном двухлетками (до 70 %). Характерно преобладание самок.

Питается зоопланктоном преимущественно холодолюбивого комплекса. Основными пищевыми компонентами являются холодолюбивый рачок *Calanus helgolandicus* и эвритермный *Acartia clausi*. В течение суток отмечается два пика питания: утренний, в период опускания рыбы в придонные слои, и вечерний, в момент подъема в толщу воды до нижней границы термоклина. Вечерний индекс наполнения желудка больше утреннего.

Для черноморского шпрота характерны суточные вертикальные миграции. В светлое время суток он опускается в придонные слои воды, а ночью поднимается к поверхности.

Весной (март — апрель) после нереста черноморский шпрот (рис. 4) мигрирует для нагула в

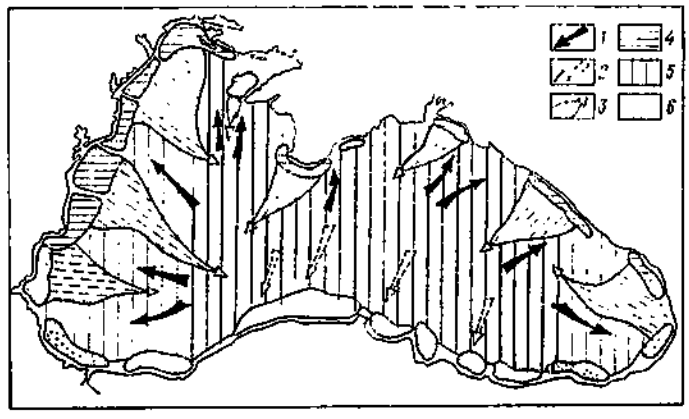

Рис. 4. Распределение и миграции черноморского шпрота.
1 — пути весенних миграций; *2* — предполагаемые пути весенних миграций; *3* — пути осенних миграций; *4* — районы нагула; *5* — нереста; *6* — предполагаемые районы нагула.

прибрежную зону на глубины 20—100 м. Наиболее четко эти миграции выражены на северо-западном шельфе и в районе Керченского предпроливья. Нагул продолжается с марта по октябрь. В этот период черноморский шпрот образует придонные промысловые скопления.

В октябре усиление конвективного перемешивания вод приводит к размыванию слоя термоклина и при охлаждении поверхностных вод до 15 °С черноморский шпрот поднимается в темное время

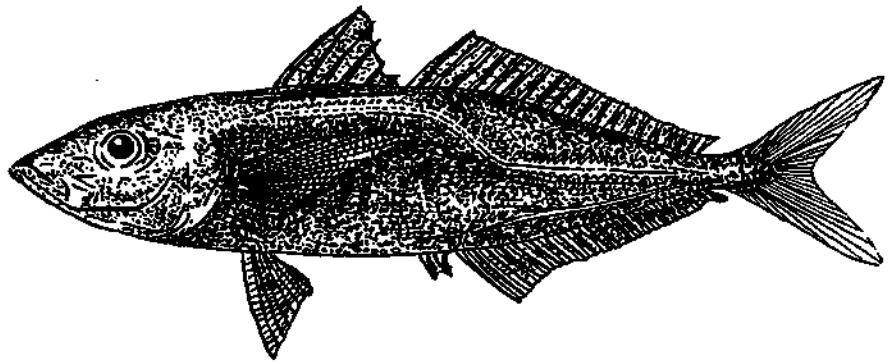

Рис. 5. Черноморская ставрида.

суток до самой поверхности. В этот период косяки отходят из прибрежной зоны в глубоководные районы и постепенно рассредотачиваются по всей площади моря.

Черноморский шпрот является объектом питания хищных рыб (катрана, мерланга и др.), дельфинов и рыбоядных птиц.

Долгое время считалось, что черноморский шпрот не образует скоплений, пригодных для эффективного тралового лова, поэтому он отлавливался только ставными неводами в узкой прибрежной зоне до глубин 7—10 м. Вылов СССР до середины 70-х гг. составлял 0,5—4,0 тыс. т за год.

Совершенствование методики и техники промысловых исследований позволило выявить наличие промысловых концентраций черноморского шпрота в период нагула на шельфе Черного моря. Сначала в Болгарии, а затем в СССР (с 1976 г.) стал развиваться специализированный траловый промысел. Это позволило увеличить вылов черноморского шпрота до 40—60 тыс. т.

Черноморская ставрида — *Trachurus mediterraneus ponticus.* Одна из основных промысловых рыб. Ведет пелагический образ жизни и имеет форму тела, типичную для всех пелагических рыб (рис. 5). Численность ее значительно колеблется в разные годы, изменяясь по различным оценкам от 75 до 800 тыс. т. Длина тела достигает 25 см с преобладанием размерной группы 10,5—13 см. Половой зрелости особи достигают в возрасте 1 года при длине 10—11 см.

Ставрида встречается при температуре воды 6—25 °С и при различной солености; однако опресненных районов избегает. Являясь теплолюбивой рыбой, активна в теплое время года. Летом держится как у берегов, так и в открытом море над слоем температурного скачка: от поверхности до глубины 25—35 м. В этот период она нерестится и интенсивно нагуливается. Со второй половины августа начинает концентрироваться в прибрежных районах моря, а в октябре — декабре мигрирует вдоль берегов к местам зимовки (рис. 6). Расположены они в прибрежных водах Турции, у берегов Грузии и у Южного берега Крыма. Часть черноморской ставриды зимует в Мраморном море. В период зимовки с установлением гомотермии основные скопления распределяются у дна на глубинах 30—80 м, а отдельные косяки встречаются на глубинах от 20 до 120 м. Вследствие низкой температуры в этот период (6—10 °С) ставрида малоактивна и почти не питается. В конце марта — начале апреля с прогревом воды ее скопления распадаются, рыба поднимается в поверхностные слои и мигрирует к районам нереста.

Нерест происходит в конце мая до конца августа по всей акватории Черного и частично Азовского морей при температуре воды 15—26 °С, солености 11,6—19,3 ‰. Оптимальная температура для нереста 19—23 °С. Пик нереста в восточной части моря приходится на июнь, в западной — на начало июля. Наиболее интенсивный нерест происходит у берегов Кавказа, в районе Керченского

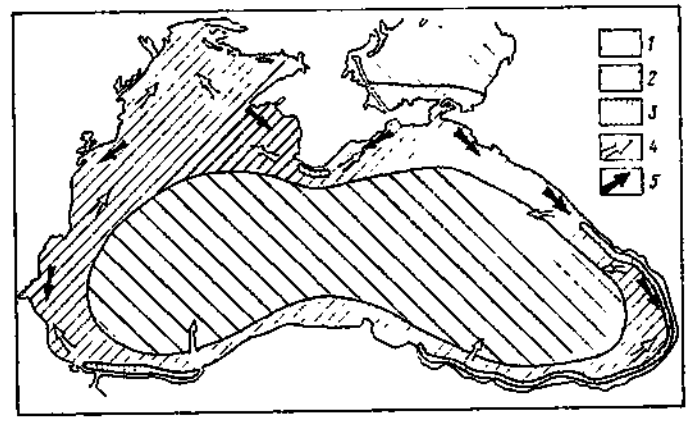

Рис. 6. Распределение и миграции черноморской ставриды.
1 — район нереста; *2* — нагула; *3* — зимовки; *4* — пути весенних миграций; *5* — осенних миграций.

пролива и в Каркинитском заливе. Личинки и мальки развиваются в поверхностном слое моря выше термоклина. Наблюдается довольно тесная обратная связь между численностью молоди и тепловым фоном моря в марте — августе.

Промысел ставриды в основном ведется на зимовальных ее скоплениях. Наилучшими условиями для промысла являются температура воды менее 10 °С и маловетренная погода. Ежегодный вылов черноморской ставриды Советского Союза колебался от 0,5 до 38 тыс. т.

Мерланг — *Merlangus merlangius euxinus.* Придонно-пелагический холодолюбивый вид. Тело удлиненное, сжатое с боков, покрытое мелкой чешуей, три спинных и два анальных плавника (рис. 7). Распространен по всему Черному морю, в незначительных количествах встречается в южной части Азовского моря. В Черном море достигает длины 50 см и массы свыше 1 кг. Продолжительность жизни 14—18 лет; обычно в уловах преобладает мерланг не старше 5—6-летнего возраста длиной менее 25 см. Половое созревание происхо-

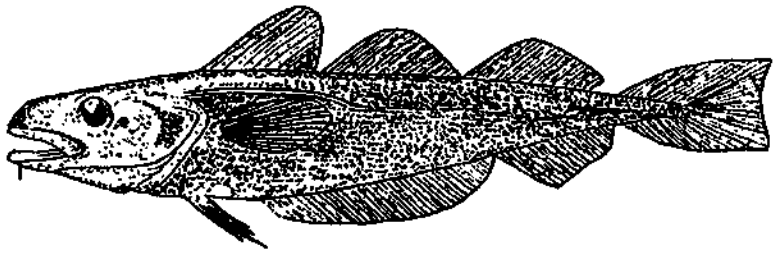

Рис. 7. Черноморский мерланг.

дит по достижению 1—2 лет. Рыба с порционным икрометанием, нерест происходит круглогодично с максимумом в ноябре — марте при температуре воды обычно 6—9 °С. Молодь около года обитает в пелагиали. В холодный период года распространяется преимущественно в верхнем 10-метровом слое по всей акватории моря, за исключением вод с температурой ниже 5 °С. В летнее время молодь держится в толще воды ниже слоя сезонного термоклина, избегает температур выше 10—15 °С.

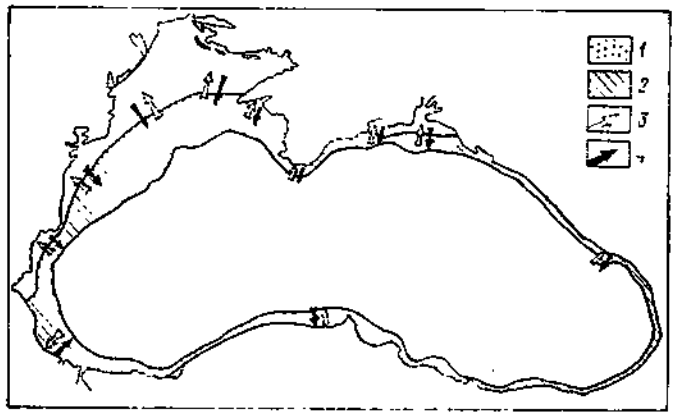

Рис. 8. Распределение и миграции черноморского мерланга.
1 — район нереста и нагула; *2* — нагула; *3* — пути подхода к мелководьям с марта по май и с ноября по январь; *4* — пути отхода с мелководий в июне и в январе — феврале.

Схематично распределение мерланга, связанное с его жизненным циклом, можно представить следующим образом (рис. 8):

— пассивный вынос из нерестилищ, расположенных на шельфе, икры и личинок и последующее обитание молоди в кислородной зоне Черного моря;

— активные миграции подросших мальков в зону прибрежных мелководий;

— переход к придонному обитанию в шельфовой зоне до глубин 20—30 м;

— перемещение по мере взросления на большие глубины к кромке континентального шельфа.

Наряду с этим существуют вертикальные суточные и горизонтальные сезоны миграции.

Вертикальные суточные миграции взрослый мерланг совершает круглогодично. Они носят кормовой характер и выражены в уменьшении концентрации рыб у дна в темное время суток за счет перемещения части особей в толщу воды, иногда вплоть до поверхности.

Молодь мерланга питается зоопланктоном. После перехода к придонному обитанию и по мере роста мерланг становится типичным придонно-пелагическим хищником. Рыба в питании мерланга длиной 6—10 см составляет до 20 %, а длиной 21—30 см — превышает 95 %. В условиях низкой нищевой обеспеченности ярко выражен каннибализм.

Запас мерланга на шельфе Черного моря, исключая 12-мильную прибрежную зону иностранных государств, изменяется в пределах 25—275 тыс. т. Такой широкий диапазон связан с естественными флюктуациями численности поколений. Годовой вылов мерланга причерноморскими странами составляет 7—34 тыс. т, на долю СССР приходится 10—30 % общего вылова. Запас мерланга на шельфе, прилегающем к берегам СССР, недоиспользуется. Вся его добыча СССР в последние годы получается в качестве прилова при траловом промысле шпрота.

1.4.2. Донные и придонные рыбы

Калкан — *Psetta maeotica*. Одна из самых крупных камбал морей умеренной зоны Европы. Встречается повсеместно вдоль побережья Черного моря до глубин 100 м, населяя преимущественно песчаные и илисто-песчаные грунты. Имеет высокое асимметричное тело, обладает способностью изменять окраску левой стороны в зависимости от цвета дна. Как правило, лежит на дне, зарывшись в грунт. Глаза расположены на левой стороне тела (рис. 9).

Калкан достигает длины 1 м, массы 15 кг и возраста 16 лет.

Половое созревание наступает в возрасте 4—6 лет у самцов и 5—7 лет у самок.

Нерест порционный. Нерестится калкан с конца марта до второй половины июня на глубинах 20—60 м при температуре воды 8—12 °С на ограниченной площади. Плодовитость — от 12 до 25 млн. икринок. Икра пелагическая.

Первые 2 мес жизни личинки находятся в пелагиали. В августе мальки появляются в мелководных прибрежных районах моря на глубинах 2—10 м, где живут в течение 2—3 мес. Подрастая, молодь отходит от берегов. Годовики и двухлетки встречаются в биоценозах песка и мелкого ракушечника.

Взрослый калкан малоподвижен, образует локальные скопления, совершающие незначительные перемещения. В начале весны калкан передвигается к берегам и концентрируется на глубинах 30—70 м для нереста. В июне — августе основная часть рыб уходит на более глубокие места, а в октябре — ноябре в поисках пищи калкан приближается к берегам во всех районах Черного моря.

Хищник. Питается рыбой (75 %), ракообразными (24 %) и моллюсками (1 %). Наиболее интенсивно питается зимой на скоплениях хамсы. Летом питается слабо.

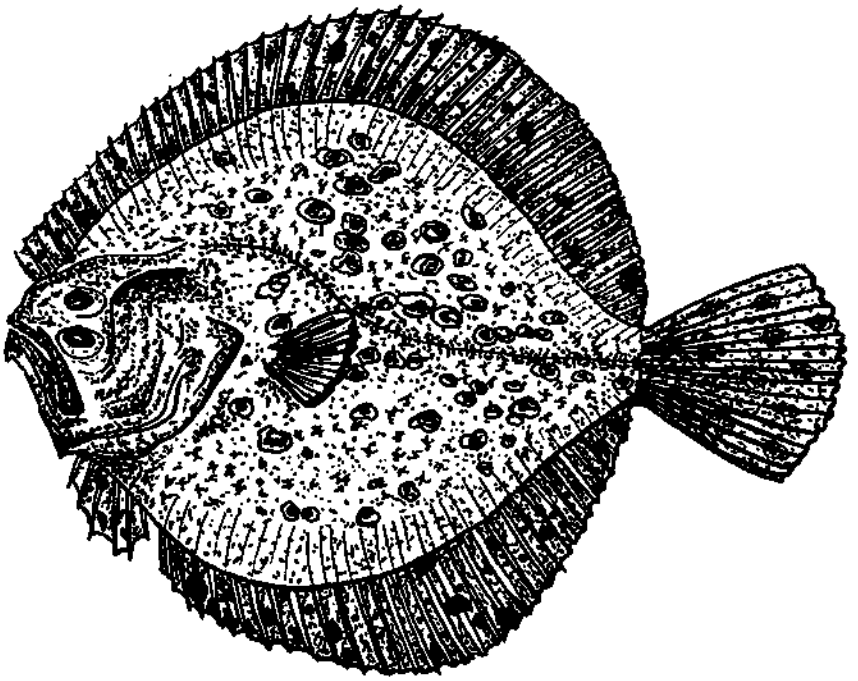

Рис. 9. Калкан.

Крупный калкан врагов практически не имеет. Более мелкие входят в рацион белуги и дельфина-афалины.

Калкан является лимитируемым объектом промысла в Черном море.

В настоящее время, учитывая крайне неудовлетворительное состояние запасов калкана, его длительный жизненный цикл и низкую воспроизводительную способность, для сохранения и дальнейшего восстановления запасов с 1986 г. введен 10-летний запрет на промысел этого объекта.

Черноморская барабуля — *Mullus barbatus ponticus*. В Черном море встречается повсеместно. Обитает в придонных слоях воды и избегает сильно опресненных вод. Предпочитает температуры воды выше 8 °С и соленость 17—18 ‰.

Черноморская барабуля достигает длины 30 см и возраста 12 лет (рис. 10).

Нерестится в весенне-летний период в узкой 5—10-мильной прибрежной полосе по всему побережью. Нерест происходит в поверхностном 20-метровом слое при температуре 15—24 °С и солености 13—17 ‰. Икрометание многопорционное, плодовитость от 10 до 60 тыс. икринок. Икра пелагическая. Подросшие мальки барабули мигрируют в прибрежную зону.

В Черном море живет два стада барабули: «жилое» и «мигрирующее». «Жилое» стадо обитает в юго-восточном районе и совершает миграции весной для нереста и нагула на глубинах 10—20 м и осенью на зимовку на глубины 50—80 м. «Мигрирующее» стадо весной перемещается вдоль берегов Кавказа и Крыма в Керченский пролив и Азовское море на нагул и нерест. Осенью возвращается обратно.

Пищевой рацион на разных стадиях жизни различен. Личинки черноморской барабули питаются планктоном, молодь копеподами и кладоцерами, взрослые рыбы питаются преимущественно ночью и исключительно донными и придонными организмами: моллюсками, бокоплавами, кумацеями, декаподами и полихетами.

Черноморская барабуля входит в рацион донных хищных рыб — белуги, катрана, калкана и мерланга.

Вылов колеблется от 54 т в 1977 г. до 942 т в 1981 г.

Кефалевые — обитатели прибрежных вод.

Тело цилиндрической формы, покрыто мелкой чешуей, причем чешуйный покров имеет и голова (рис. 11). В Черном и Азовском морях кефалевые представлены шестью видами. Промысловое зна-

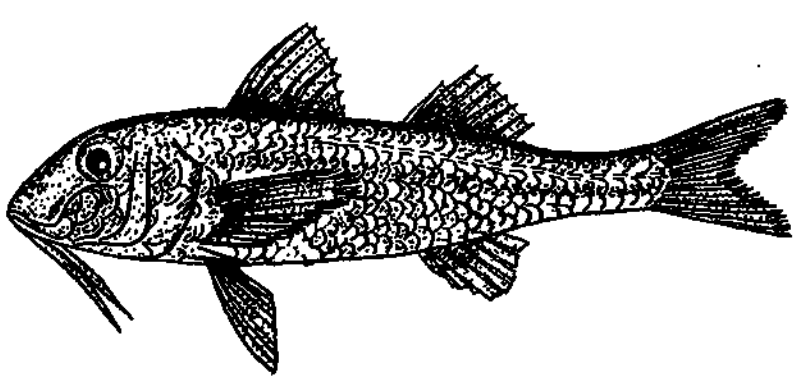

Рис. 10. Черноморская барабуля.

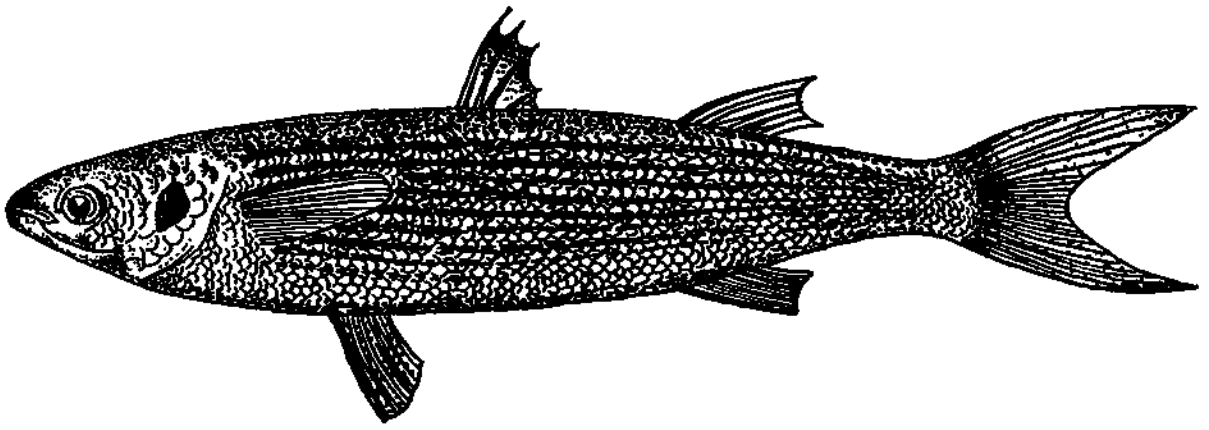

Рис. 11. Сингиль.

чение имеют три из них: сингиль, лобан и остронос. С 60-х гг. запасы и выловы кефалей стабилизировались на очень низком уровне — в пределах 0,12—0,42 тыс. т.

Сингиль — *Liga aurata*. Самый многочисленный вид. Обычная длина от 12 до 54 см. Достигает 20-летнего возраста. Половозрелость наступает на 3—4-е лето жизни. Нерест происходит только в Черном море. Места нереста находятся недалеко от берегов. В это время рыбы формируют «нерестовые гнезда», состоящие из 1 самки и 7—10 самцов. Плодовитость колеблется от 0,8 до 3 млн. икринок. Икрометание единовременное. Икра и личинки пелагические, относятся течением на 50—100 миль от берега. К концу октября молодь подходит к берегам на зимовку, избирая водоемы типа бухт. Перезимовавшие годовики нагуливаются в лиманах, где остаются до осени.

Осенью, с охлаждением воды, ориентируясь на поступающую из моря более теплую воду, двухлетки покидают лиманы. Не успевшая выйти из лиманов рыба до наступления устойчивых холодов, как правило, погибает.

Зимовка взрослых рыб происходит в узкой прибрежной зоне на глубинах 5—25 м в крымском районе и у берегов Кавказа.

Весенние миграции длятся с апреля по июнь. Миграционные пути пролегают вдоль берегов Крыма, Кавказа, через Керченский пролив в Азовское море, а также вдоль западного берега Крыма и Каркинитского залива.

Молодь питается зоопланктоном, являясь конкурентом для большинства видов рыб. Взрослые рыбы и крупная молодь питаются детритом, что лишает их конкуренции с другими видами рыб.

Личинки и мальки сингиля являются объектами питания для хищных рыб и птиц, а взрослые особи также для катрана и дельфинов.

Лобан — *Mugil cephalus*. Самый крупный вид кефалей. Достигает длины 75 см и массы 7 кг, возраста 20 лет (рис. 12). Лобан способен жить длительное время в пресной воде. Избирает солоноватоводные водоемы.

Половое созревание наступает на 3—4-е лето жизни. Нерест длится с мая по август в прибрежной зоне. Плодовитость лобана 1—12 млн. икринок. Икра пелагическая. Развивающаяся икра и личинки относятся от берегов течениями. Уже в конце июня и в июле сеголетки первых генераций подходят к берегам, заходя на нагул не только в лиманы, но и в предустья рек, где молодь может жить до наступления половозрелости.

У лобана имеется дополнительная миграция — возвращение отнерестовавших особей из Черного моря на повторный нагул в Азовское море. Эта посленерестовая миграция особенно четко проявляется при наличии в Керченском проливе потока черноморских вод, сопутствующего направлению хода рыб.

Осенняя миграция лобана начинается уже в сентябре. Зимовка происходит с декабря по март в бухтах у Новороссийска, Геленджика, Сочи, Адлера; в Крымском районе зимует меньшая часть взрослых особей.

Миграционные пути в основной район нагула в Азовском море проходят вблизи от берегов, где

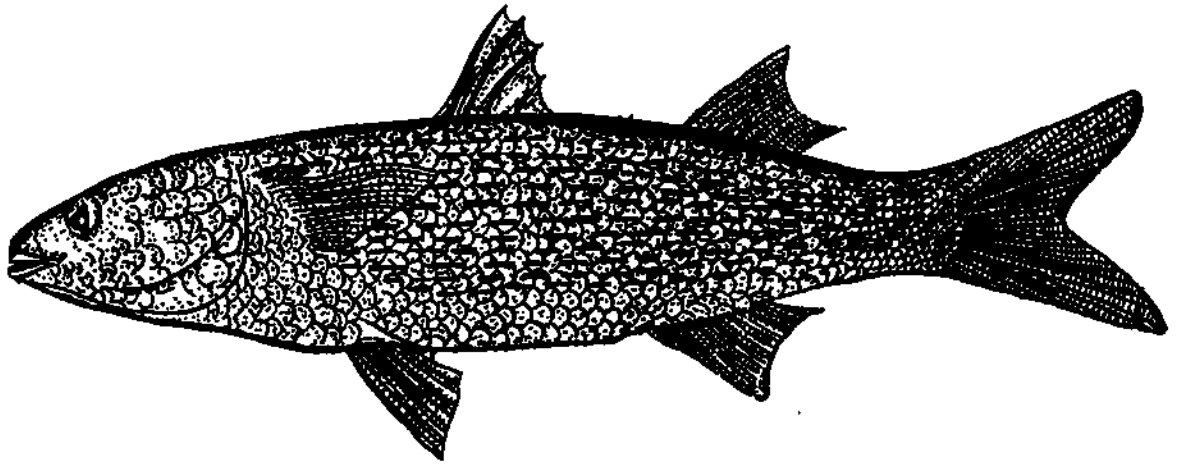

Рис. 12. Лобан.

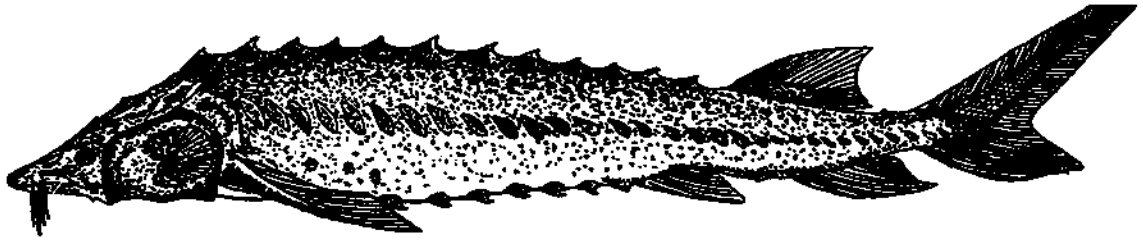

Рис. 13. Русский осетр.

весной лобан появляется при температуре воды 9—11 °С.

Личинки и мальки питаются зоопланктоном, взрослые особи — детритом. Зимой и в период миграций лобан не питается. Естественными врагами взрослых рыб являются только дельфины.

Осетровые. Представляют интерес как наиболее ценные в пищевом отношении рыбы. Однако в связи с низкой численностью их промысел строго регламентируется. В 80-е гг. вылов СССР осетровых видов в Черном море не превышал 40—60 т за год. В целях повышения численности всех видов осетровых СССР ведутся значительные работы по их воспроизводству.

Представители семейства осетровых имеют веретенообразное тело с пятью рядами костных жучек. Верхняя лопасть хвостового плавника удлинена.

Русский осетр — *Acipenser guldenstadti.* Довольно обычный вид, встречается вдоль всего черноморского побережья до глубины 110 м. Переносит широкий диапазон изменения солености воды, относится к проходным рыбам.

Максимальная длина русского осетра в Черном море 2,5 м, масса — 130 кг (рис. 13).

Основными местами нереста русского осетра являются реки Днепр, Дунай, Риони. Ход на нерест в р. Днепр начинается в конце марта и заканчивается до начала июня. В р. Дунай — с февраля до конца апреля и с мая по август — сентябрь. Плодовитость 250—280 тыс. икринок.

Личинки и молодь русского осетра первые 3—4 мес продолжают оставаться в реке и лишь затем для нагула скатываются в море. Половозрелость наступает в 8—12 лет у самцов, в 12—15 лет — у самок.

Белуга — *Huso huso.* Встречается по всему шельфу Черного моря до глубин 160—180 м. Относится к проходным рыбам (рис. 14). Рыбы длиной более 3 м, массой 300 кг и в возрасте старше 30 лет встречаются крайне редко.

Половозрелость наступает в возрасте 11—14 лет. Нерест белуги происходит преимущественно в нижнем течении р. Дуная, реже — в реках Днепр, Днестр и других. Нерестится не каждый год. Ход на нерест начинается с января (у крупных особей) по июнь. Личинки и мальки белуги появляются в дельтах рек в конце мая — июня. Молодь до достижения половозрелости нагуливается в опресненных районах моря.

Большая часть крупных белуг нагуливается в Крымском районе, совершая незначительные вертикальные миграции с меньших глубин на большие и обратно, обусловленные перемещением объектов питания и изменениями температуры воды.

Рацион питания белуги в основном составляют хамса, шпрот, барабуля, бычки и креветки, у молоди — мизиды и креветки.

В связи с очень большим темпом роста белуги, конкуренты и враги этого вида практически отсутствуют.

Севрюга — *Acipenser sfellatus.* Довольно распространенный вид в Черном море. Средняя длина самок севрюги 115—130 см, самцов 85—115 см (рис. 15).

Весной и летом основные концентрации севрюги приурочены к мелководной части северо-западного района; в крымском районе она встречается реже.

На нерест основная масса заходит в р. Дунай. Ход начинается в марте — апреле и продолжается до декабря, прекращаясь на июль — сентябрь. Размножается при температуре 4—11 °С. В р. Днепре также существует осенний и весенний ход.

Основу питания севрюги составляют полихеты и ракообразные, реже — моллюски и рыба. Молодь питается мизидами, копеподами, хирономидами, полихетами.

Пятнистая колючая акула (катран) — *Squalus acauthias.* Морская стайная живородящая рыба. Форма тела удлиненная. Верхняя полость хвостового плавника увеличена. Перед каждым спинным плавником имеет по одному колючему шипу.

Обычная длина рыб до 150 см, масса до 15 кг, возраст до 20 лет (рис. 16).

Обитает на шельфе в придонном слое на глубине 60—90 м.

Рис. 14. Белуга.

Рис. 15. Севрюга.

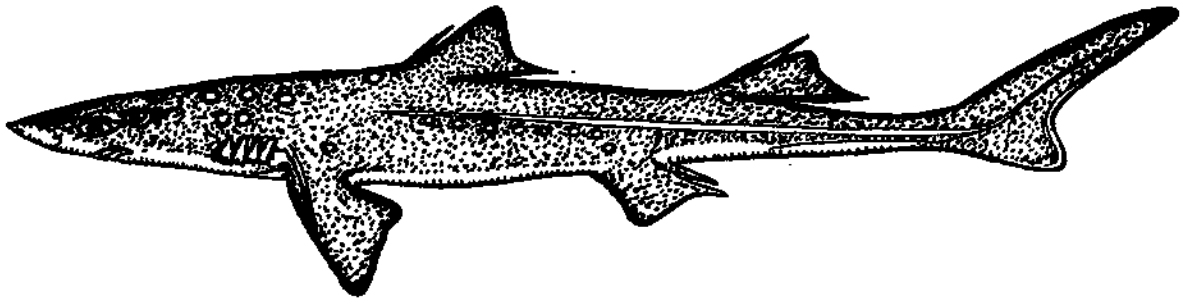

Рис. 16. Катран.

Половая зрелость наступает поздно: у самок в 13—17 лет, у самцов в 13—14 лет. Размножение происходит круглый год. Для рождения молоди самки выходят в прибрежную зону на мелководья с глубинами 10—35 м у северного побережья моря.

Катран совершает длительные регулярные миграции, сроки и направление которых определяются характером поведения кормовых объектов. Осенние кормовые миграции вдоль шельфа СССР направлены к местам зимовальных скоплений хамсы и черноморской ставриды в юго-восточном районе и у берегов Крыма. С марта по май распространяется по всему шельфу. С июня самки совершают нерестовые миграции в прибрежную зону, затем, после рождения молоди, отходят для откорма на глубины более 30—35 м.

На путях осенних миграций, в местах зимнего откорма и в районах массового размножения, образуют промысловые скопления.

Хищник, питается в основном рыбой: хамсой, шпротом, ставридой, мерлангом. Естественных врагов не имеет. Самки на мелководьях в период размножения потребляют значительное количество ракообразных.

В Черном море является объектом промысла. Вылов СССР до 2 тыс. т.

Колючий скат, морская лисица — *Raja clavata.* Имеет четырехугольную форму тела. Ширина больше длины, хвост покрыт шипами (рис. 17). Донная рыба. Обитает на глубинах до 100 м, предпочитает песчано-галечные и песчано-ракушечные грунты. Длина рыб без хвоста 25—60 см, масса — 3—4,4 кг.

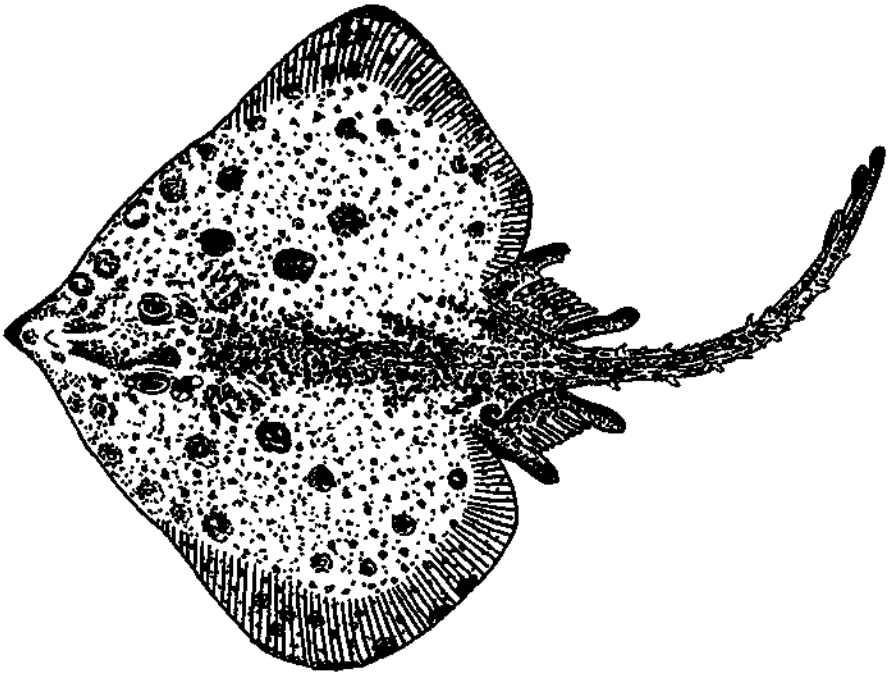

Рис. 17. Колючий скат.

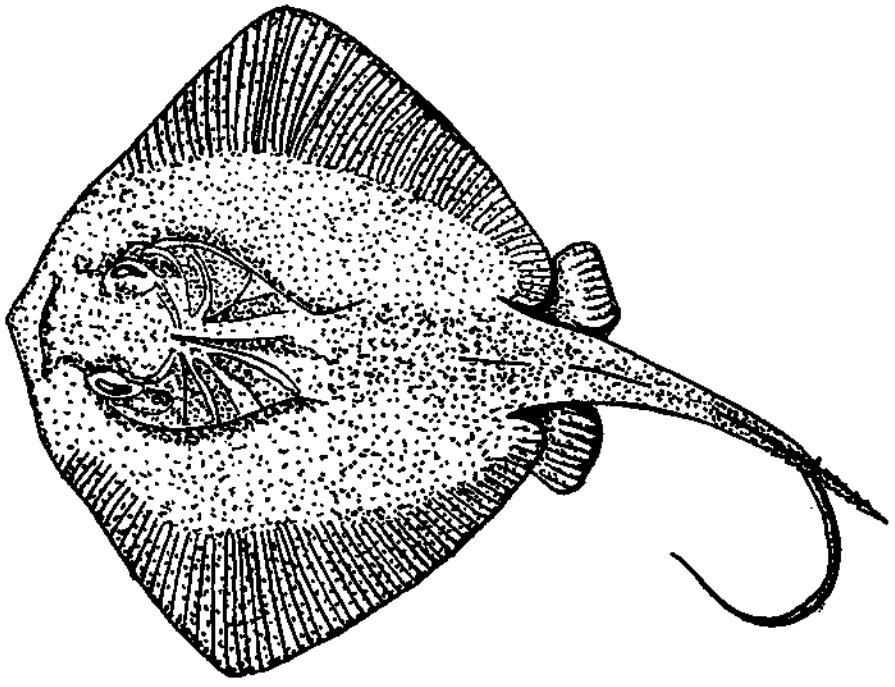

Рис. 18. Хвостокол.

Самки откладывают яйца, заключенные в роговые капсулы (9 × 6 см), на глубинах от 8 до 25 м при температуре воды у дна более 10 °С. В сезон размножения (июль — август) самка откладывает 50—60 яиц.

Совершает местные перемещения: весной подходит к берегу на глубину 35—40 м, осенью отходит на глубины за 40 м. При размножении распределяется на глубинах 6—30 м, образуя промысловые скопления.

Хищник. Питается хамсой, ставридой, мерлангом и ракообразными, реже — червями. Пищевой конкурент для катрана, калкана, осетровых, хвостоколов, бычков. Естественных врагов в Черном море нет.

Имеет второстепенное промысловое значение.

Хвостокол, морской кот — *Dasyatis pastinaca.* Тело имеет голое, гладкое, округлой формы. Хвост бичевидный с одним зазубренным шипом (рис. 18).

Теплолюбивая донная рыба. Предпочитает песчаные грунты, часто зарывается в песок. Летом придерживается глубин 10—20 м, зимой 60—90 м.

Обычная длина 30—70 см, масса 3—8 кг, реже встречаются особи до 1 м и массой 21 кг.

Живородящая рыба. Эмбрионы развиваются около года. Мальки рождаются в июле — августе на мелководьях с температурой воды у дна более 15 °С.

Совершают длительные миграции. У берегов СССР зимуют в юго-восточной части моря. Весной мигрируют вдоль шельфа. Заходит в Азовское море.

Хищник. Потребляет мелкую рыбу, моллюсков, ракообразных.

Имеет второстепенное промысловое значение.

1.4.3. Ихтиопланктон

Формирование численности поколений рыб происходит в течение ранних периодов жизни — эмбриональном, личиночном и мальковом. Расширение ареала вида, приспособление его к новым условиям среды также в значительной степени определяется эколого-физиологической лабильностью популяций в раннем онтогенезе. Следовательно, изучение динамики численности промысловых рыб, а соответственно, и решение проблемы долгосрочного прогнозирования состояния запасов не возможны без выяснения закономерностей выживания рыб в раннем онтогенезе.

Количественный и качественный состав ихтиопланктона Черного моря подвержен существенным сезонным и межгодовым колебаниям, влияющим на пополнение рыб, которое часто определяет численность популяций. Поэтому изучение динамики численности икры и молоди черноморских рыб имеет большое теоретическое и практическое значение.

В работе использованы материалы по сезонной и межгодовой изменчивости ихтиопланктона Черного моря за 1981—1987 гг., собранные сотрудниками АзЧерНИРО во время стандартных ихтиопланктонных съемок. Сбор икры и мелких (до 15 мм) личинок летненерестующих рыб производили ежегодно в четырех съемках на 300 станциях с мая по октябрь сетями Богорова — Расса 80/113 и «Бонго-61» в горизонте 25—0 м. Зимний ихтиопланктон в последние годы собирали также в четырех съемках с ноября по апрель на 300 станциях теми же орудиями лова в слое воды 100—0 м. Учет подросших (более 15 мм) личинок и мальков вели на 360 станциях мальковым пелагическим тралом, облавливающим верхние слои воды [26].

По материалам съемок получены данные о видовом и размерном составе икры, личинок и мальков промысловых черноморских рыб. Расчет численности икры и молоди проводили площадным методом. При этом акватория моря разбивалась на участки (страты) с близкими значениями уловов, а затем определялись площади всех участков и средние уловы в стратах.

Урожайность поколений зимненерестующих рыб оценивали по апрельско-майским съемкам, летненерестующих — по июльско-августовским.

Таблица 5

Видовой состав молоди рыб в Черном море по данным зимних учетных съемок

Вид рыб	Средний улов, шт.						
	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Шпрот	7 077,2	162 009,7	8 803,6	29 971,2	18 117,3	2 178,0	4 683,0
Мерланг	21,4	130,2	65,6	39,7	28,9	17,5	4,5
Песчанка	0,1	4,7	6,6	1,7	5,5	3,7	0,2
Морская игла	0,1	65,7	8,2	11,0	2,6	3,3	6,1
Морской налим	<0,1	1,5	0,3	1,4	1,2	0,1	0,2
Сингиль	0,3	0,2	0,1	0,3	0,4	0	<0,1
Хамса	0	7,5	<0,1	0,5	1,6	0,2	0,5
Бычки	1,3	1,3	7,0	0	0,2	0,8	0
Атерина	0	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	0	<0,1
Морские собачки	0,2	6,4	0	0	<0,1	<0,1	0
Камбала-глосса	<0,1	<0,1	0	0	0	<0,1	<0,1
Ставрида	0	0,2	0	0,2	0	0	0
Лобан	0	0	0	0	0	<0,1	0
Сарган	0	0	0	0	0	0,1	0
Тюлька	0	0	0	0	0	0	<0,1

В ихтиофауне Черного моря насчитывается 150 [76], а вместе с азовской — 163 вида и подвида рыб [73]. Собственно морских и солоноватоводных из них — 144 вида [74].

По данным Т. В. Дехник (1973), 56 видов и подвидов черноморских рыб проходят пелагические фазы развития (икра, личинки). За период с 1964 по 1970 г. (сборы проб осуществлялись преимущественно в теплые месяцы) зарегистрированы икра, личинки и мальки 54 видов [15]. По нашим данным, в зимних и летних пробах из икорных сетей отмечено около 30 видов икры и личинок. В уловах мальковых тралов зафиксировано 33 вида рыб (бычки, морские собачки и морские иглы до вида не дифференцировались) — табл. 5 и 6.

Молодь некоторых видов рыб прибрежного комплекса, таких, как светлый горбыль, полосатик, гребенчатый губан, присоска и других, в наших пробах не встречалась. По-видимому, это произошло, во-первых, из-за того, что самые ближние станции мы выполняли в одной миле от берега и, во-вторых, изменения, происходящие в экосистеме Черного моря под воздействием антропогенного

Таблица 6

Видовой состав молоди рыб в Черном море по данным летних учетных съемок

Вид рыб	Средний улов, шт.						
	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987
Хамса	757,0	196,4	122,8	892,1	515,0	1420,7	2456,5
Ставрида	22,7	17,2	114,6	12,5	18,9	28,6	126,6
Барабуля	4,6	0,2	23,4	0,5	2,0	15,7	5,5
Луфарь	6,6	0,6	0,4	0,5	2,0	0,2	1,0
Собачки	6,5	5,1	2,7	9,9	32,2	1,9	8,6
Морские иглы	0,2	<0,1	<0,1	0,1	0,3	<0,1	5,3
Морской конек	0,1	0	0	0	0,1	0	0,2
Морской ерш	0,1	0	0	0	<0,1	<0,1	1,1
Лобан	<0,1	0,2	3,0	0,4	1,3	0,2	<0,1
Сингиль	0	0	0,5	<0,1	1,8	<0,1	0,1
Остронос	<0,1	0,1	0,3	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Сарган	<0,1	0	0,2	0,2	0,1	<0,1	0
Шпрот	0	<0,1	1,1	0	0,1	0	17,0
Морской петух	0	<0,1	0	0	<0,1	0	0
Камбала-калкан	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0	0
Арноглосса	0	0	<0,1	0	0	<0,1	<0,1
Морской язык	0	0	<0,1	0	0	0,2	0
Морская ласточка	0	<0,1	0	0	0	0	0
Каменный окунь	0	<0,1	0	0	0	0	0
Морская корова	0	0	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	<0,1
Песчанка	0	0,4	0	0	0	0	0
Бычки	<0,1	<0,1	<0,1	0,4	0,1	<0,1	<0,1
Атерина	0	<0,1	0	0	0	<0,1	0
Морской дракон	0	<0,1	0	0	0	0	0
Зубарик	<0,1	0	0	0	0,4	<0,1	<0,1
Темный горбыль	0	0	<0,1	0	0,3	0	<0,1
Морской карась	0	0	0	0	<0,1	0	0
Пеламида	0	0	0	0	<0,1	0	<0,1
Камбала-глосса	0	0	0	0	<0,1	0	0
Колюшка трехиглая	0	0	0	0	<0,1	<0,1	0
Мерланг	0	0	0	0	0	0	<0,1
Морской налим	0	0	0	0	0	0	<0,1

фактора [81], отрицательно влияют на численность некоторых видов рыб.

Индексы видового разнообразия молоди рассчитаны нами по июльско-августовским съемкам: в это время года ихтиопланктон в Черном море представлен наибольшим числом видов. Изменения индексов по годам в целом пропорциональны

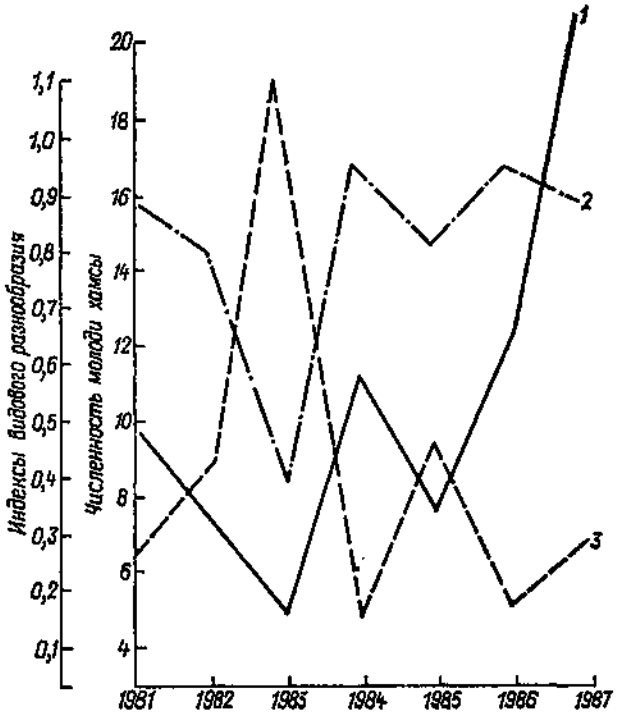

Рис. 19. Изменения численности молоди хамсы (млрд экз.) и индексов видового разнообразия по годам.

1 — численность молоди хамсы; *2* — индекс Симпсона; *3* — индекс Шеннона.

колебаниям численности молоди основного промыслового объекта на бассейне — черноморской хамсы (анчоуса) (рис. 19).

Зимний и летний ихтиопланктонные комплексы в Черном море хорошо выражены. Основу зимнего ихтиопланктона составляют икра и молодь шпрота и мерланга. Нерест обоих видов сильно растянут, однако его максимум приходится на холодное время года (конец ноября — март). Поэтому в апреле — начале мая в верхних слоях воды наблюдается наиболее высокая численность молоди шпрота и мерланга, которая определяет урожайность учитываемых поколений [93, 98].

Массовый нерест шпрота происходит практически по всему Черному морю как на шельфе, так и за пределами шельфовой зоны [63]. В связи с этим его молодь в зимне-весенний период встречается почти по всей акватории моря. Наиболее плотные концентрации личинок и мальков шпрота в 1981—1987 гг. отмечались нами в разных районах (рис. 20). Все же можно выделить участки, где ежегодно наблюдаются высокие уловы — это северо-восточная часть моря и район свала глубин на северо-западе. Изменения численности молоди черноморского шпрота в западной и восточной частях моря происходят не синхронно (табл. 7). По-видимому, эти изменения могут быть обусловлены нестабильным характером зимней циркуляции вод, колебаниями температуры воды и наличием корма.

Нерест мерланга, в отличие от шпрота, происходит в пределах шельфовой зоны, обычно над глубинами 50—120 м. В весенний период в этих же районах или в непосредственной близости от них наблюдаются наиболее плотные концентрации его молоди (рис. 21). В результате пассивного переноса течениями молодь мерланга выносится за пределы шельфа, где в отдельные годы встречаются

Таблица 7

Относительная численность молоди основных зимненерестующих рыб Черного моря, млрд экз.

Год	Район		Всего
	западный	восточный	
	Шпрот		
1981	20,7	48,0	68,7
1982	46,6	321,7	368,3
1983	49,5	37,4	86,9
1984	273,5	3,1	276,6
1985	142,1	73,2	215,3
1986	13,9	8,2	22,1
1987	10,2	82,2	92,4
	Мерланг		
1981	—	—	—
1982	5,3	14,1	19,4
1983	5,2	5,3	10,5
1984	1,2	1,9	3,1
1985	2,1	2,4	4,5
1986	2,7	1,1	3,8
1987	3,7	3,6	7,3

участки с высокой плотностью ее скоплений. Следует отметить, что распределение личинок и мальков мерланга определяется выживанием молоди, изменениями в интенсивности нереста, направлениями пассивных миграций и носит пятнистый характер.

По мере весеннего прогрева моря молодь шпрота и мерланга покидает поверхностные слои воды. Во время летних учетных съемок их сеголетки встречаются в уловах крайне редко (см. табл. 6).

В июне — июле 1983 г. в пределах шельфовой зоны северо-восточной части Черного моря в толще воды под слоем термоклина гидроакустическими приборами неоднократно регистрировалась молодь мерланга в виде частных косяков высотой от 3 до 10 м и протяженностью от 10 до 50 м. Уловы контрольных тралений состояли исключительно из сеголетков длиной 6—9 см. В августе 1979 г. в северо-западной части моря над глубинами 300—500 м были обнаружены плотные скопления молоди шпрота на горизонте 90—100 м. Эти наблюдения свидетельствуют о том, что в летний период молодь шпрота и мерланга практически недоступна для традиционного орудия ее учета — малькового пелагического трала.

Осенью, с понижением температуры воды, сеголетки шпрота и мерланга вновь появляются в поверхностных слоях моря.

Летний ихтиопланктон Черного моря в основном представлен икрой, личинками и мальками хамсы, ставриды и барабули (султанки).

Для хамсы и ставриды характерно наиболее широкое освоение пелагиали моря для нереста и нагула молоди. Нерестилища этих рыб разобщены

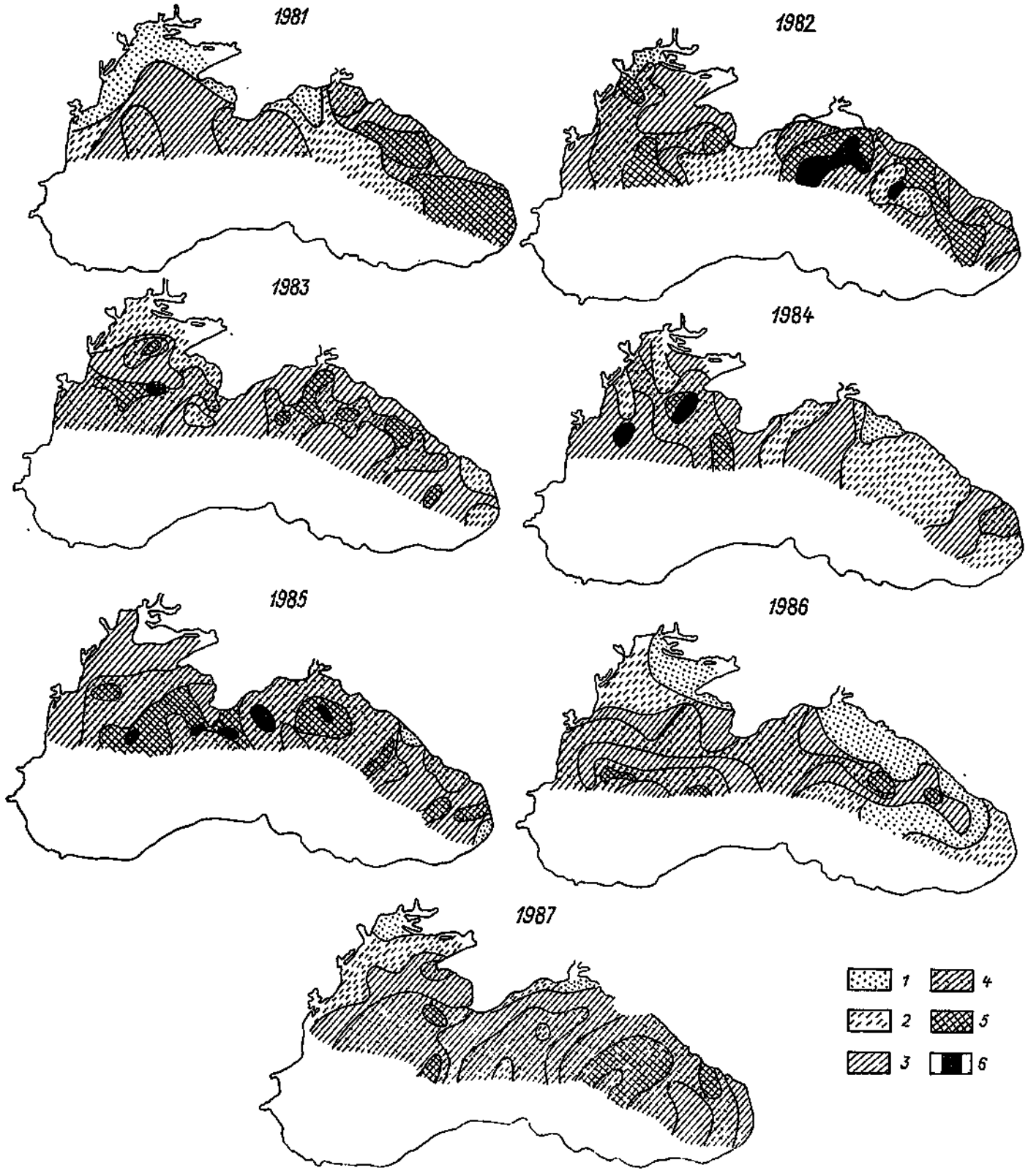

Рис. 20. Распределение молоди шпрота в Черном море в апреле — мае 1981—1987 гг., экз.
1 — 0—10; *2* — 11—100; *3* — 101—1 000; *4* — 1 001—10 000; *5* — 10 001—100 000; *6* — >100 000.

но в отдельные годы, при особенно благоприятных условиях размножения, их нерест происходит почти на всей акватории моря.

Пик нереста хамсы, ставриды и барабули обычно приходится на июль — начало августа. Однако особенности термического режима могут приводить к смещению сроков начала массового нереста. Например, в 1983 г. при быстром прогреве воды в восточной части моря, значительное количество выметанной икры было отмечено уже в начале июня (табл. 8).

Наибольшая плотность икры, личинок и мальков хамсы ранее отмечалась в опресненных районах моря вдоль западных и северо-западных берегов и в узкой прибрежной зоне у Кавказского побережья [28, 29, 64]. В 1981—1987 гг. характер

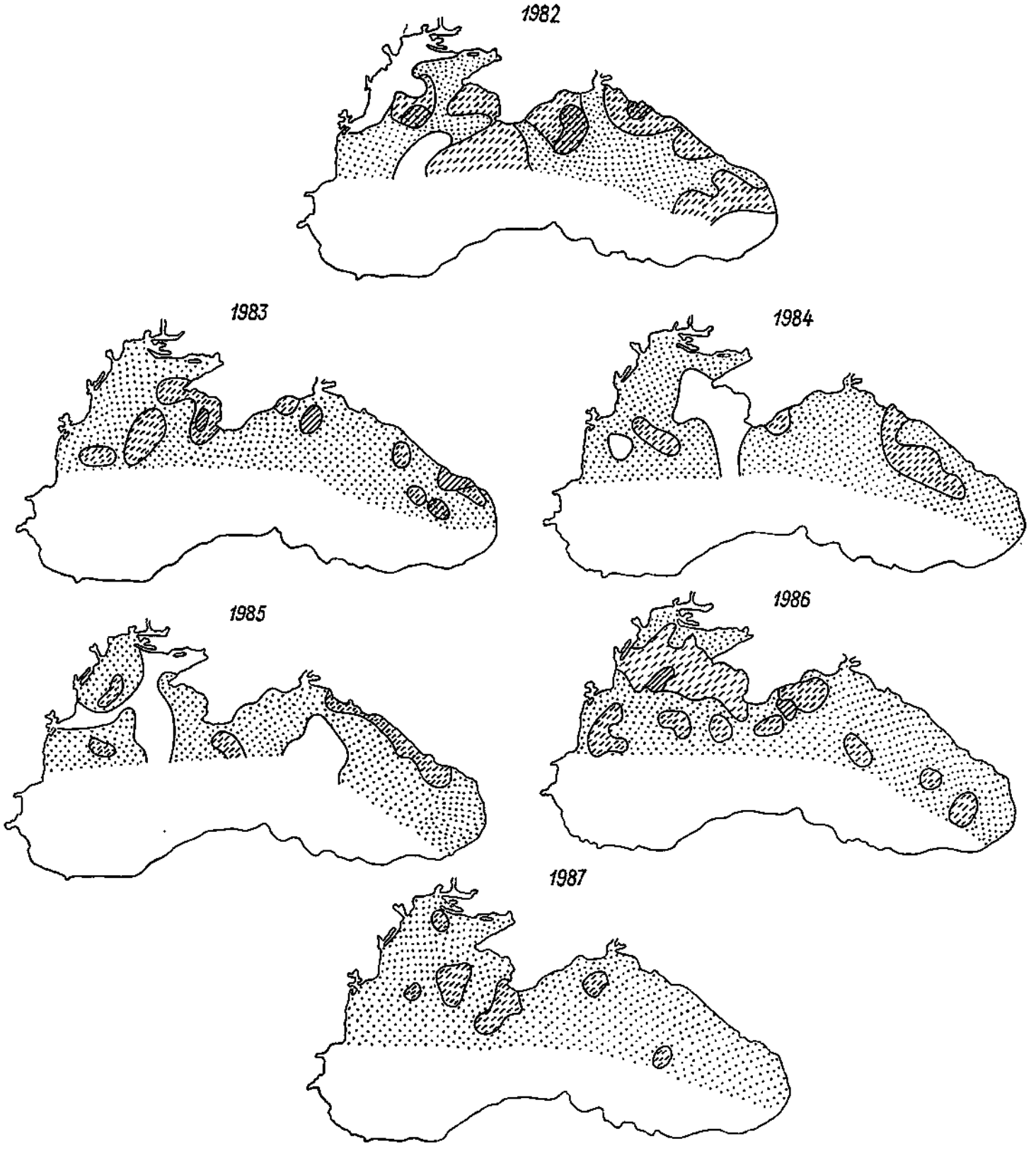

Рис. 21. Распределение молоди мерланга в Черном море в апреле — мае 1982—1987 гг., экз.
Усл. обозначения см. рис. 20.

распределения молоди хамсы не изменился (рис. 22). При этом в разные годы основная часть пополнения формировалась в различных районах моря. И если личинок, учтенных икорными сетями, как правило, больше в восточной части моря, то определяющая поколение подросшая молодь, облавливаемая мальковым тралом, преобладала на западе (табл. 9). По-видимому, это объясняется тем, что в восточной части Черного моря, где температура поверхности воды выше, нерест продолжительнее, а в северо-западной — он по срокам короче, но интенсивнее.

В открытых районах моря концентрация молоди хамсы всегда низкая, за исключением участ-

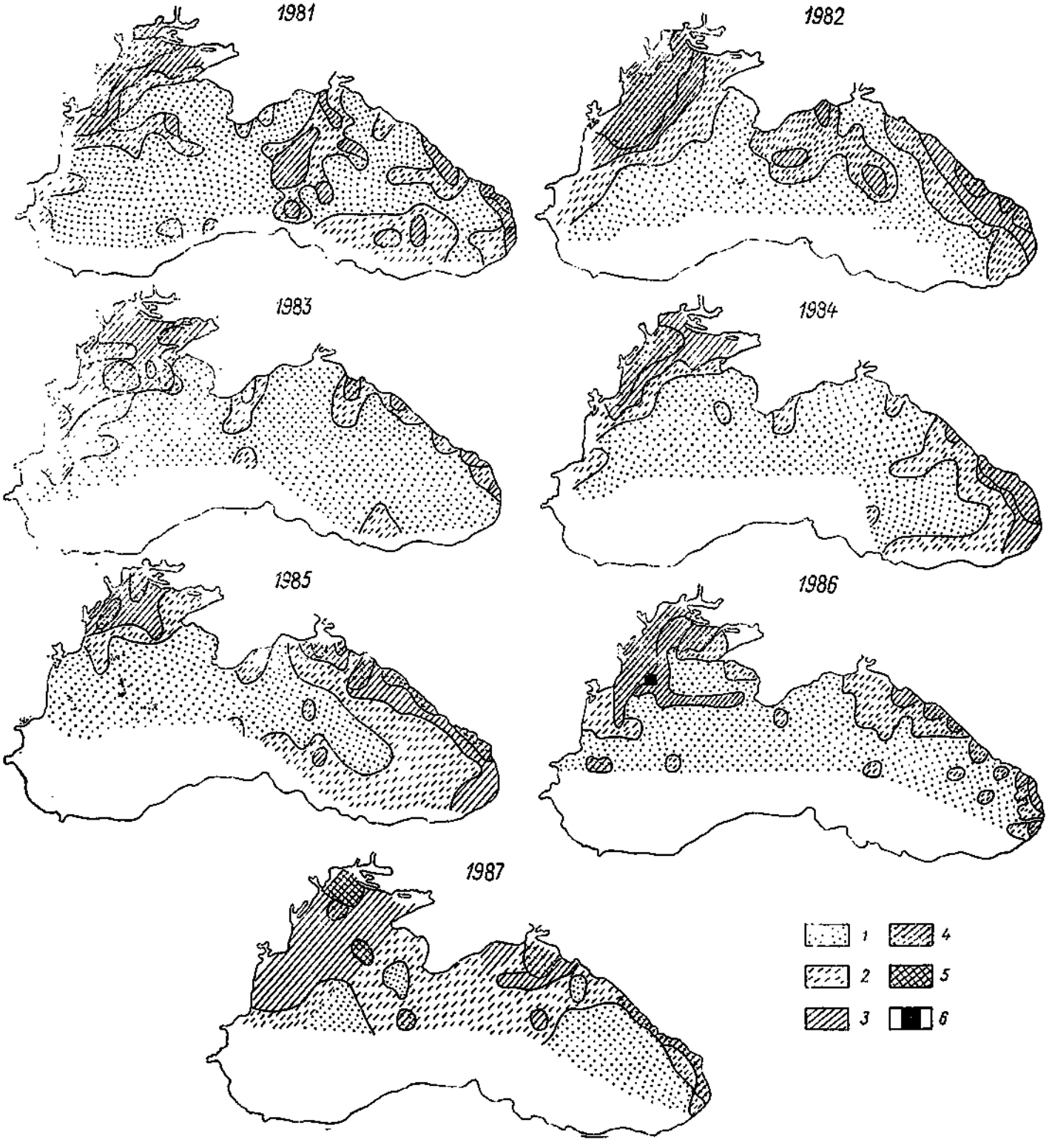

Рис. 22. Распределение молоди хамсы в Черном море в июле — августе 1981—1987 гг., экз.
1 — 0—10; *2* — 11—100; *3* — 101—1 000; *4* — 1 000—10 000; *5* — 10 001—50 000; *6* — >50 000.

ков, прилегающих к границе двух основных водных круговоротов. Причиной этому могут служить: относительно высокая концентрация кормового зоопланктона в данном районе [81], а также вынос личинок и мальков хамсы из прибрежных зон. Нами отмечено некоторое увеличение уловов личинок и мальков хамсы вблизи турецких территориальных вод по сравнению с центральной частью моря. Вероятно, южный шельф моря также является местом интенсивного нереста данного вида.

Пути миграций подросшей молоди хамсы из северо-западной части моря к местам зимовки в юго-восточную часть мало изучены. Вероятнее всего, сеголетки хамсы передвигаются с запада на восток, придерживаясь турецких берегов.

Икра, личинки и мальки ставриды в рассматриваемые годы наиболее часто встречались у берегов Кавказа от Туапсе до Батуми и у берегов Крыма. В 1981 и 1983 гг. высокие уловы ее молоди были зафиксированы в районе Бургас — Варна.

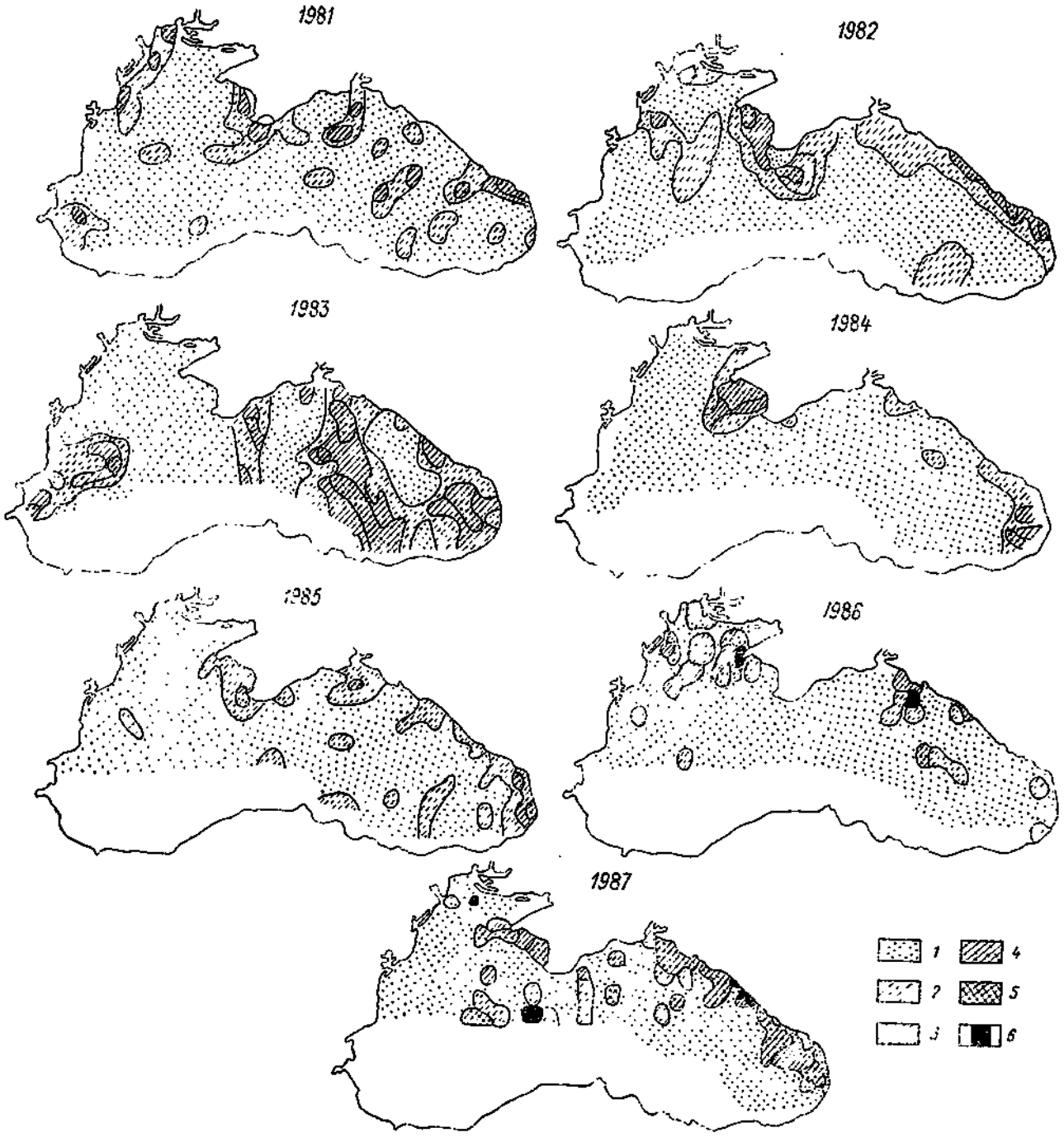

Рис. 23. Распределение молоди ставриды в Черном море в июле — августе 1981—1987 гг., экз.
1 — 0—10; *2* — 11—50; *3* — 51—100; *4* — 101—500; *5* — 501—1 000; *6* — >1 000.

Отметим, что для личинок и мальков ставриды характерно то, что они часто образуют скопления в открытых районах моря (рис. 23). Это связано с несколько иным, чем у молоди хамсы, типом и спектром питания. Колебания численности личинок и мальков ставриды по годам отражены в табл. 9.

Нерест барабули происходит в прибрежной зоне, что связано с особенностями биологии взрослой рыбы, обитающей в придонных слоях на небольшой глубине [63]. В 1981—1987 гг. распределение икры, личинок и мальков барабули имело пятнистый характер. Постоянно ее икра и молодь наблюдалась лишь в районах Керченского предпроливья и Крыма. Большие уловы молоди были зафиксированы в 1983 и 1986 гг., причем в основном у берегов Кавказа и Керченского предпроливья (рис. 24). Максимум численности молоди барабули отмечен в 1983 г. (см. табл. 9).

Следует отметить, что большое количество выметанной икры промысловых летненерестующих рыб Черного моря не всегда соответствует большей численности молоди этих видов, и наоборот (см. табл. 8 и 9). По-видимому, увеличение или уменьшение количества икры не оказывает значительного влияния на урожайность поколений этих рыб.

В заключение отметим.

Изменения в экосистеме Черного моря под воздействием антропогенного фактора существенно не повлияли на характер распределения и численность пелагической икры и молоди основных промысловых рыб. Наблюдалось лишь небольшое

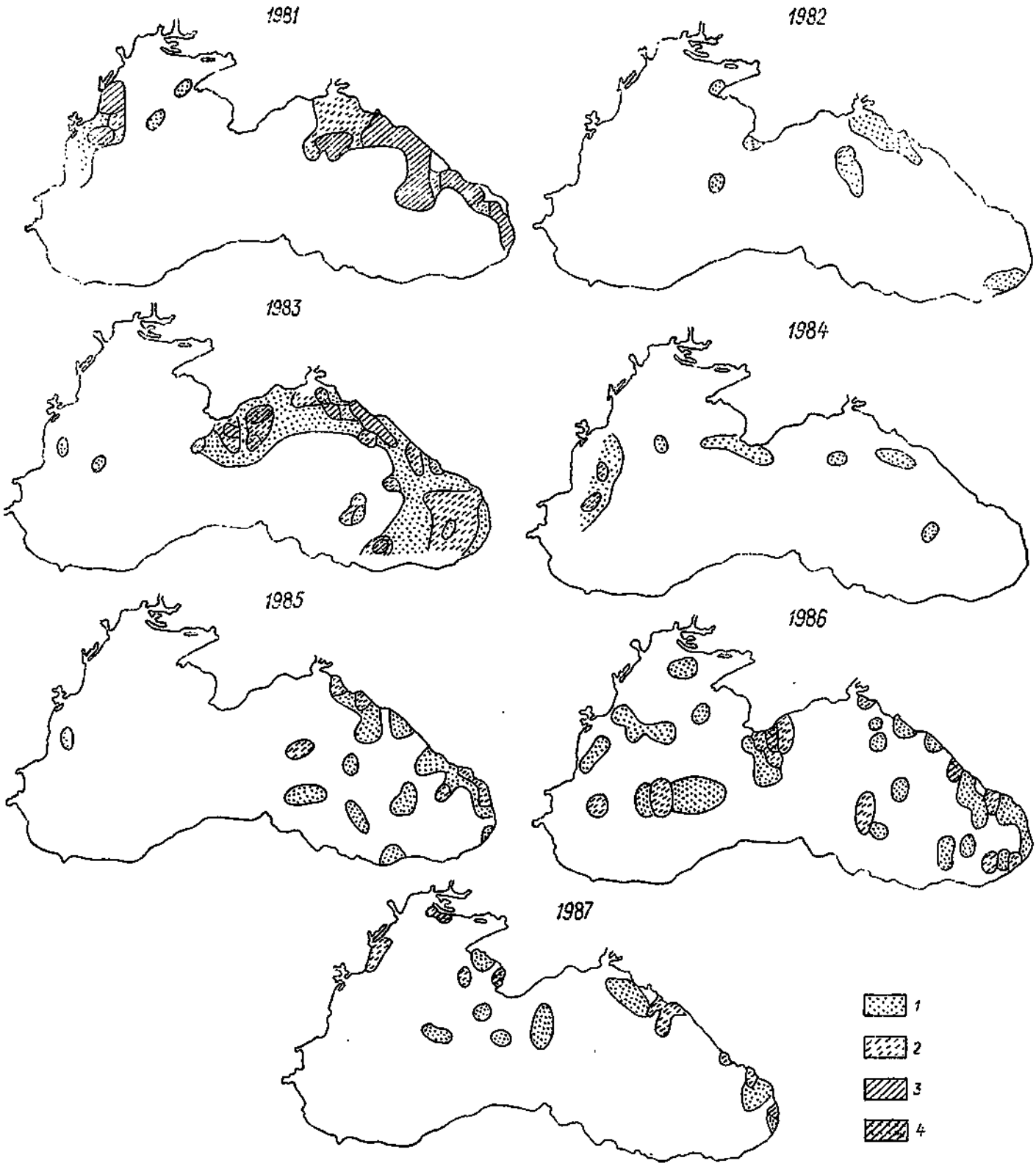

Рис. 24. Распределение молоди барабули в Черном море в июле — августе 1981—1987 гг., экз.
1 — 0—10; *2* — 11—50; *3* — 51—100; *4* — >100.

уменьшение количества молоди некоторых видов рыб прибрежного комплекса.

Изменения индексов видового разнообразия в основном пропорциональны колебаниям численности молоди главного промыслового объекта на бассейне — черноморской хамсы.

Увеличение или уменьшение выметанной икры не оказывало значительного влияния на урожайность поколений промысловых летненерестующих рыб.

Всего за рассматриваемый период в наших пробах зарегистрировано более 30 видов икры, личинок и мальков рыб (бычки, морские собачки и морские иглы до вида не дифференцировались).

Таблица 8

Среднее количество икры основных летненерестующих рыб Черного моря, экз./м²

Год	Май — июнь		Июнь — июль		Июль — август	
	Запад	Восток	Запад	Восток	Запад	Восток
			Хамса			
1981	4,71	0,84	—	—	20,83	8,87
1982	9,32	9,70	—	—	16,00	11,77
1983	9,64	17,83	—	—	3,39	12,37
1984	15,08	—	5,74	1,92	15,82	18,47
1985	9,57	2,40	18,99	1,28	5,00	1,39
1986	6,75	2,34	8,03	4,70	7,14	6,59
1987	1,63	0,13	8,41	2,64	2,03	5,21
			Ставрида			
1981	0	0	—	—	1,64	3,12
1982	0,02	1,88	—	—	0,94	4,53
1983	0	4,81	—	—	0,01	0,70
1984	0,11	—	0,55	1,01	3,72	5,54
1985	0,83	1,28	2,63	2,83	0,42	0,75
1986	0,20	0,09	11,02	3,03	0,37	0,71
1987	0,11	0,10	4,42	5,88	0,37	2,88
			Барабуля			
1981	0	0	—	—	0	0,03
1982	0,01	0,90	—	—	0,04	0,44
1983	0,03	2,32	—	—	0	0,45
1984	0,03	—	0,44	0,32	2,00	1,86
1985	0,96	0,43	1,94	0,97	0,22	0,15
1986	0,01	0,10	1,32	0,75	0,07	0,12
1987	0	0	0,91	0,27	0,13	0,77

Таблица 9

Относительная численность молоди основных летненерестующих рыб Черного моря, млрд экз.

Год	Молодь из икорных сетей			Молодь из мальковых тралов		
	Запад	Восток	Всего	Запад	Восток	Всего
			Хамса			
1981	240,0	560,0	800,0	5,7	4,3	10,0
1982	112,4	113,2	225,6	5,8	1,7	7,5
1983	21,6	534,0	555,6	4,7	0,2	4,9
1984	132,4	120,4	252,8	8,6	2,5	11,1
1985	37,6	12,8	50,4	2,5	5,0	7,5
1986	327,2	292,5	619,7	8,9	3,2	12,1
1987	152,8	208,4	361,2	15,8	4,8	20,6
			Ставрида			
1981	—	—	—	1,62	1,89	3,51
1982	16,92	42,80	59,72	0,21	0,14	0,35
1983	5,60	152,00	157,60	1,07	5,20	6,27
1984	5,12	118,40	123,52	0,20	0,12	0,32
1985	13,36	7,20	20,56	0,14	0,51	0,65
1986	150,40	56,00	206,40	0,29	0,14	0,43
1987	66,86	231,67	298,53	0,22	1,04	1,26
			Барабуля			
1981	—	—	—	0,03	0,04	0,07
1982	1,00	2,12	3,12	0	0,01	0,01
1983	0,84	8,64	9,48	0,16	0,23	0,39
1984	0	0,72	0,72	0,01	0,01	0,02
1985	0	0,20	0,20	0	0,07	0,07
1986	0,49	1,75	2,24	0,08	0,05	0,13
1987	0,48	0,52	1,00	0,02	0,02	0,04

2. МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТИВНОСТИ ВОД ЧЕРНОГО МОРЯ

Процессы физической, химической и биологической природы неразрывно связаны между собой и находятся в постоянном взаимодействии. Гидрологические факторы считаются первоосновой большинства биологических явлений, наблюдающихся в море, и тем не менее, рассматривая существующие модели взаимосвязи организмов со средой, можно во всем множестве происходящих процессов выделить определенный набор наиболее значимых факторов, вклад которых определяется видовыми особенностями и экологией организмов.

2.1. Речной сток

В процессе воспроизводства морских организмов важная роль принадлежит речному стоку. Воды рек, вынося биогенные и органические вещества в море и изменяя соленость морских вод, являются одним из важных физико-географических факторов. Так, высокая продуктивность северо-западной части моря определяется речным стоком.

Реки Черного моря являются также источником не только биогенных веществ, но и органического вещества (ОВ). По данным Ю. Г. Майстренко в Черное море реки приносят $2{,}8 \cdot 10^6$ т ОВ в год, из них 80 % приходится на р. Дунай и 17 % на р. Днепр (около $700 \cdot 10^3$ т органического вещества). Средний показатель стока ОВ бассейна Черного моря 1,4 т/(км²·год). Реки обладают разнообразным водным режимом, вынос ОВ в различные сезоны года неодинаков. В целом с речными водами в зимний период поступает 16 % ОВ, в период весеннего половодья — 48 %, в летне-осенний период — 36 % их годового стока.

2.2. Биохимические механизмы

В Черном море основным источником органического вещества (ОВ) является фитопланктон, а затем уже ОВ речного стока, что обусловливает наибольшую концентрацию углерода в верхних слоях. Содержание растворенного ОВ в поверхностных слоях воды Черного моря составляет 3,2—3,7 г/м³ углерода, снижаясь до 1,2—2,6 г/м³ (Дацко, Скопинцев). Таким образом, в глубинных водах Черного моря не наблюдается накопления запасов ОВ, а следовательно, органических форм азота и фосфора, в отличие от их солевых форм; тем не менее содержание растворенного ОВ и органических форм биогенов в глубинных водах Черного моря в 1,5—2 раза выше, чем в глубинных водах океана. Вероятно, это связано с поставкой значительной массы аллохтонной органики с речным стоком суши.

В основе биологической продуктивности водоемов лежит процесс фотосинтеза, на интенсивность которого непосредственное влияние оказывает освещенность, температура воды, биогенная база.

Анализируя влияние освещенности на скорость фотосинтеза приходится встречаться с действием таких факторов, как изменение спектрального со-

става света и его интенсивности, температуры, концентрации питательных солей.

Для начала продукционного цикла фитопланктона необходима освещенность не менее 400 лк в диапазоне солнечного излучения с длиной волны 380—710 нм. Оптимум освещенности в Черном море наблюдается на глубине 5—7 м, однако значительная аккумуляция фитопланктона происходит на глубине 15—20 м у верхней границы термоклина.

В центральных районах моря максимальный фотосинтез наблюдается в летнее время при интенсивности света 24,23—29,08 Дж/(м²·с).

Угнетение фотосинтеза светом ясно выражено начиная со 58,152 Дж/(м²·с), а с глубины, где энергия радиации составляет 7,27—9,69 Дж/(м²·с), скорость фотосинтеза уменьшается прямо пропорционально изменению энергии солнечной радиации. Глубина расположения максимума фотосинтеза зависит в основном от прозрачности воды и интенсивности солнечной радиации. Освещенность влияет на скорость фотосинтеза прямо; действие температуры осуществляется в основном через сезонные изменения стратификации вод. Вследствие наличия летом в Черном море слоя термоклина на глубине 15—20 м, фитопланктон, находящийся под скачком плотности, в течение продолжительного времени обитает при низких интенсивностях света. Максимум скорости фотосинтеза фитопланктона, находящегося под скачком плотности, достигается при интенсивности света в 2—3 раза более низкой, чем у фитопланктона, развивающегося в верхних слоях.

Опыты, проводимые с культурами водорослей, показывают, что с увеличением температуры на 10 °С в 2—2,5 раза повышается интенсивность света по фотосинтезу (Финенко и др.). В последнее время показано, что на глубину расположения максимума скорости фотосинтеза оказывают влияние и условия минерального питания фитопланктона. В целом же при оптимальной интенсивности света скорость фотосинтеза можно считать функцией температуры.

Немаловажное значение в формировании первичной продукции имеет тип зимы. В Черном море после холодных зим, во время которых происходит сильное вертикальное перемешивание вод, фитопланктон интенсивно развивается в феврале—мае и биомасса достигает больших значений, чем в другие годы. После умеренных и теплых зим максимальное развитие фитопланктона наблюдается в июле, причем биомасса его сравнительно невелика.

Исходя из всего вышеизложенного можно резюмировать следующее: зона высокой продуктивности с интенсивностью фотосинтеза 0,7—3,0 г/м² углерода в сутки занимает северо-западную часть моря, прибосфорский район, северо-восточную часть у Керченского пролива и значительные участки прибрежной акватории. Она составляет 16 % всей акватории моря и дает 1/3 суммарной первичной продукции. Высокая продуктивность определяется обильным речным стоком, быстротой оборачиваемости биогенных веществ, хорошей вентиляцией вод, интенсивным прогревом летом и длинным вегетационным периодом (Косарев). Средняя суточная продукция всего бассейна Черного моря 225 × × 10^3 т углерода, а годовая — около 90 млн т углерода или около 2 млрд т сырой биомассы. В расчете на 1 м² в среднем для всего бассейна годовая первичная продукция 220 г/м² углерода или около 83,74 Дж/м². Однако, учитывая занижение результатов, получаемых радиоуглеродным методом измерения продукции фитопланктона, средняя продукция фитопланктона в Черном море должна составлять около 250 г/м² углерода в год [81].

Вынос биогенных веществ давно признается основным фактором, определяющим продуктивность района. Обычно основные промысловые зоны совпадают с районами повышенной первичной продукции, следовательно существует возможность проводить оценку продуктивности района по гидрохимическим показателям.

Учет выноса биогенных элементов очень затруднен чрезвычайной легкостью изменения их концентраций под влиянием водных организмов и загрязнения сточными водами, бедностью сведений о них и частыми методическими ошибками при их определении. Действие всех элементов неоднозначно и степень их участия в процессах фотосинтеза, азотистого обмена и других метаболических функциях различна. Важное значение по своему положению занимают азот и фосфор, поскольку они входят в состав белковых молекул и участвуют в регуляции внутриклеточного обмена. Биологическая роль кремния определяется тем, что он входит в состав скелетных образований.

Цикл круговорота биогенных веществ, начатых в процессе фотосинтеза, заканчивается разложением морских растений и животных. В результате биогенные вещества переходят из органических в неорганические соединения (регенерация).

В процессе прямой регенерации морскими растениями до 90 % усвоенных ранее фитопланктоном Черного моря биогенных веществ возвращается в воду. Прямая регенерация протекает в зоне фотосинтеза, а пределы глубины ее распространения определяются положением скачка плотности [92].

Процесс распада ОВ на биогенные элементы протекает на больших глубинах и достигает дна. Обратный переход биогенных веществ в сложные биологические соединения возможен при поднятии их из глубинных слов в зону фотосинтеза; это осуществляется в результате динамики водных масс.

Основной процесс уменьшения содержания фосфора — это потребление его фитопланктоном. В пору интенсивного развития фитопланктона его содержание может падать до аналитического нуля.

Соединения азота расходуются при усвоении их водорослями во время фотосинтеза, а также при выпадении с органическими остатками в осадок дна.

2.3. Физико-динамические факторы

Среди всех динамических процессов, развивающихся в море, ведущая экологическая роль принадлежит морским течениям. Она проявляется на всех трофических уровнях развития жизни и сказывается на всех процессах жизнедеятельности организмов.

Движение воды действует на фитопланктон как косвенно, так и прямо. Установлено, что изменение скорости течения вызывает изменение не только численности, но и видового состава фитопланктона. В условиях течения повышается скорость дыхания и интенсивность поглощения фосфора. Кевери и

Онеис зарегистрировали увеличение первичной продукции при высокой скорости течения.

Не исключено, что движение воды влияет на световые условия в водоемах и прежде всего на спектральный состав проникающего света. Однако работы в этом направлении пока не известны. Влияние прямого воздействия движения воды сводится в основном к трем процессам: изменение положения частиц внутри клеток, изменение взаимного положения органов водорослей и изменение положения всего растения в воде. Влияние прямого воздействия движения воды на клетки водорослей очень мало изучено, и пока скудность данных не позволяет провести анализ этого явления [14].

Схема распределения фитопланктона тесно связана с общей схемой циклонической циркуляции. Как указывалось ранее, рядом исследователей выделены участки моря, богатые фитопланктоном. Биомасса фитопланктона в этих районах 0,2—0,6 г/м³, а в неритической зоне 2—3 г/м³. На участке м. Херсонес — м. Тарханкут процессы обусловлены наличием локальных замкнутых циркуляций с большими скоростями течений. Участок Керченский пролив — Новороссийск находится под влиянием притока вод Азовского моря, интенсивного турбулентного обмена, поступления биогенов с речным стоком кавказских рек и сгонно-нагонных явлений. На участке побережья Анатолии имеет место локальная дивергенция течений.

Другие глубоководные акватории районов Черного моря характеризуются биомассами фитопланктона 0,05—0,20 г/м³, которые подвержены значительным колебаниям и находятся в тесной зависимости от метеорологических условий. В целом максимальные биомассы отличаются в основной струе циклонического течения.

Районы фронтов и течений и районы открытого моря, расположенные по периферии циклонических круговоротов, характеризуются средним уровнем средней суточной продукции 0,6—1,5 г/м² углерода, занимая 22 % акватории и дают 1/4 суммарной продукции. Остальные 45 % продукции приходятся на долю динамически менее активных районов, находящихся в центральных халистатических областях, и занимают 60 % площади акватории моря. Характерный для них уровень продуктивности фотосинтеза 0,25—0,50 г/м² углерода в сутки можно считать уровнем продуктивности мезотрофных водоемов.

Циркуляция оказывает непосредственное влияние на распределение зоопланктона. Наибольшие его концентрации сосредоточены в западных и северных прибрежных районах (здесь воды наиболее распреснены и подвержены в наибольшей степени влиянию сгонов и нагонов). Наибольшие биомассы зоопланктона сосредоточены в поверхностном 10-метровом слое. Распределение зоопланктона носит пятнистый характер:

— планктон переносится под влиянием течений механически, и в зонах конвергенций и нагонов скапливается в больших количествах;

— в маловодные годы с умеренным стоком рек планктон наиболее интенсивно развивается в зонах конвергенции и нагонов (здесь отмечается более высокая температура и повышенная примесь материковых вод). При западных и восточных ветрах наблюдается довольно неравномерное распределение, особенно на участках со сложным рельефом, где образуется множество мелких круговоротов. Наблюдающееся чередование участков со сгонными и нагонными течениями обусловливает разреженные скопления зоопланктона.

Большую роль в формировании биологической продуктивности вод играет термоклин. Как известно, в Черном море установлено существование обособленных эпипланктонных и батипланктонных сообществ зоопланктона. Эпипланктонное сообщество включает в себя эвритермные или теплолюбивые маломигрирующие виды; батипланктонное сообщество состоит из холодолюбивых видов.

В летнее время указанные сообщества разграничены слоем термоклина. При градиенте температуры воды 3—4 °С термоклин является уже почти непроходимой преградой. При градиенте 0,6 С°/м в слое термоклина границы между комплексами размываются. В холодные зимы при падении температуры ниже 8 °С планктеры батипланктонного комплекса занимают поверхностные слои воды и преобладают в составе зимнего зоопланктона.

Наличие солоноватоводных и морских видов зоопланктона в Черном море свидетельствует о существовании солевого барьера или критической солености, которыми объясняется несмешиваемость двух фаун.

Солоноватоводные условия существования — наиболее характерная черта экологии и физиологии черноморской фауны. Однако в северо-западной части Черного моря вследствие стыка разнородных по генезису вод (значительные градиенты T, S, ρ) в массе гибнет пресноводный, солоноватоводный и морской зоопланктон.

На состояние кормовой базы значительное влияние оказывают сгонно-нагонные явления. В зависимости от повторяемости и продолжительности сгонных или нагонных ветров и течений меняются районы поступлений и выноса питательных солей с глубин Черного моря, и прогноз сгона для разных районов моря может быть и прогнозом содержания биогенных солей, а следовательно, и биологической продуктивности.

Л. Г. Коваль в северо-западной части при сгонах наблюдала перемещение водных масс, разделенных термоклином, целиком со всем их населением: скоплений эпипланктонного теплолюбивого комплекса и тепловодных рыб в сторону открытого моря, а придонных скоплений холодолюбивых планктонных организмов и холодноводных рыб почти к самому берегу. При нагонах наблюдается обратная картина.

При сгонных ветрах исчезают кормовые пятна эпипланктонного комплекса в приднепровском и приднестровском районах, а пятно из придунайского района выносится за пределы шельфа. С западной стороны Крымского полуострова удерживается пятно богатого зоопланктона. Особенно обеднен северный район мелководья (до 10 мг/м³) в Одесском заливе. Таким образом, при сгонных ветрах поступление органического вещества из рек и лиманов благоприятствует в последующем развитию в этих районах детритофагов, представляющих кормовую базу теплолюбивой хамсы.

В северо-западной части при нагонных ветрах южного и юго-восточного направлений отмечено формирование пятен планктона на устьевых взморьях и постепенное снижение биомассы эпипланк-

тонного комплекса и его массовых видов по направлению к открытому морю [37].

Однако эти данные касаются периода 60-х гг. В настоящее время в результате загрязняющего действия нефти и других органических веществ положение значительно ухудшилось. После сгонных ветров северных направлений, способствующих растеканию нефтепродуктов на смежную акваторию моря, отмечалось полное отсутствие или минимальное количество личинок рыб в районах влияния Одесского и Ильичевского портов. В придунайском районе, наоборот, наблюдалось максимальное число личинок. Компенсационное течение приносит большое количество ночесветки, за счет которой увеличивается общая биомасса зоопланктона. Влияние волнений также сказывается на условиях обитания гидробионтов. Так, волнение 4—5 баллов гибельно для молоди зоопланктонных организмов (главным образом эпипланктонных видов, обитающих в верхних слоя воды), а также влияет на интенсивность их размножения.

2.4. Антропогенные воздействия

В последние годы на показатели продуктивности вод Черного моря существенное влияние стали оказывать последствия хозяйственной деятельности человека. Причем реакции биотической части экосистемы на эти воздействия, в зависимости от трофического уровня, резко отличаются. На представителей низших трофических уровней некоторые из этих последствий сказываются благоприятно, способствуя увеличению их продукции и биомассы. На представителей же более высоких звеньев трофической цепи антропогенные факторы чаще всего оказывают отрицательное воздействие.

Среди форм хозяйственной деятельности наиболее эффективное влияние на состояние экосистемы Черного моря оказывают химическое загрязнение, эвтрофикация и зарегулирование стока рек, дноуглубительные работы и дампинг грунтов, донный промысел мидий и шпрота, нерациональный промысел рыб.

2.4.1. Влияние качественного состава вод

Одним из следствий загрязненности речных вод различными детергентами наблюдается массовая гибель зоопланктона на гидрофронтах рек и по ходу трансформации пресных вод. Локальные пятна концентрации мертвого зоопланктона отмечаются также в прибрежных районах моря, загрязненных бытовыми и сточными водами и отграниченных железобетонными сооружениями. Уменьшилось в планктоне количество показателя чистых вод — *Evadne Spinifera*, а также тепловодных эпипланктонных копепод.

Кроме того, избыточный вынос в море минеральных солей (эвтрофирование) приводит к резкому возрастанию уровня развития фитопланктона, общая биомасса которого в последние годы увеличилась в 26 раз, а площади зон «цветения» возросли в 8—10 раз [32]. Явление «красный прилив» стало типичным для приустьевых участков Днепра, Днестра и Дуная. После отмирания водорослей начинается процесс их минерализации, причем скорости окисления органического вещества здесь в

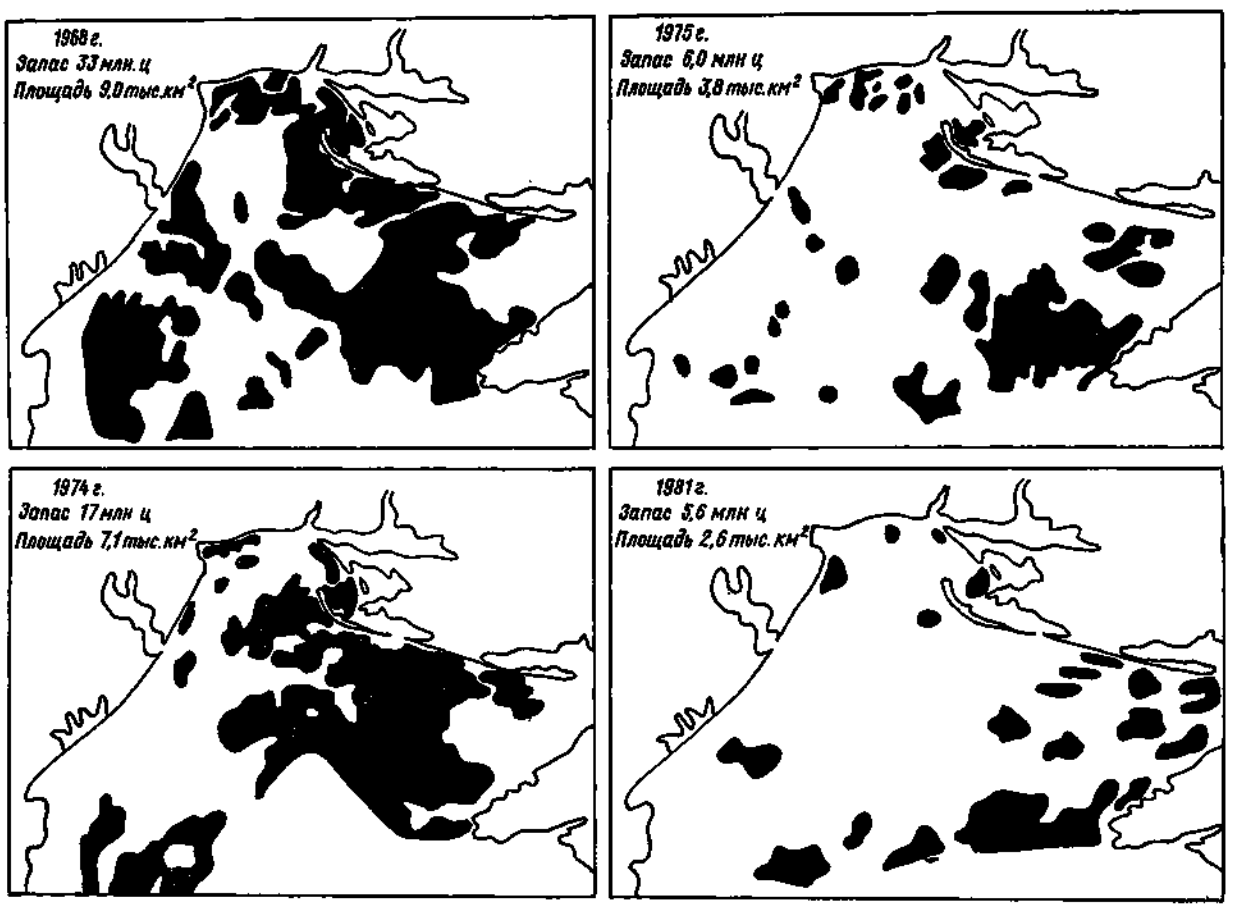

Рис. 25. Сокращение полей промысловых мидий на северо-западном шельфе.

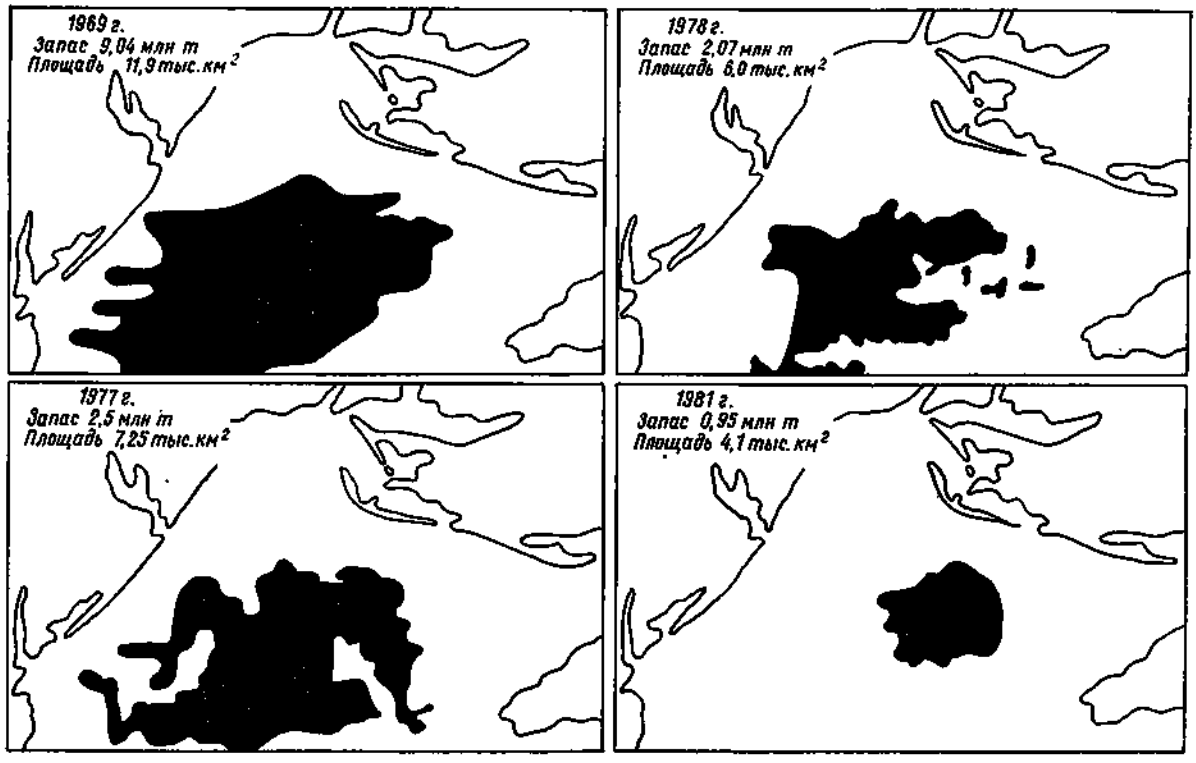

Рис. 26. Сокращение полей филлофоры на северо-западном шельфе моря.

3—5 раз превышают аналогичные в открытой части моря. Кислород под слоем скачка плотности в этих обстоятельствах может полностью израсходоваться за 3—5 сут — развивается сероводородное заражение.

Площади зон сероводородного заражения на северо-западном шельфе в летний период могут достигать 1,5 тыс. км² [88], а площади с содержанием кислорода в придонном слое менее 20 % в это время занимают до 60—70 % акватории шельфа. Вертикальное развитие сероводородных зон составляет 3—5 м при глубинах моря 10—15 м и 10—15 м при глубинах моря до 30 м.

Развитие заморов отрицательно сказалось на состоянии биоценоза мидий (рис. 25). С момента возникновения этого явления (начало 70-х гг.) и по настоящее время площади мидийных банок сократились с 20 тыс. км² до 2,6 тыс. км², а их биомасса уменьшилась с 12 млн т до 5 млн т, причем этот уровень поддерживается за счет особей непромысловых размеров.

Аналогичная деградация наблюдается в биоценозе филлофоры (рис. 26). В 1985 г. запас этой водоросли составлял 0,5 млн т по сравнению с 10 млн т в 1925 г., а площадь поля за это время сократилась с 12 тыс. км² до 4,1 тыс. км² [86].

Изменение качества речных вод отражается также на состоянии популяции дельфинов. В настоящее время численность стада черноморских дельфинов сократилась до 45 тыс. голов по сравнению с 500 тыс. в период 60—70-х гг., причем большая часть животных больна сколиозом и кожными заболеваниями, вызванными наличием в воде детергентов.

2.4.2. Зарегулирование стока рек

Каскад водохранилищ на Днепре привел к проникновению на шельф соленых вод открытой части моря и распространению их по руслу Днепра в летнее время на удаление в несколько десятков километров от моря.

Соленость в районе п. Херсон может достигать 0,5 ‰, а соленость вод придонного слоя на северо-западном шельфе возросла за последние 30 лет на 0,7—1,0 ‰ [11]. Рост солености сопровождается обострением вертикальных градиентов этой характеристики, которые в отдельные годы в летнее время могут достигать 6 ‰/м. Кроме того, ослабление стоковых течений в период пониженной ветровой активности (летом) способствует образованию застойных зон. В сумме эти явления приводят к ослаблению интенсивности вертикального обмена кислородом и, параллельно с интенсификацией деструкционных процессов вследствие эвтрофирования, определяют развитие придонной гипоксии и сероводородного заражения на шельфе в летний период. С 1979 г. это явление фиксируется здесь ежегодно, сохраняется с мая по сентябрь, и даже при штормовых ветрах силой 15—17 м/с аэрации придонного слоя не происходит по причине мощного пикноклина [88].

Таким образом, в настоящее время, особенно в летний период, на северо-западном шельфе складываются экологические ситуации, когда на глубинах 10—30 м развивается сезонная придонная гипоксия, а глубины 70—100 м заняты водами с низким содержанием кислорода, проникшим на шельф с открытой части моря, и промысел шпрота осуществляется только между этими зонами, которые от года к году сближаются [89].

В глубинной части Черного моря «законсервировано» около 90 млн т солей фосфора и 400 млн т солей азота. Мобилизация этих запасов связана с поднятием уровня глубинных вод и может существенно повысить продуктивность вод фотического слоя.

2.4.3. Дноуглубительные работы и дампинг грунтов

С 1963 г. в северо-западной части ежегодно отваливается в море 8,5 млн т грунта. В Керченском проливе с 1964 г. было свалено 21,6 млн м³. Только по объектам Советско-Дунайского пароходства сброс грунтов составляет 2,9 млн м³, по району Керченского пролива — 2,4 млн м³, по каждому из объектов Минтрансстроя в среднем в Черное море сбрасывается 0,5 млн м³ грунта в год [77].

Негативное воздействие этого фактора на уровень продуктивности водоема осуществляется по двум каналам:

1) Химическому загрязнению вод содержащимся в грунте соединениями тяжелых металлов, в том числе ртути и кадмия, нефтепродуктов, концентрации которых могут достигать 1,5—2,0 ‰ (по массе) грунта, а также фторидов, ДДТ и его метаболитов.

2) Снижение прозрачности вод, заилению значительных пространств пелитовыми частицами, составляющими от 30 до 70 % грунта и благодаря малым размерам способным длительное время находиться в толще воды и переноситься на большие расстояния.

В результате дампинга грунтов в Керченском проливе в период с 1964 по 1970 г. заиление дна происходило со скоростью 1,2 см в год, на 3 порядка превышающую естественную.

2.4.4. Донный промысел рыб и моллюсков

В северо-западной части Черного моря ежегодно выполняется до 30 тыс. донных тралений, в результате которых в период с 1976 по 1988 г. с этих участков вынесено около 70 млн. т пелитовых частиц. Эта взвесь выносится в Каркинитский залив и на восточную и южную периферию филлофорного поля Зернова, усугубляет эффект светового экрана, а также оседает на дне в виде наилка [77]. По данным АзЧерНИРО в 1983 г. площадь такого заиления составила 1,5 тыс. км², слой переосажденного ила варьировал от 0,5 до 18 см. Общий объем переосажденного на шельфе ила оценивается в 30 млн т [78].

В районе Новороссийска и Керченского пролива с 1981 по 1988 г. ежегодно выполнялось около 6 тыс. тралений. Их влияние проявилось здесь в разрушении донных биоценозов, а заиления не отмечалось, так как преобладающие течения обусловили вынос ила в открытую часть моря.

Добыча мидий до 1985 г. производилась ножевыми драгами, разрушавшими субстрат животных и заплявшими саму банку и близлежащие участки. Установлено, что добыча таким способом 1 т мидий на кормовые цели сопровождается разрушением колонии животных и субстрата на площади 0,009 км², а добыча такого количества моллюсков на пищевые цели — 0,045 км². Изъятие в 1979—1980 гг. в Керченском проливе 1,77 тыс. т мидий на кормовые цели сопроводилась, таким образом, уничтожением 1,7 тыс. т животных, так как драга, заполненная моллюсками и балластом, на половине пути драгирования буксируется как каток, уничтожая население дна [78].

2.4.5. Нерациональный промысел рыб

Если численность основных в настоящее время промысловых пелагических видов рыб (хамса, шпрот, ставрида) испытывает естественные флюктуации, то запасы некоторых ценных видов значительно сократились, а некоторые виды вовсе исчезли. Исчезновение скумбрии и пеламиды, вылавливающихся в середине 50-х гг. соответственно в количестве 15 и 2—8 тыс. т, произошло в середине 60-х гг. в результате нерационального промысла. Численность осетровых, вылов которых в начале 50-х гг. составлял 1 тыс. т, резко сократилась под влиянием нерационального промысла аханами, а камбалы-калкан, добывающейся в 50-е гг. в количестве 2—3 тыс. т, — в результате нерационального промысла сетями турецкими рыбаками в нейтральных водах.

В настоящее время вылов осетровых составляет 20 т в качестве прилова. Введение запрета на лов этих объектов положительно сказалось на состоянии их запасов: их запас с более чем 3,5 тыс. т в 1968 г. возрос к 1987 г. до 8,6 тыс. т. Промысел калкана прекращен с 1986 г.

Значительно сократились запасы кефалей. Если в начале 50-х гг. их вылов составлял 1—3 тыс. т, то к концу 60-х гг. он упал до 0,2—0,4 тыс. т. Причинами снижения численности кефалей послужили интенсивный нерациональный промысел в зимний период и негативное влияние товарного выращивания молоди в Кизилташских лиманах и оз. Тобечик, приведшее к снижению пополнения. В настоящее время запасы кефалей находятся на низком уровне.

Запасы барабули значительно сократились в середине 50-х гг., после чего стабилизировались на относительно низком уровне. Если вылов ее в начале 50-х гг. составлял 1,5—2,0 тыс. т, то сейчас он находится на уровне 0,2—0,9 тыс. т. Причины снижения запасов барабули еще не ясны.

3. ВЛИЯНИЕ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОВЕДЕНИЕ ПРОМЫСЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ ЧЕРНОГО МОРЯ

3.1. Роль температуры воды в миграционном и стайном поведении хамсы

К непременным условиям развития промысла хамсы, который ведется кошельковыми неводами, относится существование достаточно стабильных во времени и пространстве концентраций этого объекта, формирующихся в зимнее время в результате миграции рыбы в более теплую юго-восточную часть Черного моря. Знание основных особенностей процесса формирования зимовальных скоплений хамсы является необходимой предпосылкой к прогнозированию промысловой обстановки в районах лова. В связи с этой задачей в ходе траловых и акустических съемок в Черном море в 1976—1988 гг. был осуществлен мониторинг распределения и поведения хамсы при различной температуре воды. Для обнаружения и количественной оценки

косяков хамсы использовали 30-метровый пелагический трал и гидроакустическую аппаратуру: эхолоты ЕК в комплексе с эхоинтеграторами ОМ и ОД, а также гидролокаторы CS-30 и «Сарган».

Как показали данные тралового учета, в период летнего размножения и нагула нерестовое стадо и молодь черноморской хамсы в основном распределяются на высокопродуктивном северо-западном шельфе моря (60—90 % запаса) и в прибрежной 10—15-мильной зоне у Кавказского побережья (10—30 % запаса). И лишь менее 10 % численности хамсы учитывалось в открытых районах Черного моря.

Авторы, изучавшие зимовальную миграцию хамсы [25, 83, 94], указывают, что сроки перехода этой теплолюбивой рыбы от летнего рассеянного распределения в поверхностном слое моря к стайному образу жизни зависят от состояния ее жирового депо и температуры воды. После завершения летнего нереста с конца августа по октябрь хамса интенсивно питается, что приводит к быстрому накоплению жира, который является энергетическим запасом для ее существования в зимний период. В это же время воздействие осенних штормовых ветров способствует выхолаживанию моря, особенно в мелководных районах его северо-западной части. Первые признаки миграции хамсы на юг обычно регистрируются в начале сентября, когда кратковременно возрастают уловы в прибрежных ставных неводах и учащаются случаи облова ее косяков тралами при промысле шпрота на западном шельфе моря.

В 1984—1985 гг. в ходе осенних эхометрических съемок у берегов Болгарии удалось проследить массовое перемещение хамсы от м. Калиакра до м. Кору, которое продолжалось более двух декад в середине сентября. При этом единовременно в этом районе фиксировалось не менее 30 тыс. т хамсы, скопления которой постоянно обновлялись за счет миграции с севера. Наблюдения показали, что для этого начального периода зимовальных миграций хамсы, когда температура воды сохраняется в пределах 15—18 °С, характерным является дневное рассеивание рыбы в поверхностном слое моря, что позволяет ей продолжать питание планктоном, продвигаясь в узкой прибрежной зоне, где глубины не превышают 200 м. Осенью лишь незначительная часть хамсы, преимущественно молоди, облавливается в открытом море на удалении более 20 миль от берега.

К октябрю хамса покидает северо-западный шельф. Даже в юго-восточной части моря в сентябре — октябре не удается обнаружить каких-либо ее концентраций. Очевидно, в этот период смещение черноморской хамсы к южному побережью бассейна является повсеместным. Лишь в северо-восточном районе моря, прилегающем к Керченскому проливу, в ходе октябрьских учетных съемок всегда отмечаются как плотные косяки, так и разреженные концентрации азовской хамсы. Быстрое осеннее выхолаживание Азовского моря является причиной более раннего образования зимовальных скоплений у этой популяции хамсы. Попадая в теплые черноморские воды, часть азовской хамсы, преимущественно сеголетки, рассеивается и продолжает нагул в Черном море, продвигаясь на зимовку в южном направлении. В то же время первые промысловые концентрации хамсы собственно черноморской популяции появляются в юго-восточной части моря лишь в конце ноября — первой декаде декабря. Выполненные с помощью акустической аппаратуры наблюдения за процессом образования зимовальных скоплений черноморской хамсы, показали, что ее многочисленные небольшие по размеру стаи всегда двигаются к побережью Грузии с запада или юго-запада. Соответственно первый подход черноморской хамсы к берегу и образование плотных косяков неизменно происходит в пределах района Батуми — Поти. Такое направление миграций черноморской хамсы заставляет предполагать, что в формировании скоплений у берегов Грузии может принимать участие рыба из высокопродуктивной части моря. По литературным данным весь район турецкого побережья от советской границы до Синопского залива также является местом зимнего распределения хамсы [71, 101]. Причины, вызывающие миграцию черноморской хамсы из западной и южной частей моря к берегам восточной Анатолии и Грузии, становятся понятными, если принять во внимание, что этот район максимально защищен Главным Кавказским хребтом от ветров северных направлений и мало подвержен влиянию холодных течений, господствующих в западной половине моря [39]. Очевидно, что в ходе эволюции у черноморской хамсы выработались определенные инстинкты (соответствующие «хомингу» других видов), которые позволяют ей ежегодно находить этот наиболее благоприятный для зимнего существования участок бассейна.

Согласно методике, впервые предложенной Н. Н. Данилевским, конкретные даты образования плотных косяков и начала промысла черноморской хамсы могут быть установлены осенью путем определения содержания жира в теле рыбы с привлечением данных о температуре воды в юго-восточной части бассейна [24, 25]. Как подтвердили наши следующие наблюдения, основанием для такого рода прогнозов служит то обстоятельство, что хамса остается в рассеянном состоянии и продолжает нагул вплоть до понижения температуры воды до таких минимальных значений, при которых активное перемещение рыбы может только увеличить расход жира. Соответственно, чем значительнее становится уровень жировых запасов, характеризующий степень готовности хамсы к зимовке, тем выше оказывается температура воды, при которой образуются стабильные косяки. На основании результатов регулярных анализов проб жирности хамсы и океанографических съемок у побережья Грузии удалось представить указанную связь в формализованном виде. Поскольку максимально высокая жирность в пределах 12—17 % наблюдается у двух-трехлетних рыб размером 10—13 см, которые в ноябре при температуре воды 14—16 °С формируют первые скопления, для этой части популяции расчет коэффициентов линейной регрессии производили отдельно. Принятое к использованию в прогностических целях уравнение имеет вид

$$y = 0{,}528x + 6{,}728,$$

где y — температура воды, °С; x — жирность хамсы, %.

Наиболее многочисленная часть стада, в основном включающая сеголетков жирностью менее

13 %, подходит на зимовку позднее в интервале температуры 10,5—13,0 °С. Ниже этого температурного порога вся хамса оказывается локализованной в косяках в 10-мильной прибрежной зоне. Процесс образования косяков молоди может быть описан (рис. 27) уравнением

$$y = 0{,}295x + 8{,}482.$$

Существенное возрастание степени агрегированности хамсы в косяки в прибрежной зоне Грузии отмечается при сильных штормовых ветрах,

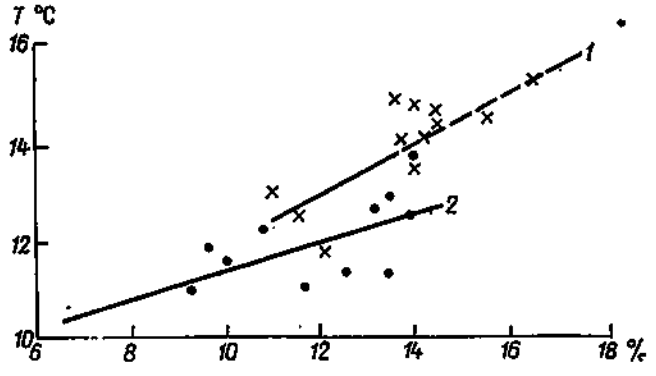

Рис. 27. Зависимость содержания жира в теле рыб от температуры воды, при которой образуются косяки хамсы.
1 — старшие возрастные группы; *2* — сеголетки.

которые усиливают процесс выхолаживания поверхностных горизонтов моря.

Обычно уже с первых дней зимовки у хамсы наблюдаются суточные вертикальные миграции, которые весьма существенно влияют на ход ее промысла кошельковыми неводами. По мнению С. Г. Зуссер [33] они позволяют хамсе осуществлять в сумеречные вечерние и утренние часы кратковременное питание зоопланктоном, а в дневное время уходить из поверхностных горизонтов, где наиболее вероятно выедание ее хищниками — дельфинами и морскими птицами. Однако нам удалось установить, что эти поведенческие реакции хамсы также находятся в тесной связи с температурным фактором. В конце ноября — декабре, когда поверхностный 40—50-метровый слой воды остается на 2—4 °С более прогретым по сравнению с нижележащими горизонтами моря, косяки хамсы держатся выше слоя температурного скачка. При этом вечерние подъемы рыбы к поверхности начинаются в 16 ч 30 мин — 17 ч 00 мин, после чего она удерживается в плотных косяках протяженностью 200—800 м до 21—22 ч, а затем образует разряженные концентрации, рассредоточенные на площади в несколько квадратных миль. Эти слои рыбы слабой плотности фиксируются вплоть до 4—5 ч утра, когда хамса вновь начинает собираться в косяки и после восхода солнца в 8—9 ч опускается на глубину 40—60 м (до слоя термоклина). По данным расчетов, производившихся на основе оценок биомассы и объема скоплений с помощью эхоинтегратора и эхолота, плотность концентраций хамсы в дневное время достигает 500—800 экз./м³. С подъемом рыбы к поверхности плотность стай снижается до 200—400 экз./м³, а в середине ночи этот показатель составляет 20—60 экз./м³.

По мере выхолаживания верхних слоев воды и размывания слоя температурного скачка происходит увеличение нижнего предела дневного опускания косяков хамсы. Во второй половине января и в феврале в условиях гомотермии плотные скопления хамсы регистрируются на глубинах до 120—140 м. При этом наступление характерных для второй половины зимы штормов, сопровождающихся осадками в виде снега, вызывает снижение верхнего предела подъема косяков в вечернее время. Наблюдавшееся в суровые зимы в 1985 и 1987 гг. при температуре воды 6,5—7,5 °С длительное «залегание» рыбы в придонных горизонтах сопровождалось резким снижением биомассы скоплений вследствие естественной убыли. По-видимому, истощенное к этому времени жировое депо организма хамсы (жирность 3—6 %) оказывается не в состоянии покрыть его энергетические траты в условиях пониженной температуры воды и уменьшения сумеречного питания, что и приводит к росту смертности в промысловом стаде. В то же время, встречающиеся в литературе [82] утверждения о том, что в теплые зимы при температуре воды выше 8 °С хамса круглосуточно остается у поверхности моря, а в штормовую погоду рассеивается, не нашли подтверждения в наших исследованиях, проводившихся с помощью более мощных гидролокаторов. Систематические гидроакустические съемки районов зимовки хамсы позволили получить надежные данные о том, что вертикальные миграции этого объекта в той или иной степени сохраняются во всех случаях, а изменения в температуре воды по вертикали определяют лишь размах подъемов и опусканий косяков. В штормовую погоду также неоднократно удается фиксировать на глубинах 60—120 м плотные концентрации хамсы, которые могут оставаться там и в темное время суток. Миграционный путь к поверхности моря в таких случаях не превышает 30 м. Очевидно, что возникающие в период шторма сильные течения заставляют хамсу избегать верхних слоев воды.

Немалое значение для организации промысла хамсы также имеет знание особенностей распределения ее скоплений вдоль побережья.

После выхода первых косяков крупной хамсы на шельф юго-восточной части моря, они, как правило, продолжают интенсивно продвигаться в северном направлении. Обычно это происходит в декабре при относительно высокой температуре воды 12—14 °С и наличии слоя термоклина, когда рыба еще питается и сохраняет высокую подвижность. В середине декабря 1980 г. в условиях устойчивой теплой погоды скопление крупной хамсы, образовавшееся в районе Кобулети, мигрировало в район Гагры — Сочи, преодолев за 10 сут около 160 миль. Затем, попав у Сочи в зону воздействия холодного норд-оста, указанное скопление прекратило свою миграцию и в течение всего января медленно смещалось на юг в район Грузии. Несомненно, что необходимость экономно расходовать энергетические ресурсы жира делает невозможным активное перемещение хамсы в самое холодное время года. В целом присущий хамсе стереотип поведенческих реакций позволяет ей занимать на зимовках участки шельфа, наименее подверженные воздействию охлаждения и течений.

Обычно уже в начале января косяки хамсы концентрируются вблизи прибрежных свалов глубин и подводных каньонов в районе Сухуми — Батуми. Здесь, на так называемых ямах — Анаклий-

ской, Кодорской, Рионской, Кобулетской, Супсинской, где глубины уже в 3—5 кабельтовых от берега достигают 300 м, сосредотачиваются наиболее значительные по биомассе скопления рыбы. Все светлое время суток хамса удерживается вблизи вертикальных стенок каньонов, где почти отсутствует движение воды. По-видимому, такое поведение также уменьшает выедание хамсы крупными донными хищниками — белугой, камбалой-калкан, акулой-катран и другими, которые в основном обитают на площадках с более ровным грунтом.

Определенную защиту от воздействия течения, которое имеет в восточной части бассейна преимущественно циклоническую направленность, косяки хамсы находят также в бухтах за выступающими в море мысами. К числу таких участков побережья на Кавказе относятся Батумская, Сухумская и Гагринская бухты, заливы в районах мысов Тамыш, Пицунда (зимовки черноморской хамсы и смешанных скоплений), а у Южного берега Крыма — бухта Ласпи, Ялтинский залив и район м. Аю-Даг (зимовки азовской хамсы).

С наступлением наиболее холодного периода, обычно к середине января, у хамсы исчезают всякие перемещения в северном направлении. В то же время было замечено, что под воздействием сильных штормов и снегопадов, вызывающих резкие понижения температуры воды, рыба может медленно, по 3—5 миль в сутки, двигаться на юг. Такое направление миграций хамсы во второй половине зимы становится вполне объяснимым, если учесть, что воды, прилегающие к району Батуми и к турецкой Анатолии, наилучшим образом защищены от ветров горами и изобилуют глубокими каньонами.

В марте, когда устанавливается тихая солнечная погода и начинается прогрев поверхностного слоя воды, вечерние подъемы хамсы становятся интенсивней, причем подвижность рыбы при этом резко возрастает. Стабильность косяков снижается. С наступлением темноты хамса регистрируется эхолотом в виде разреженного слоя толщиной 10—30 м, протяженность которого может превышать 10 миль. При этом рыба начинает бояться шумов судна и резко опускается вниз при облове тралом или кошельковым неводом. Хотя весенний прогрев моря происходит относительно медленно, повышение температуры воды даже в верхнем 5—10-метровом слое на 1—2 °С служит для хамсы сигналом к началу весенней миграции в северном направлении.

В первые несколько дней рыба при движении по-прежнему придерживается прибрежных свалов глубин, и лишь при прогреве воды до 10—12 °С скопления начинают отходить от берега и разбиваются на отдельные косяки протяженностью до 100—150 м. Согласно литературным источникам [24, 71] у берегов турецкой Анатолии весной наблюдаются миграции хамсы как в северо-восточном направлении, при котором косяки подходят к району Кавказа, так и в северо-западном направлении — от Синопа к западному побережью Крыма.

По данным эхометрических и траловых съемок последних лет удалось установить, что масштабы перемещения хамсы в том и в другом направлении зависят от температурных условий. В 1985 и 1987 гг., которые отличались большим количеством снегопадов, а также холодной и запоздалой весной когда с побережья Грузии в море устремились значительные массы талых вод, хамса уже в феврале покидала воды СССР и в дальнейшем мигрировала исключительно в западном направлении. Достоверное подтверждение весенней миграции хамсы с мест зимовки у берегов Грузии в северо-западную часть моря было получено на основе анализа рассовой принадлежности рыбы. В 1980, 1982 и 1987 гг., когда зимовка азовской хамсы у берегов Крыма отсутствовала, а в районе Грузии производился промысел смешанных концентраций, в пробах, собранных летом в районе Каркинитского и Одесского заливов, также был отмечен значительный прилов рыб азовской популяции. Причем размерно-возрастной состав уловов кошельковых неводов зимой и проб, полученных нами после миграции в северо-западной части бассейна, практически совпал. В свою очередь продвижение основного стада азовской хамсы из районов, лежащих к северу от Сухуми в направлении Керченского пролива, ежегодно с конца марта до начала мая прослеживалось на основании сообщений авианаблюдателей.

3.2. Влияние абиотических факторов на формирование скоплений шпрота

До настоящего времени общий объем изъятия черноморского шпрота не достиг оптимального допустимого улова. Недоиспользование промыслом популяции данного вида в значительной мере определяется слабой изученностью процессов формирования и распада его скоплений.

Поскольку лов шпрота производится в основном во время откорма, актуальными являются исследования особенностей поведения данного вида в период нагульной миграции в шельфовую зону. По данному вопросу имеются разрозненные сведения о влиянии абиотических факторов на процесс образования его промысловых скоплений. Г. С. Юрьев (1975) и В. В. Шер (1979) отмечали, что миграция шпрота на шельф совпадает с прогревом поверхностных вод до 8—10 °С, а в образовании придонных концентраций положительную роль играет степень выраженности сезонного пикноклина. Но последний фактор может привести к подавлению кислородного обмена по вертикали на мелководье в летний период и послужить причиной развития заморных явлений [86, 89].

Проведение в 1986—1988 гг. комплексных исследований, включающих океанографические и гидроакустические съемки, а также привлечение материалов традиционных океанографических и ихтиологических экспедиций за этот период, позволили получить более глубокое представление об основных факторах среды, определяющих миграционное поведение шпрота.

Расширение зоны учета в январе 1986 и 1987 гг. на всю акваторию Черного моря показало, что для нереста популяции шпрота концентрируется в его центральной глубоководной части, где в зимний период создаются наиболее благоприятные условия для существования нерестующихся особей и развития икры и личинок. Распространение шпрота в северном направлении ограничивается приблизительно изотермой 6 °С.

Поскольку в зимний период воды северо-западного и северо-восточного шельфа подвергаются значительному выхолаживанию, то относительно плотные скопления в этих районах отмечаются лишь у 100-метровой изобаты. Они формируются в основном рыбами старших возрастных групп. Биомасса этих косяков бывает незначительной в сравнении с общим запасом нерестового стада, но позволяет вести периодический зимний промысел.

По окончании нереста основной части популяции начинается массовая миграция шпрота на шельф для нагула (вторая половина апреля — первая половина мая). В северо-западной части моря массовый подход рыбы совпадает с началом перестройки гидроструктуры шельфовых вод с зимнего типа на летний. Первоначально шпрот держится в виде мелких косяков в поверхностном, наиболее прогретом слое воды и распространяется повсеместно по всей шельфовой зоне. В светлое время суток рыба покидает поверхностный освещенный слой и опускается на глубину. Тем не менее придонные концентрации, пригодные для промысла, образуются лишь на тех участках шельфа, где к этому времени у дна складываются благоприятные условия обитания.

Как показали исследования, в период весеннего прогрева солепостный и кислородный режимы, а также состояние кормовой базы не оказывают существенного влияния на формирование придонных промысловых скоплений. Основным препятствием для их образования в данный период является сохранение в нижележащих слоях вод со значениями температуры менее 6 °С.

По мере прогрева на всем шельфе происходит разрушение зимних водных масс в придонном горизонте. Значение температуры воды у дна повсеместно становится выше критического и этот параметр перестает оказывать сколько-нибудь существенное влияние на распределение скоплений шпрота.

К июню на северо-западном шельфе формируется типично летняя гидроструктура вод, которая характеризуется наличием ярко выраженного прогретого поверхностного слоя и залегающих под ним холодных вод. В этот период промысловые скопления шпрота отмечаются по всему шельфу от 17—18-метровой изобаты до свала глубин. Его косяки уже не поднимаются в поверхностные слои, прогретые до 20 °С и более. Поэтому на мелководье увеличивается стабильность придонных концентраций.

Наиболее благоприятные условия для откорма в течение всего летнего периода отмечаются у устья р. Дуная. Но анализ рыб, выловленных в других районах, не дает оснований говорить о недостатке корма для них. Значения основных определяемых океанографических параметров на шельфе также в целом находятся в пределах толерантности вида. Температура воды у дна составляет 6—8 °С, соленость от 18,0 до 20,0 ‰. Таким образом, на всем шельфе складываются благоприятные условия для образования промысловых скоплений. Тем не менее исследования позволили выявить существенное влияние некоторых гидродинамических процессов на поведение шпрота.

На мелководье у о. Зменный, где ведется наиболее интенсивный промысел, отмечена зависимость характера распределения и плотности скоплений от ряда гидрометеорологических параметров. В этом районе периодически наблюдаются сгонно-нагонные явления, вызывающие перемещение холодных придонных вод, подстилающих верхний прогретый слой, в направлении к берегу и от него. Вместе с придонными водными массами отмечается передвижение косяков шпрота. При малой мутности поверхностных вод агрегированность рыбы зависит от степени освещенности в дневное время. Наиболее плотные скопления отмечаются в ясную, солнечную погоду. Повышение атмосферного давления также приводит к увеличению концентрации рыб в косяках. При волнении поверхности моря более 4 баллов происходит разрушение скоплений и рассеивание рыбы в пелагиали.

Разрушение придонных концентраций шпрота в районе свала зачастую бывает связано с выходом глубинных вод на шельф, обусловленных гидродинамическими процессами. При этом рыба отрывается от грунта и рассеивается. Верхняя граница таких затоков вод определяется изотермой 8 °С, изохалиной 20 ‰ и пониженным содержанием кислорода. Следует отметить, что уменьшение концентрации кислорода в воде не является главной причиной распада косяков, так как промысловые концентрации могут встречаться на участках шельфа с абсолютным значением кислорода у дна 0,8—1,0 мг/л при обычных для придонных шельфовых вод температуре и солености.

Выявленные особенности миграционного поведения шпрота позволяют оперативно разрабатывать рекомендации по расстановке добывающего флота в зависимости от гидрометеорологической ситуации.

3.3. Влияние динамических факторов на распределение хамсы в восточной части Черного моря в осенний период

В результате более чем 30-летней истории изучения черноморской хамсы у исследователей сложилось представление о том, что основным районом ее нереста и нагула, происходящих в весенне-летний период, является северо-западный шельф. Осенью же, по мере выхолаживания вод, рыба начинает смещаться отсюда вдоль побережья Турции на восток по струе основного черноморского течения (ОЧТ). В конце ноября — начале декабря промысловые косяки крупной хамсы подходят к советскому побережью в 5-мильную зону района Батуми — Поти. Это происходит обычно при переходе температуры воды в п. Батуми через 14 °С. Мелкая и менее жирная хамса при этом держится в разреженном состоянии в 30—40-мильной зоне от берега и для промысла недоступна. Она подходит к берегу и образует плотные зимовальные скопления после понижения здесь температуры воды до 11 °С.

Многолетний опыт ведения промысла в осенний сезон показал, что даты подхода крупной хамсы и образования промысловых скоплений мелкой от года к году меняются и не всегда совпадают со сроками перехода температуры воды через указанные характерные значения. Это существенно затрудняет планирование и рациональное ведение промысла. Кроме того, в отдельные годы крупная

хамса в восточной части моря вообще обнаружена не была и основу вылова составляла молодь.

Учитывая указанные обстоятельства с 1983 г. АзЧерНИРО начаты специальные полигонные исследования в восточной части моря с целью выяснения механизмов, определяющих распределение и формирование здесь промысловых скоплений хамсы. Первые результаты изложены в работе [12]. Мы продолжили исследования, разделив их на три этапа. По нашим представлениям в первую очередь необходимо решить задачу: от чего зависит распределение хамсы по акватории открытой восточной части моря до образования ею промысловых скоплений. Это поможет ответить на вопрос, что является основой механизма подхода рыбы в 5-мильную прибрежную зону. И, наконец, на третьем этапе необходимо установить, какие условия определяют формирование, динамику и устойчивость промысловых скоплений в период промысла. Полное решение указанного комплекса задач является делом будущего и может составить существенную часть научного обоснования методики краткосрочного прогнозирования промысла.

Группа авторов [12] предложила оригинальные гипотезы о влиянии температурных условий у турецкого побережья и гидрометеорологических обстоятельств у побережья Грузии на интенсивность миграции хамсы в восточную часть моря и образование ею промысловых скоплений в 5-мильной советской зоне. В данной работе мы попытались исследовать особенности распределения рыбы в открытой восточной части моря в предпромысловый период и механизм ее миграции в прибрежную зону.

В результате анализа материалов декабрьских 1985—1987 гг. параллельных траловых и океанографических съемок оказалось, что в этот период в открытой части моря хамса придерживается струи ОЧТ и скапливается на периферии ее циклонических меандров (рис. 28) — участки разворота струи против часовой стрелки. Выделить эти зоны легко по положению изогалины 20 ‰ на горизонте 100 м (*2*), а также по картам динамической топографии. Соленость здесь, таким образом, превышает 20 ‰, а температура воды на поверхности значительно ниже окружающей и колеблется от 9 до 14 °С в зависимости от мощности меандра и времени его существования. Справа от струи ОЧТ и в прибрежной зоне температура воды на поверхности в это время достигает 12—15 °С. Такое распределение характеристик обусловлено подъемом в районах циклонических круговоротов глубинных соленых и холодных вод, а также скоплением в центрах антициклонических круговоротов распресненных и более прогретых поверхностных вод.

В период выполнения полигона 9—12 декабря 1987 г. над акваторией района проходил циклон, определивший смену юго-восточного штормового ветра на такой же по силе северо-западный, который сохранился в течение 2 сут до конца съемки. В это время мы повторили два океанографических и траловый разрезы, что позволило оценить влияние смены ветровой ситуации на положение струи ОЧТ и выявить связь ее динамики с перемещениями скоплений хамсы. Из рис. 28*б* следует, что после шторма струя ОЧТ (ее циклонический меандр с температурой воды в центре менее 12 °С) сместилась на 15 миль в северо-западном направлении, а вместе с ней сместились и обнаруженные здесь скопления хамсы — в зоне расположения меандра до шторма после повторения тралового разреза рыбы не оказалось.

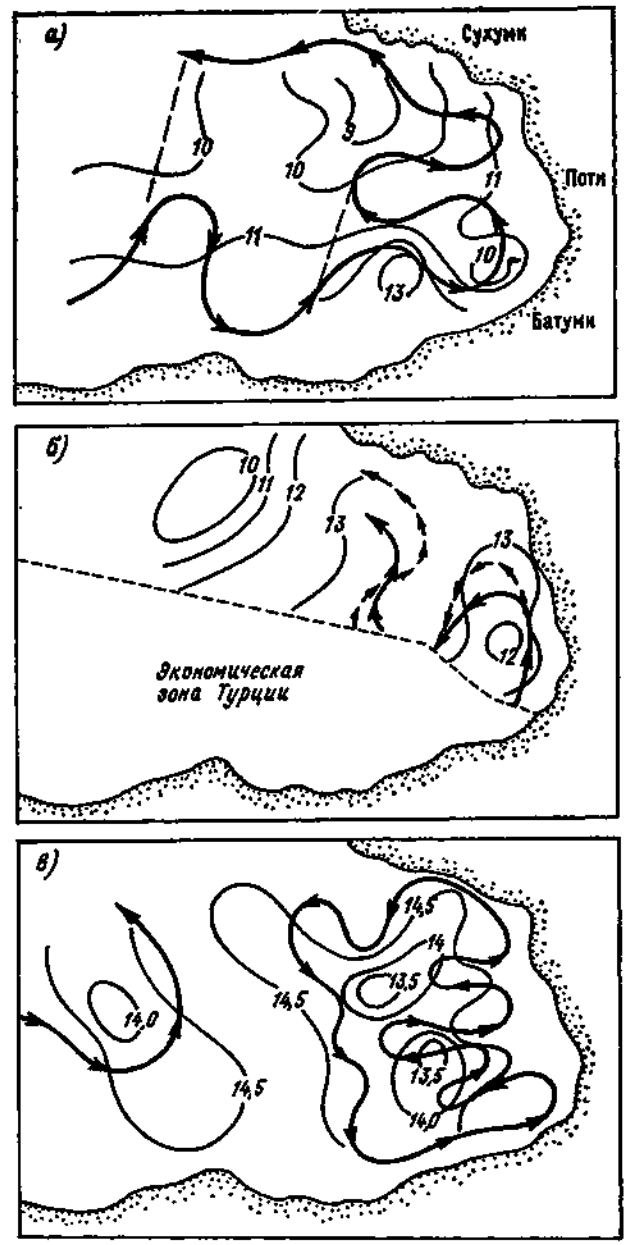

Рис. 28. Распределение температуры воды на поверхности (°С) и положение струи основного черноморского течения зимой 1986 (*а*), 1987 (*б*) и 1985 (*в*) гг.

Штриховые стрелки — линия возможного отрыва меандров.

Таким образом, есть основания полагать, что одним из основных факторов, определяющих распределение хамсы, являются динамические условия — конфигурация струи ОЧТ. В предпромысловый период рыба скапливается в открытой части моря в «динамических ловушках» — зонах, расположенных по краям струи основного черноморского течения и характеризующихся циклонической завихренностью циркуляции, значительными горизонтальными градиентами температуры в поверхностном слое. Подход же хамсы к берегу происходит после отрыва такого меандра от струи ОЧТ, причем вместе с рыбой оторвавшийся вихрь пере-

носит в прибрежную зону и свои физические характеристики. Таким образом, связь подходов хамсы с переходом температуры в п. Батуми через характерные значения оказывается не функциональная, а механическая — рыба идет не в зону с благоприятными для скопления температурными условиями, а смещается к берегу вместе с этой зоной, локализованной циклоническим круговоротом. Естественно, что не каждый циклонический меандр может оказаться «ловушкой» для хамсы. Это, очевидно, зависит от его мощности, размеров, времени существования, запасы рыбы, ее биологического состояния. Поэтому и не являются редкостью случаи, когда переход температуры воды в прибрежной зоне через характерное значение произошел, а подхода рыбы не наблюдается — т. е. от струи ОЧТ оторвался «холостой» меандр или температура воды понизилась в результате естественного выхолаживания, а не адвекции с открытой части моря. После анализа динамических ситуаций, наблюдавшихся в исследуемом районе в предыдущие годы, мы убедились в том, что отрыв от струи ОЧТ циклонических меандров — довольно типичное для любого времени года явление.

В отдельных случаях оторвавшийся круговорот может занимать практически всю акваторию восточной части моря (рис. 28*в*), а иногда только ее часть. На рис. 28*а* штриховыми линиями показаны линии возможного отрыва меандров. Если отрывается малый круговорот — промысловая обстановка у берега может временно улучшиться, но по мере перераспределения подошедшей рыбы и смешения холодной воды меандра с окружающими более теплыми прибрежными водами, успешность промысла снижается до поступления очередной «порции» рыбы с новым меандром. В случае же отрыва большого меандра устойчивая промысловая обстановка сохраняется продолжительное время. Реальность описанного механизма подтверждается многолетним опытом промысла.

Отрыв большого меандра в 1985 и 1987 гг. произошел после штормового северо-западного ветра. Зимой же 1984 г., когда промысловая обстановка в восточной части моря оставалась крайне неблагоприятной в течение всей путины, над морем преобладали юго-западные ветры, при которых, очевидно, не происходит отрыва вихрей от струи основного черноморского течения и рыба в прибрежную зону не подходит.

Описанные динамические ситуации, определяющие формирование пятен относительно холодной глубинной воды в поверхностном слое восточной части моря и связанных с ними скоплений хамсы, хорошо отражаются на космических снимках поверхности моря и могут дистанционно фиксироваться без специальных океанографических съемок.

Приведенные факты и предложенная на их основании гипотеза безусловно нуждаются в дальнейшем статистическом подтверждении и проверке. Тем не менее уже сейчас при выполнении учетных траловых съемок в период, предшествующий началу промысла хамсы, следует концентрировать внимание при поиске на зону струи основного черноморского течения, выделяя ее предварительно по гидрологическим данным. Дальнейшая идентификация гидрологической и ихтиологической информации с космическими снимками позволит дистанционно (при помощи установок по приему космической информации, расположенных на берегу) фиксировать наличие рыбы в открытой части моря и контролировать ее подходы в прибрежную зону, оперативно прогнозировать даты и районы начала промысла.

4. ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЫБОПРОМЫСЛОВОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ В ЧЕРНОМ МОРЕ

Аппарат рыбопромыслового прогнозирования в Черном море строится на принципах системного подхода к функционированию экосистемы. В этой структуре, как следует из предыдущих глав, основными экологически значимыми параметрами являются: тепловой фон моря, особенности циркуляции его вод (наличие вихревых образований, зон конвергенции и дивергенции, струйных течений), гидрохимический режим и условия стратификации, а также степень волнения, режим солености и осадконакопления. Учитывая тот факт, что море не имеет своих внутренних источников энергии, изменения указанных экологических параметров определяются в основном характером атмосферных процессов над акваторией моря, которые в свою очередь могут быть связаны с солнечной активностью.

Предполагается, что тепловое излучение солнца (корпускулярное, рентгеновское и радиоизлучение) может влиять на процессы воспроизводства и поведение различных промысловых видов рыб Черного моря по двум направлениям. С одной стороны,— через характер атмосферного переноса; оно определяет ветровой режим, особенности поля течений, а следовательно, и теплозапас, плотностную структуру, гидрохимический режим моря. С другой стороны,— не исключено непосредственное влияние солнечной активности на характер протекания биохимических процессов в организмах гидробионтов и, следовательно, на их биологическое состояние на разных стадиях развития, что также определяет особенности их урожайности, динамики численности и поведения.

Значения солнечной активности в виде средних годовых чисел Вольфа (Цюрихское число) широко используются в промысловой океанографии для формальных статистических сопоставлений с различными родами биологических и промысловых показателей. Этому способствует длина ряда наблюдений за этим параметром — с 1983 г., а также весьма устойчивые его циклические колебания, в основном с периодом 11 лет.

Вторым предиктором, используемым в черноморском рыбопромысловом прогнозировании, являются индексы атмосферной циркуляции, полученные в результате разложения в ряд по полиномам Чебышева поля приземного атмосферного давления, включающего 16 точек над акваторией моря, расположенных через 2° по широте и через 4° по долготе (рис. 29).

Вычислялись пять основных коэффициентов: A_{30}, A_{01}, A_{10}, A_{02} и A_{20}. Первый является средним давлением поля, второй отражает интенсивность юго-северного переноса (северо-южного при отрицательном значении), третий — интенсивность западно-восточного переноса (восточно-западного при отрицательном значении), четвертый и пятый — соответственно разнонаправленный меридиональный перенос в западной и восточной половине моря

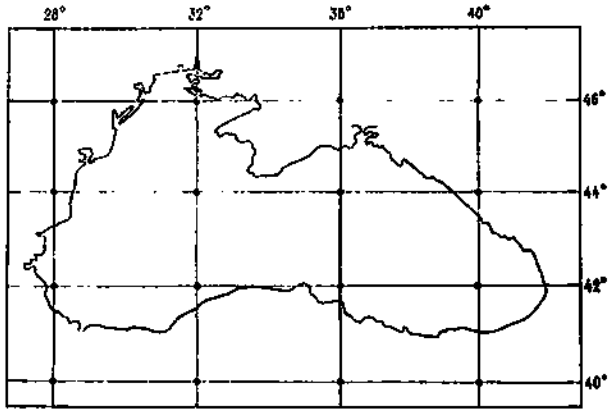

Рис. 29. Стандартная сетка для разложения барического поля в ряд по полиномам Чебышева.

(циклоническое вращение при положительном значении) и зональный в северной и южной (с востока на запад в первой и с запада на восток во второй).

В прогностических моделях использованы в основном первые три коэффициента, как отражающие наиболее простые механизмы воздействия: среднее давление, общий меридиональный и зональный перенос, а также некоторые комбинации из них. Расчет коэффициентов выполнен по

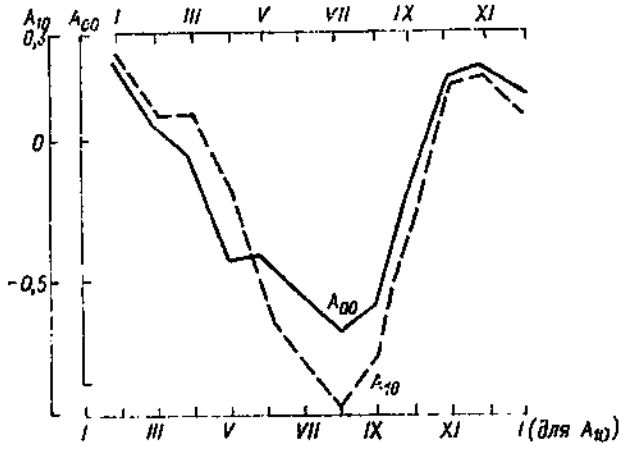

Рис. 30. Сезонный ход средних многолетних месячных значений коэффициентов A_{00} и A_{10}.

ежедневным барическим картам с последующим помесячным осреднением для периода с 1960 по 1980 г. (в некоторых случаях до 1983 г.).

Средние многолетние месячные значения среднего по выбранному полю давления и меридионального переноса (A_{00} и A_{10}) весьма четко отражают сезонный ход, почти как температура воды или воздуха (рис. 30). Вдобавок кривая значений A_{10} очень близка к A_{00} при сдвиге на один месяц назад. Максимум A_{00} приходится на январь, минимум — на июль, в то время как A_{10} имеет максимум в феврале и минимум в августе. Остальные индексы атмосферного переноса не проявляют такого правильного хода (в многолетнем помесячном осреднении). Таким образом, выбранное поле оказалось репрезентативным для отражения характерного процесса сезонных изменений среднего давления и меридионального переноса, а также связи между ними. Это обстоятельство использовано нами в прогностических целях.

Третьим предиктором выбран тепловой фон. В самом общем смысле этим термином мы обозначаем уровень теплозапаса вод Черного моря, отражаемый в различных его частях средней месячной температурой. Несмотря на большое количество наблюдений за этой характеристикой на акватории моря регулярные данные имеют место только на береговых пунктах наблюдений станций Госгидромета СССР. Длина ряда ежедневных наблюдений в п. Батуми достигает, например, 60, а в п. Одесса даже 70 лет. Каждый из этих рядов в разной степени отражает уровень теплозапаса некоторого прилегающего объема вод. Наиболее удаленный от открытого моря пункт в п. Одесса имеет колебания температуры, в наибольшей степени отражающие изменения погоды и весьма сходные с колебаниями температуры воздуха. Данные батумского ряда оказались, наоборот, наиболее сходными со средней температурой поверхностного слоя открытого моря, вычисленной по результатам многолетней стандартной летней (август) съемки АзЧерНИРО. Коэффициент корреляции указанных рядов 0,72. Это подтверждает предположение о том, что значение температуры в п. Батуми, расположенном в районе с наименьшей прибрежной отмелью и в зоне наименьшего теплообмена [80], является репрезентативным как показатель уровня теплового фона всего Черного моря.

Как указывалось выше, принятый масштаб осреднения для показателей теплового фона является месяц. Однако в некоторых случаях оказался показательным уровень теплового фона за полугодовой период от минимального значения температуры воды в годовом ходе (март) до максимального (август). Индекс теплового фона Черного моря определяется следующим образом:

$$Q = \sum_{III}^{VIII} \bar{T}_m \cdot 6^{-1},$$

где $\bar{T}_m$ — средняя месячная температура поверхностного слоя конкретного года с марта по август, измеренная в п. Батуми.

Косвенной характеристикой теплового фона моря является дата перехода температуры воды через определенные значения при весеннем перегреве или осеннем выхолаживании. Эти даты являются предиктантами в гидрометеорологическом прогнозировании и служат предикторами в комплексом промысловом прогнозе.

Аппарат функционального типа моделирования, которому мы следуем, включает регрессионный, корреляционный факторный анализ, а также анализ временных рядов, кластерный и метод самоорганизации. Однако специфика черноморского промыслового прогнозирования создает определенные проблемы, в основе которых лежит нестацио-

нарность рядов и статистическое распределение, далекое от нормального, в выборках биологических и промысловых показателей. Диапазон изменений запаса рыб, например, может достигать четырех порядков, а элементы их поведения часто оцениваются качественно. Распространенный в промысловой океанологии метод выявления спектра циклических колебаний в прогнозируемых рядах или в ассоциированных с ними абиотических параметрах оказался, к сожалению, пригодным лишь для весьма общих и грубых оценок на дальнюю перспективу.

Наиболее широко применяемые корреляционный и регрессионный анализы используются и в методике прогнозирования по району Черного моря. В то же время короткие ряды, их несравнимость из-за нестационарности биологических показателей, нелинейность связей предопределяют низкие значения коэффициентов корреляции и малую обеспеченность уравнений регрессии. Общеизвестно также, что промысловый прогноз во многих случаях не требует высокой точности или детализации, а бывает достаточным при оценке тенденции, принадлежности предиктанта к одному из нескольких крупных классов или выявлении года-аналога. Практикой доказана полезность и необходимость применения методов дискретной математики, таких, как кластерного или метода ранговой корреляции.

4.1. Анчоус

По данным А. Г. Архипова и А. К. Чащина урожайность черноморского анчоуса косвенно оценивается по среднему количеству экземпляров молоди, выловленных на станциях учетной съемки в августе на определенных акваториях стандартным мальковым тралом. Ими представлены такие значения с 1965 по 1985 г. по двум основным районам, северо-западному шельфу моря (ограниченному берегом и линией Дунай — м. Тарханкут) и его юго-восточной части (от п. Лазаревское до Батуми), отражающие динамику пополнения промыслового стада хамсы (табл. 10).

Из табл. 10 видно, что среднее количество молоди хамсы на северо-западном шельфе Черного моря, в особенности после 1970 г., пропорционально десятичному логарифму аналогичного значения в юго-восточной части.

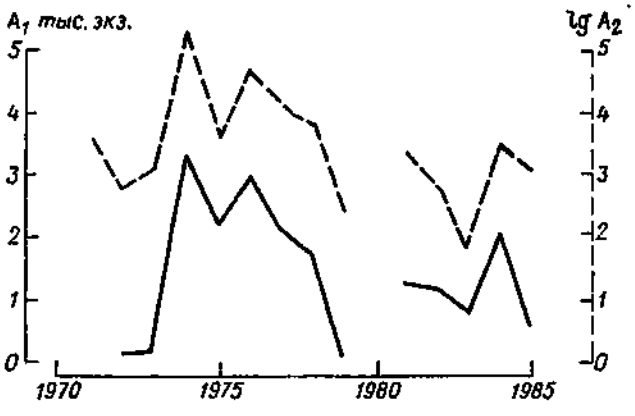

Рис. 31. Сопоставление средних количеств молоди хамсы по данным августовских учетных съемок северо-западного шельфа (A_1) и юго-восточной части моря (A_2).

Таблица 10

Косвенный показатель урожайности черноморского анчоуса по годам

Год	Среднее количество экземпляров на учетной съемке по районам		$\lg A_2$ (E)	Диапазоны (классы) E
	северо-западный шельф (A_1)	юго-восточная часть моря (A_2)		
1965	2 571	7 838	3,89	С
1966	7 881	211	2,32	Н
1967	23 658	7 800	3,89	С
1968	8 924	9 336	3,97	В
1969	622	84 753	4,93	В
1970	—	—	—	—
1971	—	4 433	3,65	С
1972	74	551	2,74	Н
1973	154	1 029	3,01	Н
1974	3 356	163 415	5,21	В
1975	2 223	3 503	3,54	С
1976	2 990	48 073	4,68	В
1977	2 156	16 774	4,22	В
1978	1 725	6 886	3,84	С
1979	33	285	2,46	Н
1980	—	—	—	—
1981	1 319	2 637	3,42	С
1982	1 222	878	2,94	Н
1983	774	67	1,83	Н
1984	2 043	3 090	3,49	С
1985	589	1 183	3,07	Н

Особенно наглядно это иллюстрируется рис. 31, где сравнивается первый показатель A_1 с десятичным логарифмом второго A_2.

Эта пропорциональность свидетельствует в пользу предположения о том, что урожайность определяется не локальными особенностями конкретных регионов, а общим состоянием моря в плане его динамического или термического режима в конкретные годы. Она позволяет также представить индекс урожайности в виде

$$E = \lg A_2.$$

В табл. 10 даны значения E, а также их оценка по трем равновероятным диапазонам (классам).

Построенная как обобщенная матрица вероятных переходов табл. 11, показывает нам связи характеристики урожайности E с определяющими ее абиотическими параметрами: со средним апрельским и средним майским значением температуры

Таблица 11

Сводная матрица связей (в % соответствия равновероятных диапазонов) урожайности черноморского анчоуса и определяющих ее параметров (обозначения в тексте)

↓	$A_{\Sigma-IV}$			T_{B-IV}			T_{B-V}		
	Н	С	В	Н	С	В	Н	С	В
	33	25	17						
С	56	62	17						
В	11	12	67						
Н	45	50	00	62	45	00	60	50	11
С	33	38	33	38	28	29	00	33	33
В	22	12	67	00	27	71	20	17	56
Н	00	33	60	00	25	60	00	10	80
С	40	50	20	33	50	20	00	60	00
В	60	17	20	67	25	20	100	30	20

в п. Батуми ($T_{Б-IV}$ и $T_{Б-V}$) и индексом атмосферной циркуляции в апреле, являющимся суммой зонального и меридионального переноса ($A_{\Sigma-IV} = A_{01} + A_{10}$). В табл. 12 даны значения

Таблица 12

Равновероятные диапазоны характеристик табл. 11

Характеристика	< Н	С	⩾ В
E	3,2	3,2—3,9	3,9
$A_{\Sigma-IV}$	—0,4	—0,4...—0,2	0,2
$T_{Б-IV}$	11,0	11,0—11,7	11,7
$T_{Б-V}$	15,1	15,1—16,5	16,5
Q	17,5	17,5—18,0	18,0

равновероятных диапазонов перечисленных характеристик по трем градациям: низкие Н, средние С и высокие В. Эти обозначения приняты и для сводных матриц.

В соответствии с условием достоверности, изложенном выше, для сводной матрицы отобраны только информативные (прогностические) частные матрицы, т. е. с суммой одной из диагоналей, равной или превосходящей 150 %, или отдельными переходами с вероятностью в 70 % и более. Все остальные пробные варианты или неинформативные матрицы связей этих же параметров не проводятся.

По данным сводной матрицы, которая далее используется как прогностическая, построен граф

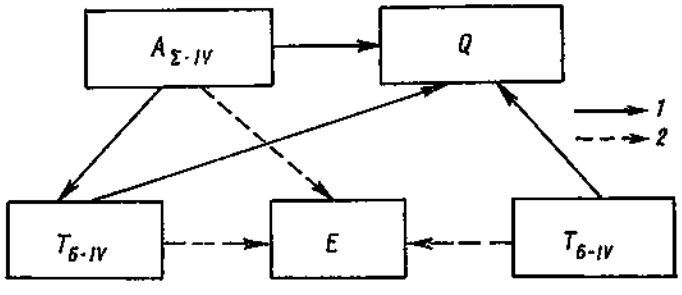

Рис. 32. Граф связей урожайности черноморского анчоуса и определяющих ее параметров.
1 — прямая связь; *2* — обратная.

связей для объяснения предполагаемого механизма взаимодействия гидрометеорологических процессов и их влияния на урожайность анчоуса (рис. 32).

На графе все ребра прямых связей обозначают, что атмосферный перенос в апреле с запада на восток и с юга на север обусловливает повышенную температуру воды в п. Батуми, как указывалось выше, отражающую общий теплозапас поверхностного слоя вод моря, в апреле, мае и затем в целом по август (определение Q, данное ранее). И все эти параметры (кроме Q) связаны обратной связью с урожайностью анчоуса, что отражают остальные ребра. Таким образом, получается, что благоприятные условия для воспроизводства анчоуса обеспечивается переносом с севера и востока, что создает предпосылки для развития характерной для Черного моря системы циркуляции вод в виде двух циклонических круговоротов.

Можно предположить, что северные и восточные ветры отражают для региона Черного моря также преобладание антициклонического типа погоды, которая определяет в апреле и мае более интенсивный фотосинтез (повышенная освещенность), а следовательно, и успешное развитие кормовой биомассы для молоди анчоуса. Пониженный тепловой фон при этом создается благодаря интенсивному ветровому перемешиванию.

Наличие ряда взаимосвязанных параметров позволяет осуществлять так называемое «сетевое» прогнозирование, с последовательным уменьшением заблаговременности, уточнением прогноза и представлением его в вероятностной форме. Предположим, что величина $A_{\Sigma-IV}$, рассчитанная по ежедневным картам приземной барики, превосходит 0,2, а температура воды в п. Батуми, средняя за апрель, более 11,7 °С. В этом случае матрица вероятных переходов (соответствующее ребро графа) $A_{\Sigma-IV} - E$ показывает, что вероятность низкой урожайности, т. е. менее 3,2, равна 60 %, а среднего и высокого значения по 20 %. В соответствии с матрицей $T_{Б-IV} - E$ получаются те же результаты. Если температура мая остается на повышенном уровне ($T_{Б\cdot V} \geqslant 16{,}5$), то вероятность низкого уровня в соответствии с матрицей $T_{Б\cdot V} - E$ превысится до 80 %.

Прогнозируемое значение E трансформируется затем в среднее количество экземпляров молоди на съемках в обоих районах и далее в общее количество пополнения в миллиардах штук.

Главным элементом поведения черноморского анчоуса является время образования зимовальных скоплений в ноябре — декабре в юго-восточной части моря. Как указывается Н. Н. Данилевским и А. А. Майоровой, этот срок обусловлен жирностью анчоуса и интенсивностью выхолаживания. По оценкам биологов, в том числе А. К. Чащина, он совпадает приблизительно с датой перехода температуры воды в юго-восточной части моря (мы считаем репрезентативными данными наблюдения за этой характеристикой в п. Батуми) через 14 °С. Затем при выхолаживании ниже 11 °С к зимующим старшим возрастным группам присоединяется молодь. Предсказание дат вышеуказанных переходов, в первую очередь первого, является основной гидрометеорологической частью общего промыслового прогноза. Этот прогноз наиболее значим в производственном плане, поскольку время начала путины, в которой бывает задействовано до 120 (малотоннажных) судов и множество рыбообрабатывающих предприятий, определяет в значительной степени ее успех и экономическую эффективность.

Физической основой гидрологического прогноза темпа осеннего выхолаживания является тепловая инерция моря. Дата перехода через 14 °С заведомо связана со средней месячной температурой ноября. Коэффициент корреляции оказался равным 0,76, его значимость — на уровне 95 %, уравнение регрессии —

$$Д_{14} = 6{,}2T_{Б-XI} - 67,$$

где $Д_{14}$ — количество дней после 31 декабря; $T_{Б-XI}$ — средняя температура воды в ноябре в п. Батуми, имеет обеспеченность невыхода за 20 % природной амплитуды 85 %. Матрица вероятных переходов имеет сумму относительных вероятностей на главной диагонали 1,95. Равновероятные

Таблица 13

Равновероятные диапазоны дат перехода температуры воды в п. Батуми через 14° С и 11° С при осеннем выхолаживании и связанных с ними параметров

Показатели	< Н	С	≥ В
Переход через 14 °С	6—30 XI	1—11 XI	12—28 XII
$Д_{14}$	32	33—42	42
Переход через 11 °С	5—31 XII	1—17 I	17 I—11 II
$Д_{11}$	31	31—48	48
$T_{Б-VII}$	24,0	24,0—24,8	24,8
$T_{Б-VIII}$	24,9	24,9—25,9	25,9
$T_{Б-IX}$	23,4	23,4—24,4	24,4
$T_{Б-X}$	19,6	19,6—20,8	20,8
$T_{Б-XI}$	15,8	15,8—17,2	17,2
$T_{Б-XII}$	12,2	12,2—13,4	13,4

диапазоны этих показателей, как и всех прочих, задействованных в прогностической модели, даны в табл. 13.

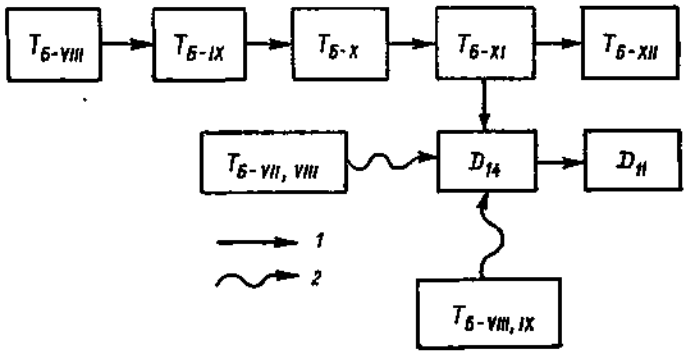

Рис. 33. Граф связей начала массового промысла черноморского анчоуса и определяющих его параметров.
1 — прямая связь; *2* — частные связи.

Тепловая инерция моря, выраженная матрицами вероятных переходов средних месячных значений Батумского ряда при последовательном сопоставлении проявляется от августа по декабрь с 1925 по 1985 г. Эта особенность наглядно иллюстрируется графой прогностической модели (рис. 33).

Таблица 14

Комплексные матрицы связей (% соответствия равновероятных диапазонов) даты начала путины черноморского анчоуса и определяющих ее параметров (обозначения в тексте)

$Д_{14}$	ННН	НС	НВ	СН	СС	СВ	ВН	ВС	ВВ
				$T_{Б-VII; VIII}$					
Н	50	30	00	36	00	33	00	30	31
С	50	40	00	28	100	33	50	50	19
В	00	30	100	36	00	33	50	20	50
				$T_{Б-VIII; IX}$					
Н	23	56	00	67	22	17	33	20	33
С	54	11	100	00	67	50	33	40	9
В	23	33	00	33	11	33	33	40	58

Таблица 15

Матрицы связи (% соответствия равновероятных диапазонов) между сроком начала зимовки анчоуса ($Д_{14}$) и подходом молоди (диапазон в табл. 13)

$Д_{11}$	Н	С	В
Н	63	33	00
С	32	52	7
В	5	14	65

Практическое прогнозирование даты начала путины может осуществляться по комплексным матрицам, где в качестве начальных состояний используются комбинации (перестановки) из диапазонов июльской и августовской температуры $T_{Б-VII; VIII}$, а также из августовской и сентябрьской $T_{Б-VIII; IX}$ (см. табл. 14).

Прогноз даты подхода на зимовку молоди анчоуса $Д_{11}$ производится по значению $Д_{14}$ как по предиктору с помощью матрицы их связи (табл. 15).

Заблаговременность первого прогноза достигает 2 месяцев с последующим уточнением в конце сентября, заблаговременность второго — около месяца.

4.2. Шпрот

Урожайность шпрота представляется Г. С. Юрьевым в виде двух показателей: пополнения (по численности молоди в миллиардах штук), оцениваемого во время учетной траловой съемки в апреле (МШ), и общего запаса шпрота (в тысячах тонн), получаемого во время майской съемки (Ш). Первая характеристика отражает выживаемость поколения в период с ноября по март (период интенсивного нереста) текущего года, поэтому сопоставляется с гидрологическими показателями синхронно. Вторая — пополнение в предшествующем году, поэтому аналогичное сопоставление осуществляется со сдвигом ряда предиктанта на один шаг (год) назад.

Обе характеристики, естественно, связаны между собой, и каждая в отдельности со средней мартовской температурой воды в п. Батуми ($T_{Б-III}$). Соответствующая сводная матрица дана в виде

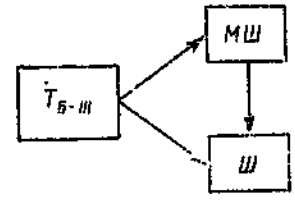

Рис. 34. Граф связи температуры воды в п. Батуми в марте с запасом черноморского шпрота и количеством его молоди.

табл. 16 (значение диапазонов в табл. 17), а связь иллюстрируется простейшим графом (рис. 34).

Физический смысл связи весьма прост. Повышенный тепловой фон в период его годового

Таблица 16

Сводная матрица связи (в % соответствия равновероятных диапазонов) между запасом шпрота, количеством его молоди и температурой воды в п. Батуми в марте (обозначения в тексте)

Показатель	$T_{Б-III}$			МШ		
	Н	С	В	Н	С	В
МШ						
Н	50	00	14			
С	25	67	43			
В	25	00	43			
Ш*						
Н	100	50	20	100	23	50
С	00	17	40	00	33	00
В	00	40	40	00	33	50

* Запас шпрота сопоставляется при сдвиге на один год назад.

минимума благоприятен для выживания молоди шпрота и пополнения запаса последующего года. Средняя мартовская температура может косвенно отражать количество солнечных дней в зимний период, а следовательно, интенсивное продуцирование фитопланктона, которое, как известно, не прекращается полностью в открытой, особенно в юго-восточной, части моря и зимой. Обеспечивается таким образом необходимая кормовая база для личинок. Во всяком случае, температура за март в данном пункте служит предиктором для прогноза количества молоди с месячной заблаговременностью (проверка во время апрельской съемки) и

Таблица 17

Равновероятные диапазоны характеристик табл. 16

Показатель	< Н	С	⩾ В
МШ	8,7 30	8,7—9,4 30—60	9,4 60
Ш	440	440—530	530

для общего запаса шпрота с годовой заблаговременностью. Надежным аргументом для последнего прогноза является непосредственное количество молоди шпрота, рассчитанное по материалам съемки. В табл. 16 оно связано с последующим запасом при низком значении 100-процентным соответствием. Средний и высокий диапазоны имеют существенную неопределенность, поэтому наш гидрологический предиктор дает дополнительную информацию, создавая единичный элемент прогностической сетки.

Наиболее значимым элементом *поведения* шпрота является начало миграции после окончания нереста в прогревающиеся шельфовые воды. В это время начинается его массовый промысел, в основном на северо-западном шельфе. Установлено, что этот срок связан с темпом весеннего прогрева и совпадает с переходом температуры воды поверхностного слоя в п. Одесса через 10 °С [3]. Допустимо предположить, что достижение в это время водами шельфа температуры 8—9 °С ликвидирует горизонтальный градиент зимнего периода между ними и водами открытого моря, по времени совпадает с весенней вспышкой фито- и зоопланктона, служит сигналом для перемещения скоплений шпрота, располагающихся у свала шельфа, на отмель.

Обозначенный срок перехода зависит от уровня теплового фона черноморских вод в период зимнего выхолаживания и интенсивности весеннего прогрева. Показателем первого может служить средняя температура февраля (минимум в годовом ходе по Одесскому ряду), показателем второго — средняя температура марта.

Произведенный в соответствии с этими положениями регрессионный анализ дал следующие результаты.

Связь сроков окончания нереста шпрота с минимальной зимней температурой (T_{II}) имеет коэффициент корреляции, равный 0,73, а с интенсивностью весеннего прогрева T_{III} — 0,80, с уровнем значимости 1 %.

Уравнения регрессии имеют следующий вид:

$$Д = 31{,}4 - 6{,}9T_{II};$$

$$Д = 43{,}0 - 5{,}9T_{III},$$

где Д — количество суток до начала активных миграций шпрота в пределы северо-западного шельфа после 1 апреля.

Обеспеченность уравнений, исходя из частоты невыхода сроков из предела, равного 20 % амплитуды ряда, соответственно 58 и 83 %.

Первое из уравнений используется для ориентировочного прогноза начала массового промысла с заблаговременностью более одного месяца, а второе — для точного прогноза с недельной заблаговременностью.

4.3. Ставрида

В качестве природных физических индексов, определяющих *урожайность* ставриды, использованы солнечная активность W и индекс теплового фона Q. Первая характеристика благодаря возможности экстраполяции может быть предиктором прогноза с заблаговременностью в год и более. Вторая, наблюдаемая в период учетной съемки, может служить как аргумент при расчете пополнения или для прогноза запаса на последующие годы.

На рис. 35 заметно, что урожайность черноморской ставриды A имеет прямую связь с солнечной активностью. Обратная связь с тепловым фоном из-за нестационарности ряда значений урожайности количественно выражается слабо ($A = W \cdot 0{,}43$). Для данного случая применена ранговая корреляция [36].

Ряд значений урожайности разделен на 10 классов (табл. 18). Они не равноценны и входящие в них значения не непрерывны (например, класс 8 и 9), но их последовательность выражает увеличение от начала к концу (принцип ранжирования). Классы построены, кроме того, с таким расчетом, чтобы на каждый из них приходился по крайней мере один год. В следующей графе проставлены годы со значениями урожайности, входящими в пределы соответствующих классов.

Далее вычислены средние значения солнечной активности и теплового фона Q для каждой группы лет. Связь перечисленных характеристик выявлена с помощью ранговой корреляции (табл. 19).

Коэффициенты τ и ρ являются значимыми по своим значениям (0,75—0,61) и по их оценкам, при которых P для τ определяется и обозначает, что сумма приписных значений при расчете τ такова, что вероятность достижения ее или превышения не переходит 5 %-ный предел. Последнее

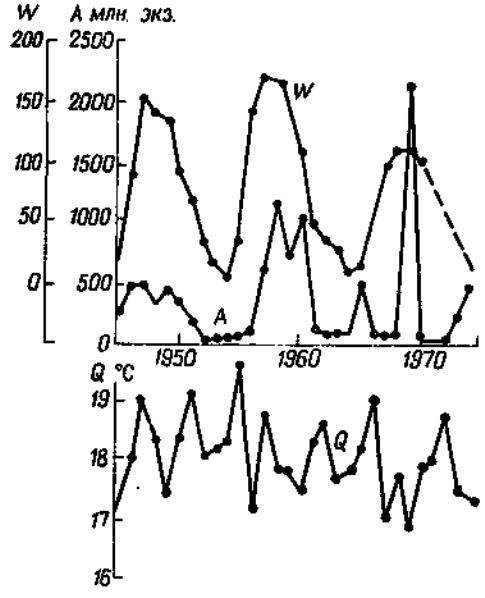

Рис. 35. Сопоставление урожайности черноморской ставриды (A) со значениями солнечной активности (W — числа Вольфа) и тепловым фоном моря (Q).

значит, что величина τ существенна и свойства зависимы в исходной совокупности.

Физическая основа связи урожайности с тепловым фоном предполагается в том, что последний

Таблица 18

Группа лет с соответствующими классами урожайности черноморской ставриды, средними значениями солнечной активности и теплового фона (обозначения в тексте)

Класс урожайности	Урожайность, млн экз.	Год с урожайностью соответствующего класса	W	Q
1	0—50	1952, 1953, 1954, 1955, 1962, 1964, 1967, 1968, 1970, 1971, 1972	50 (2)	18,19 (9)
2	50—100	1956, 1963, 1966	73 (5)	17,97 (6)
3	100—150	1951, 1961	60 (3)	18,75 (10)
4	150—200	1945	30 (1)	17,30 (1)
5	200—400	1948, 1950, 1973	83 (6)	18,07 (7)
6	400—500	1946, 1947, 1949	130 (8)	18,13 (8)
7	500—600	1957, 1965, 1974	68 (4)	17,93 (5)
8	600—800	1959	160 (10)	17,80 (4)
9	1000—1200	1960	110 (7)	17,50 (3)
10	1200	1958, 1959	140 (9)	17,35 (3)

при своих низких значениях отражает интенсивность подъема глубинных вод, которые обусловливают повышенную биологическую продуктивность, а следовательно, кормовую базу и выживаемость личинок черноморской ставриды в летний период. Предполагаемая роль солнечной активности обсуждалась выше.

Коэффициенты связи между самими природными аргументами не значимы. Следовательно, они влияют на урожайность независимо друг от друга.

Таблица 19

Коэффициенты корреляций (обозначения в тексте)

Коэффициент корреляции		Коэффициент ранговой корреляции		Коэффициент Спирмена			
r_{AW}	r_{AQ}	τ_{AW}	τ_{AQ}	τ_{WQ}	ρ_{AW}	ρ_{AQ}	ρ_{WQ}
0,43 +0,29	−0,17 —	0,56 ($P = 0{,}026$)	−0,51 ($P = 0{,}046$)	−0,22 —	0,75 —	−0,61 —	−0,20 —

Возможно поэтому кривая урожайности имеет такую форму. Видимо, только совместный учет обоих независимых факторов может дать нам возможность долгосрочного прогноза урожайности.

Для ретроспективной оценки урожайности ставриды, а следовательно для прогноза ее запаса, может быть использована идея о зависимости между количеством особей какого-либо промыслового вида рыб и их распространением в поле определенной океанографической характеристики. В. Ф. Ройс, рассматривая вопрос о динамике численности, утверждает, что «...как только численность популяции возрастает, она стремится занять большую площадь, и эта площадь обычно включает зоны, которые менее пригодны для существования».

Выявление подобной связи выполнено нами для черноморской ставриды и поля температуры [10].

Таблица 20

Численность черноморской ставриды P, оцененная по промысловому возврату (млн шт.), эксцесс распределения сеголетков в температурном поле E и число станций учетных октябрьских съемок

Год	P	E	η
1971	16	10,75	28
1972	83	12,62	28
1973	138	2,60	30
1974	1120	0,65	47
1975	10	34,00	32

Материалом исследования послужили данные уловов во время октябрьских учетных съемок АзЧерНИРО 1941—1945 гг., выполняемых в 50-мильной прибрежной зоне восточной части Черного моря от Батуми до Таманского полуострова. При этом значения температуры воды поверхностного слоя, получаемые в каждой точке траления пелагическим 30-метровым тралом, использованы для оценки распределения сеголетков ставриды в температурном поле (табл. 20).

Уловы сеголетков ставриды текущего года каждого траления октябрьской съемки соотносились со значениями температуры воды поверхностного слоя в каждой точке траления, и определялось общее распределение рыбы этой возрастной группы в интервалах температуры по 0,5 °С каждый. Получены гистограммы распределения сеголетков в температурном поле для каждого года (рис. 36). Гистограммы весьма различны. При этом большая численность ставриды не совпадает с более широким диапазоном температуры, если оценивать по основаниям гистограмм. В то же время форма гистограмм показывает признаки соответствия большей численности ставриды меньшей «крутизне» последних. Следовательно, расширение температурного

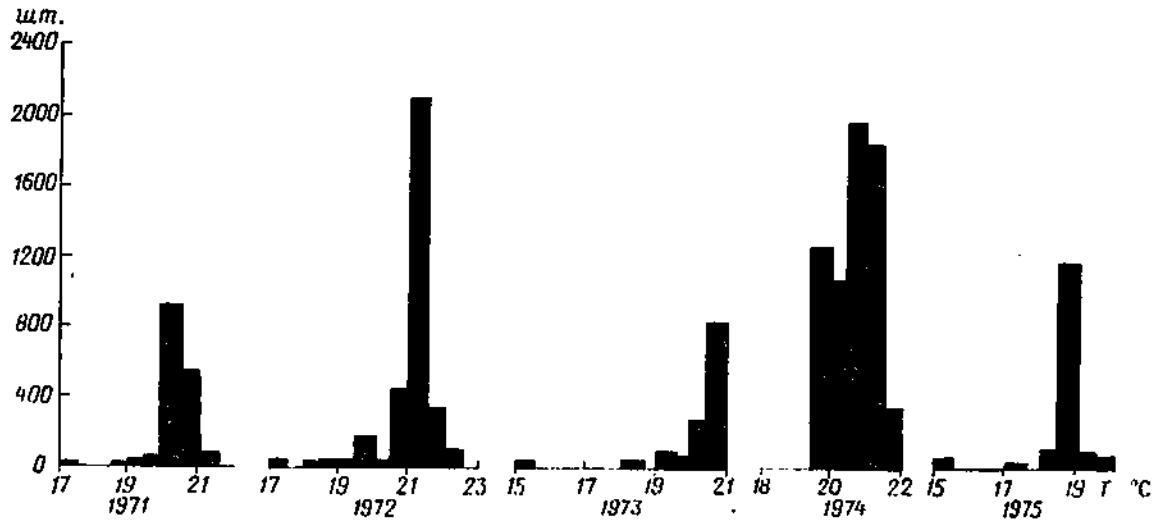

Рис. 36. Распределение сеголетков черноморской ставриды в температурном поле по данным октябрьских учетных съемок.

диапазона обитания проявляется не в ширине общего диапазона встречаемости, как указывает Ройс, а в увеличении количества особей в интервалах, соседних с оптимальным значением температуры, что ведет к специфическому «выравниванию» гистограммы вдоль горизонтальной оси.

Количественная оценка этого явления может быть получена с помощью такой статистической характеристики, как эксцесс распределения. Он определяется следующим образом:

$$E = \mu_4/\sigma^4 - 3,$$

где μ_4 — центральный момент четвертого порядка; σ — среднее квадратическое отклонение.

Значения эксцесса были вычислены для каждого года (табл. 20). Сопоставление численности ставриды урожая соответствующего года со значениями этой характеристики выявило нелинейную зависимость

$$P = 1380\,(E + 2)^{-1.8}.$$

Обозначения см. в табл. 20.

Таким образом, урожайность черноморской ставриды на перспективу в соответствии с рангами табл. 18 можно оценивать по уровню солнечной активности. Значения температурного фона моря (обратное значение рангов табл. 18) и эксцессы распределения личинок в температурном поле могут служить для уточнения пополнения вдобавок к данным учетных съемок и для прогноза запасов на последующие годы.

Поведение черноморской ставриды имеет две существенные для ее промысла стороны. Одна связана с выбором мест зимовки — преимущественно у берегов СССР или Турции, в зависимости от чего определяется доступность флота к ее запасам. Другая — собственно поведение в районах зимовки.

Здесь мы рассматриваем только вторую сторону. В соответствии с описанием В. А. Костюченко и других зимовка и промысел имеют место с декабря по март с максимумом уловов в январе и феврале в районе Крымского и Кавказского побережий. При этом в холодные зимы реакция на свет ставриды более интенсивна и уловы выше.

Таблица 21

Сводная матрица связей уловов ставриды и определяющих параметров (обозначения в тексте)

Показатели	Q			$T_{Б-III}$			A_{10-III}			A_{10-I}			A_{00-XII}			$A_{00-\Sigma VIII-XI}$		
	Н	С	В	Н	С	В	Н	С	В	Н	С	В	Н	С	В	Н	С	В
Н													28	25	33	43	17	29
С													14	62	17	29	67	00
В													57	12	50	29	17	71
Н										71	40	11						
С										14	20	44						
В										14	20	44						
Н													25	28	50	50	28	28
С													00	43	33	17	43	14
В													75	29	17	33	28	57
Н																28	00	71
С																43	71	00
В																29	29	29
Н																		
С																		
В																		
Н	43	25	29	14	28	50	17	14	43									
С	43	63	00	14	43	50	17	43	57									
В	14	12	71	71	28	00	67	43	00									

Таблица 22

Равновероятные диапазоны характеристик табл. 21

Диапазоны характеристик	< Н	С	⩾ В
S тыс. ц	20	20—60	60
Q	17,5	17,5—18,0	18,0
$T_{Б-III}$ °С	8,9	8,9—9,4	9,4
A_{10-III}	—18	—0,18...0,34	0,34
A_{10-I}	—0,4	—0,4...0,2	0,2
A_{00-XII}	15,6	15,6—20,1	20,1
$A_{00-\Sigma_{VIII-XI}}$	64,0	64,0—67,3	67,3

Уловы ставриды (в тыс. центнеров) в районе Южного берега Крыма и Кавказа за январь, февраль и март с 1963 по 1984 г. (S), представленные А. Н. Михайлюком, сопоставляются методом матриц вероятных переходов с рядом метеорологических и гидрологических параметров, отражающих особенности режима в зимние месяцы и связанных с ними характеристик за другие периоды.

В результате анализа связей отобраны следующие значимые гидрометеорологические характеристики:

1. Температура воды в порту Батуми в марте, отражающая тепловой фон зимы по району Черного моря в период промысла $T_{Б-III}$, а также тепловой фон моря предшествующего года Q.

2. Группа индексов атмосферного переноса, а именно: меридиональный перенос в марте A_{10-III} и январе A_{10-I}, среднее давление выбранного барического поля над Черным морем в предшествующем декабре A_{00-XII} и в предшествующий период с августа по ноябрь $A_{00-\Sigma_{VIII-XI}}$.

Сводная матрица связей и равновероятные диапазоны характеристик даны в табл. 21 и 22, а граф связей — на рис. 37.

Необходимость построения довольно сложного графа обусловлена потребностью прогноза уровня теплового фона зимы $T_{Б-III}$ который оказался связанным с уловом обратной зависимостью. Было установлено, что среднее давление декабря A_{00-XII} определяет меридиональный перенос в январе A_{10-I} и уровень теплового фона, а январский меридиональный перенос, видимо, является отражением типа зимней циркуляции, так как прямо связан с аналогичным мартовским переносом A_{10-III}, который также, как и тепловой фон, связан обратной зависимостью с уловами ставриды.

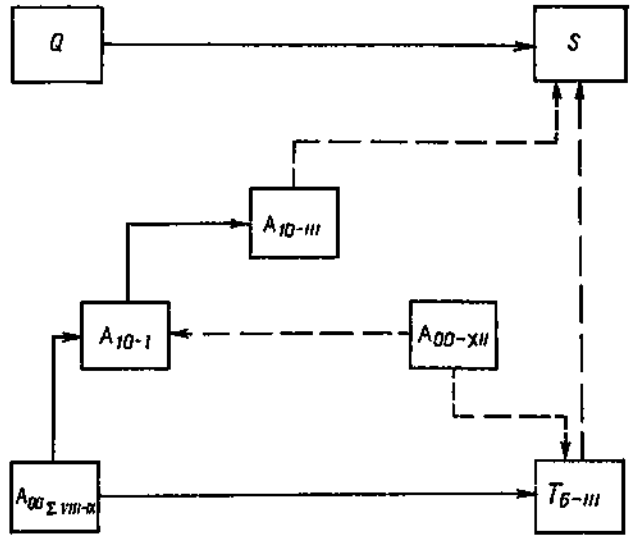

Рис. 37. Зависимость уловов ставриды и определяющих их параметров.
Обозначения см. рис. 32.

С целью увеличения заблаговременности прогноза мы обратились к некоторым интегральным показателям, в частности к суммарному давлению выбранного поля за период с августа по ноябрь $A_{00-\Sigma_{VIII-XI}}$. Уже отмечалось ранее совпадение годового хода коэффициентов A_{00} и A_{10} со сдвигом второго на месяц назад (см. рис. 30). Отсюда возникает предположение о физической значимости и прогностической информативности восходящей ветви кривой, отражающей годовой ход A_{00} на участке с августа по ноябрь. Как оказалось, сумма значений ее отражает преемственность метеорологических процессов, которая появляется в виде прямой связи с меридиональным переносом в январе A_{10-I} и последующим тепловым фоном зимой.

Наконец тепловой фон Черного моря Q за предшествующий год оказался непосредственно и прямо связанным с уловом ставриды. Скорее всего физически эта связь отражает переход повышенного уровня теплового фона в период с марта по август к пониженному в последующую зиму. Во всяком случае, она дает нам возможность ориентировочного прогноза с заблаговременностью в 4 месяца.

Следует еще раз подчеркнуть, что данный подход отражает лишь благоприятность для промысла абиотических условий и может использоваться только в комплексе с биологической частью прогноза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гидрометеорологическая часть черноморских промысловых прогнозов может быть представлена в виде сводной таблицы, где для трех основных объектов рыболовства обозначены предикторы с разделением на группу прогноза урожайности и группу прогноза поведения объекта с обозначением заблаговременности, физических основ и методики прогноза (табл. 23).

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что основной физической предпосылкой большинства прогнозов является тепловая инерция моря. Эффективным предиктором может быть показатель атмосферной циркуляции, выраженный количественно в виде коэффициента разложения барического поля по полиномам Чебышева, что дает возможность их простой интерпретации. Однако эти предикторы обеспечивают прогноз нулевой заблаговременности, отражая непосредственное воздействие барического (ветрового) поля на циркуляцию вод, на их тепловой режим, на погодные условия в определенные сезоны (облачность). Они сами нуждаются в прогнозировании, чтобы обеспечить экономически целесообразную заблаговременность промысловому прогнозу. Здесь мы снова возвра-

Таблица 23

Гидрометеорологические прогнозы для основных объектов промысла в Черном море

Объект промысла	Вид промыслового прогноза	Предикторы	Заблаговременность	Физическая основа	Методика прогноза
Анчоус (хамса)	Урожайность	1) Индексы атмосферной циркуляции (A_{01}, A_{10}) 2) Тепловой фон (Q; $T_{Б-IV}$, $T_{Б-V}$)	3 мес	Тип атмосферной циркуляции Тепловая инерция моря	Матрицы вероятных переходов
	Поведение	Тепловой фон ($T_{Б-VII; VIII}$, $T_{Б-VIII; IX}$)	2 мес	Тепловая инерция моря	То же
Шпрот	Урожайность	Тепловой фон ($T_{Б-III}$)	1 год (запас)	Тепловой фон, погодные условия в зимний период	»
	Поведение	Дата перехода температуры воды в п. Одесса через 10 °С (Д)	2 мес	Перемена знака горизонтального градиента температуры воды	Уравнения регрессии: $Д = 31{,}4 - 69{,}7_{T_{II}}$ $Д = 43{,}0 - 5{,}9\ T_{III}$
Ставрида	Урожайность	1) Солнечная активность (числа Вольфа) 2) Тепловой фон моря 3) Эксцесс распределения личинок в температурном поле (E)	1 год	1) Формальная связь 2) Интенсивность подъема глубинных вод летом 3) Концепция Ройса	1) Качественная оценка по W и Q 2) $P = 1380(E+2)^{-1.8}$
	Поведение	1) Индексы атмосферной циркуляции (A_{00}, A_{10}) 2) Тепловой фон (Q)	4 мес	1) Уровень теплового фона вод зимой 2) Преемственность и смена типов атмосферной циркуляции	Матрицы вероятных переходов

щаемся к задачам метеорологического прогнозирования, которые, как известно, пока не решены.

Выход из такого положения мы видим в решении промысловой океанологией ряда частных задач с учетом специфики объекта прогнозирования и локальных особенностей моря, в нахождении физически значимых интегральных гидрометеоролических показателей, в комплексном подходе к прогнозу.

На примере предсказания поведения ставриды, зависящего от температуры воды Черного моря в конкретную зиму, нами показана возможность прогноза этой зимней температуры с использованием особенностей атмосферной циркуляции в предшествующий летне-осенний период.

Определенной новой возможностью в деле промыслового прогнозирования является предлагаемый нами метод матриц вероятных переходов. Принцип сопоставления равновероятных диапазонов и целенаправленное «огрубление» зависимостей, вполне уместное при оценках промысловых показателей, прогностические матрицы с сетью взаимосвязей, позволили создать новую и эффективную (как было подтверждено практикой) систему гидрометеорологической части промысловых прогнозов для региона Черного моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бейм А. М., Павлов Б. К., Брусиловский П. М. и др. Приемы прогнозирования экологических систем. — Новороссийск: Наука, 1985. — 128 с.
2. Беляев В. И. Обработка и теоретический анализ океанографических наблюдений. — Киев: Наукова думка, 1973. — 296 с.
3. Беренбейм Д. Я., Брянцев В. А., Юрьев Г. С. К прогнозу сроков окончания нереста черноморского шпрота//Тезисы докладов V Всесоюзной конференции по промысловой океанологии. — Калининград, 1979. — С. 179—180.
4. Бидуля О. Г., Малышев В. И., Сороколит Л. К. Зоопланктон нижних слоев аэробной зоны Черного моря//Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по морской биологии. Севастополь, октябрь 1988 г. — Киев, 1988. — С. 107—108.
5. Биология океана. Т. 1. — М.: Наука, 1977. — 398 с.
6. Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А. и др. Изменчивость гидрофизических полей Черного моря. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 240 с.
7. Большаков В. С. Влияние стока рек на гидрологию северо-западной части Черного моря//Труды ИнБЮМ. — 1967. — Т. 20, вып. 20. — С. 35—40.
8. Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. — Л.: Гидрометеоиздат, 1968. — 351 с.
9. Брянцев В. А., Костюченко В. А. Абиотические индексы урожайности черноморской ставриды//Вопросы ихтиологии. — 1977. — Т. 17, № 6(107). — С. 1131—1134.
10. Брянцев В. А., Костюченко В. А. Связь распределения сеголетков черноморской ставриды в температурном поле с численностью поколений разных лет// Вопросы ихтиологии. — 1979. — Т. 19, № 4(117). — С. 751—752.
11. Брянцев В. А., Фащук Д. Я., Финкельштейн М. С. Антропогенные изменения океанографических характеристик Черного моря//Океанографические и рыбохозяйственные исследования Черного моря. — М., 1985. — С. 3—19.
12. Брянцев В. А., Ковальчук Л. А., Панов В. Н. и др. Формирование зимовальных скоплений черноморской хамсы//Рыбное хозяйство. — 1987. — № 4. — С. 49—52.
13. Брянцев В. А., Фащук Д. Я., Айзатулин Г. А. и др. Динамика верхней границы сероводородной зоны Черного моря: анализ натурных наблюдений и результатов моделирования//Океанология. — 1988. — Т. 28, вып. 2. — С. 236—292.
14. Быковский В. И. Движение водных потоков и фитопланктон//Гидробиологический журнал. — 1978. — Т. 14, № 2, — 120 с.
15. Виноградов А. К. О биологической структуре ихтионейстона Черного моря//Гидробиологический журнал. — 1972. — № 5. — С. 64—69.
16. Виноградов М. Е., Флинт М. В., Шушкина М. Е. Исследование вертикального распределения мезопланкто-

на с использованием подводного обитаемого аппарата «Аргус»//Современное состояние экосистемы Черного моря.— М., 1987.— С. 172—186.
17. Виноградов М. Е., Флинт М. В., Николаева Г. Г. Вертикальное распределение мезопланктона в открытых районах Черного моря в весенний сезон//Современное состояние экосистемы Черного моря.— М., 1987.— С. 144—162.
18. Виноградов М. Е., Шушкина Э. А. Особенности вертикального распределения черноморского зоопланктона//Экосистемы пелагиали Черного моря.— М., 1980.— С. 179—191.
19. Гат Д. Р., Штейнхорн И. В мире науки.— 1983.— № 12.— С. 48—57.
20. Гирс А. А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы.— Л.: Гидрометеоиздат, 1971.— 280 с.
21. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей.— М.-Л.: Госиздат техн.-теорет. лит-ры, 1950.— 388 с.
22. Гололобов Я. К. Оценка состояния химической базы биологической продуктивности Черного моря и некоторые особенности ее формирования//Океанографические исследования Черного моря.— М., 1964.— С. 33—47.
23. Горомосова С. А. Сезонное развитие и распределение зоопланктона в северо-западной части Черного моря//Труды АзЧерНИРО.— 1964.— Вып. 23.— С. 69—80.
24. Данилевский Н. Н. Миграции черноморской хамсы и факторы их обусловливающие//Сб. научн. трудов АзЧерНИРО.— 1958.— Вып. 17.— С. 51—74.
25. Данилевский Н. Н. Важнейшие факторы, определяющие сроки и районы образования промысловых скоплений черноморской хамсы//Сб. научн. трудов АзЧерНИРО.— 1964.— Вып. 22.— С. 115—124.
26. Данилевский Н. Н. Пелагический трал для количественного учета молоди//Рыбное хозяйство.— 1968.— № 10.— С. 25—26.
27. Данилевский Н. Н., Майорова А. А. Анчоус// Сырьевые ресурсы Черного моря.— М., 1979.— С. 25—73.
28. Дехник Т. В., Павловская Р. М. Распределение икры и личинок некоторых рыб Черного моря//Труды АзЧерНИРО.— 1950.— Вып. 4.— С. 151—176.
29. Дехник Т. В. Ихтиопланктон Черного моря.— Киев: Наукова думка, 1973.— 235 с.
30. Дружинин И. П., Сазонов Б. И., Ягодинский В. Н. Космос — Земля. Прогнозы.— М.: Мысль, 1974.— 288 с.
31. Елизаров А. А., Кочиков В. Н., Ржонсницкий В. Б. Океанологические основы рыболовства.— Л.: Изд-во ЛГУ, 1983.— 222 с.
32. Зайцев Ю. П., Гаркавая Г. П., Нестерова Д. А. и др. Современное состояние экосистемы северо-западной части Черного моря//Современное состояние экосистемы Черного моря.— М., 1987.— С. 216—230.
33. Зуссер С. Г. Суточные вертикальные миграции рыб.— М.: Пищевая промышленность, 1972.— 224 с.
33а. Иванов А. И. Фитопланктон//Биология северо-западной части Черного моря.— Киев, 1967.— С. 54—75.
34. Ижевский Т. К. Океанографические основы формирования промысловой продуктивности морей.— М.: Пищепромиздат, 1978.— 215 с.
35. Казакевич Д. И. Основы теории случайных функций и ее применение в гидрометеорологии.— Л.: Гидрометеоиздат, 1977.— 287 с.
36. Кендэл М. Ранговые корреляции.— М.: Статистика, 1975.— 214 с.
37. Коваль Л. Г. Зоопланктон предустьевых акваторий северо-западной части Черного моря в 1953—1957 гг.// Научн. зап. Одесской биологич. станции АН УССР.— 1959.— Вып. 1.— С. 51—72.
38. Коваль Л. Г. Зоо- и некрозоопланктон Черного моря.— Киев: Наукова думка, 1984.— 127 с.
39. Книпович Н. М. Гидрологические исследования в Черном море//Труды Азово-Черноморск. научн.-исслед. экспедиции.— 1932.— Вып. 10.— 272 с.
40. Кондратьева Т. М. Количественное развитие и распределение фитопланктона//Основы биологической продуктивности Черного моря.— Киев, 1979.— С. 70—79.
41. Кондратьева Т. М. Суточные изменения фитопланктона в Черном море//Основы биологической продуктивности Черного моря.— Киев, 1979.— С. 79—85.
42. Костюченко В. А., Сафьянова Т. Е., Ревина Н. И. Ставрида//Сырьевые ресурсы Черного моря.— М., 1979.— С. 92—130.
43. Косарев А. Н., Владимирцев Ю. А. Основные гидрологические особенности южных морей СССР и их связь с биопродуктивностью//Промысловая океанология.— 1977.— Вып. 9.
44. Кудрявая К. И., Серяков Е. И., Скриптунова Л. И. Морские гидрологические прогнозы.— Л.: Гидрометеоиздат, 1974.— 310 с.
45. Кусморская А. П. Сезонные и годовые изменения зоопланктона Черного моря//Труды Всесоюзн. гидробиол. об-ва.— 1955.— Т. 6.— С. 158—192.
46. Левасту Т., Хела И. Промысловая океанография.— Л.: Гидрометеоиздат, 1974.— 295 с.
47. Мальцева А. В., Тарасов М. Н., Смирнов М. П. Сток органического вещества с территории СССР//Гидрохимические материалы.— 1987.— С. 24.
48. Малятский С. М. К вопросу о миграциях некоторых рыб Черного моря//Труды научной рыбохозяйственной и биологической станции Грузии.— 1934.— Т. 1, вып. 1.— С. 211—237.
49. Малятский С. М. Материалы по экологии населения пелагиали Черного моря//Труды Новорос. биологич. станции.— 1940.— Т. 2, вып. 3.— С. 237—258.
50. Маштакова Г. П. Сезонная динамика фитопланктона восточной части Черного моря//Труды АзЧерНИРО.— 1968.— Вып. 27.— С. 52—59.
51. Маштакова Г. П., Роухияйнен М. И. Сезонная динамика фитопланктона//Основы биологической продуктивности Черного моря.— Киев, 1979.— С. 85—88.
52. Морозова-Водяницкая Н. В. Некоторые результаты количественных исследований фитопланктона Черного моря//Труды Новорос. биологич. станции.— 1940.— Т. 11, вып. 3.— С. 273—313.
53. Морозова-Водяницкая Н. В. Численность и биомасса фитопланктона в Черном море//ДАН СССР.— 1950.— Т. 73, № 4.— С. 821—824.
54. Морозова-Водяницкая Н. В. Фитопланктон Черного моря и его количественное развитие//Труды СБС АН СССР.— 1957.— Вып. 9.— С. 3—13.
54а. Нестерова Д. А. Развитие перидинеи *Exuviella cordata* и явление «красного прилива» в северо-западной части Черного моря//Биология моря.— 1970.— № 5.— С. 74—89.
54б. Нестерова Д. А. Размерная структура фитопланктона западной части Черного моря в летний период//Океанология.— 1986.— Т. 26, вып. 3.— С. 474—479.
55. Никитин В. Н. Вертикальное распределение планктона в Черном море//Труды Особой зоологич. лаборатории и СБС АН СССР.— 1926.— Сер. 2, № 5/10.— С. 93—140.
56. Никитин В. Н. Вертикальное распределение планктона в Черном море. 1. *Copepoda* и *cladocera*//Труды СБС АН СССР.— 1929.— Вып. 9.— С. 25—60.
58. Никитин В. Н. Распределение биомассы планктона в Черном море//ДАН СССР.— 1945.— Т. 47, № 7.— С. 529—532.
59. Никитин В. Н. Основные закономерности распределения жизни в Черном море//Труды ИО АН СССР.— 1949.— Т. 3.— С. 173—190.
60. Новицкий В. Н. Влияние динамики на характер распределения океанологических показателей биологической продуктивности и морских организмов в северо-западной части Черного моря//Труды АзЧерНИРО.— 1968.— Вып. 27.— С. 3—17.
61. Основы биологической продуктивности Черного моря/ Под ред. В. Н. Грезе.— Киев: Наукова думка, 1979.— 391 с.
62. Оре О. Теория графов.— М.: Наука, 1968.— 352 с.
63. Павловская Р. М. Размножение шпрота, ставриды, барабули в Черном море//Труды ВНИРО.— 1954.— Т. 28.— С. 126—135.
64. Павловская Р. М. Общие закономерности формирования численности поколений основных промысловых рыб//Сырьевые ресурсы Черного моря.— М., 1979.— С. 5—23.
65. Петипа Т. С., Сажина Л. И., Делало Е. П. Вертикальное распределение зоопланктона в Черном море в связи с гидрологическими условиями//ДАН СССР.— 1960.— Т. 133.— С. 964—967.
66. Петипа Т. С., Сажина Л. И., Делало Е. П. Вертикальное распределение зоопланктона в Черном море// Труды СБС АН СССР.— 1963.— Т. 16.— С. 136—137.
67. Петипа Т. С., Сажина Л. И., Делало Е. П. Кормовая база тепловодных и холодноводных рыб в Черном море//Исследования планктона Черного и Азовского морей.— Киев, 1965.— С. 102—111.

68. Пицык Г. К. Систематический состав фитопланктона// Основы биологической продуктивности Черного моря. — Киев, 1979. — С. 63—69.
69. Прошкина-Лавренко А. И. Диатомовые водоросли планктона Черного моря. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1955. — 190 с.
70. Промысловая океанография/Под ред. Д. Е. Гершановича. — М.: Агропромиздат, 1986. — 336 с.
71. Пузанов И. И. Анчоус//Уч. зап. Горьковского гос. ун-та. — 1936. — 65 с.
72. Раймонт Дж. Планктон и продуктивность в океане. — М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. — 584 с.
73. Расс Т. С. Рыбные ресурсы европейских морей СССР и возможности их пополнения акклиматизацией. — М.: Наука, 1965. — С. 35—57.
74. Расс Т. С. Современные представления о составе ихтиофауны Черного моря и его изменениях//Вопросы ихтиологии. — 1987. — Т. 27, вып. 2. — С. 179—187.
75. Ройс В. Ф. Внедрение в рыбохозяйственную науку. — М.: Пищевая промышленность, 1975. — 272 с.
76. Рубинштейн И. Г., Троценко П. Г. Восстановление филофорного поля Зернова//Рыбное хозяйство. — 1988. — № 12. — С. 34—35.
77. Световидов А. Н. Рыбы Черного моря. — М.-Л.: Наука, 1964. — 551 с.
78. Самышев Э. З., Рубинштейн И. Г. Изменения в структуре планктона и бентоса Черного моря под воздействием антропогенных факторов//III Всесоюзная конференция по морской биологии, Севастополь, октябрь 1988 г. Тезисы докладов. Т. 2. — Киев, 1988. — С. 137—139.
79. Скопинцев Б. А. Формирование современного химического состава вод Черного моря. — Л.: Гидрометеоиздат, 1975. — 336 с.
79а. Сорокин Ю. И. «Красный прилив» в зоне перуанского апвеллинга//ДАН СССР. — 1979. — Т. 249, № 1. — С. 253—255.
79б. Туманцева Н. И. «Красный прилив» в Черном море// Океанология. — 1985. — Т. 25, вып. 1. — С. 130—133.
80. Солянкин Е. В., Осадчий А. С. Теплообмен в Черном море//Океанология. — 1976. — Т. 2, вып. 4. — С. 602—613.
81. Сорокин Ю. И. Черное море. — М.: Наука, 1982. — 216 с.
82. Тараненко Н. Ф. Поведение хамсы на местах ее зимовки в Черном море//Сб. научн. трудов АзЧерНИРО.— 1958. — Вып. 17. — С. 111—140.
83. Тараненко Н. Ф. Уровень жировых запасов в теле азовской хамсы как показатель воспроизводительных свойств стада и сроков миграции//Сб. научн. трудов АзЧерНИРО. — 1964. — Вып. 22. — С. 137—147.
84. Тарасов М. Н., Смирнов М. П., Крючков И. А., Лаки Т. И. Речной сток биогенных веществ с территории СССР и его изменения во времени. — Л.: Гидрометеоиздат, 1988. — 285 с.
85. Ткачева К. М. Введение//Сырьевые ресурсы Черного моря. — М., 1979. — С. 3—5.
86. Фащук Д. Я. Кислородный режим придонного слоя вод северо-западной части Черного моря в летний период//Гидробиологический журнал. — 1985. — № 5. — С. 80—84.
87. Фащук Д. Я., Айзатуллин Г. А. О возможной трансформации анаэробной зоны Черного моря//Океанология. — 1986. — Т. 26, № 2. — С. 233—242.
88. Фащук Д. Я., Бряпцев В. А., Троценко Т. Г. Особенности океанографического режима Черного моря в условиях хозяйственной деятельности//Антропогенное воздействие на прибрежно-морские экосистемы.— М., 1986. — С. 34—43.
89. Фащук Д. Я. Образование промысловых скоплений черноморского шпрота под влиянием условий среды// Рыбное хозяйство. — 1987. — № 6. — С. 37—40.
90. Чижевский А. Л. Земное эхо солнечных бурь. — М.: Мысль, 1973. — 349 с.
91. Шер В. В. Связь распределения черноморского шпрота с абиотическими факторами//Рыбное хозяйство. — 1979.— № 11. — 25 с.
92. Шишкина Л. А. Гидрохимия. — Л.: Гидрометеоиздат, 1974. — 288 с.
93. Шляхов В. А. Состояние запасов и перспективы промысла мерланга в Черном море: Автореф. дис. канд. биол. наук. — М.: ВНИРО, 1986. — 24 с.
94. Шульман Н. Е. Физиолого-биохимические особенности годовых циклов рыб. — М.: Пищевая промышленность, 1972. — 367 с.
95. Химия океана. Т. 1. — М.: Наука, 1979. — 519 с.
96. Экологическая биогеография контактных зон моря: Сб. статей. — Киев: Наукова думка, 1968. — 160 с.
97. Эшби У. Р. Введение в кибернетику. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1959. — 432 с.
98. Юрьев Г. С. Распределение численности молоди черноморского шпрота//Материлы Всесоюзного смотра-симпозиума по изучению Черного и Средиземного морей, использованию и охране их ресурсов. Ч. 3. — Киев, 1973. — С. 190—191.
99. Юрьев Г. С. Некоторые особенности распределения черноморского шпрота//Рыбное хозяйство. — 1975. — № 4. — С. 16—18.
100. Юрьев Г. С. Черноморский шпрот//Сырьевые ресурсы Черного моря. — М., 1979. — С. 73—92.
101. Jopaunesson K. A., Losse G. F. Methodology of acoustic estimations of fish aboundand in sonu UNDP/FAO resourcoe survey projects//Rapp. Roc. Verb. Reun'Cons. Perm Jut. Explor. Mer. — 1977. — N 170. — P. 296—318.

Монографический справочник

Проект „Моря СССР“

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР

Том IV

Черное море

Выпуск 2

Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности

Редактор Т. А. Иванова. Художественный редактор Б. А. Бураков. Технический редактор Г. В. Ивкова. Корректор Л. Б. Емельянова. Н/К. Сдано в набор 26.06.91. Подписано в печать 16.01.92. Формат 60×90¹/₈. Бумага книжная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Печ. л. 27,5. Кр.-отт. 27,5. Уч.-изд. л. 36,01. Тираж 500 экз. Индекс ОЛ-16. Заказ № 902. Гидрометеоиздат. 199226, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38.

Набрано в типографии № 2 головного предприятия ордена Трудового Красного Знамени объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой. 198052, г. Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29.

Отпечатано в типографии № 6 ордена Трудового Красного Знамени объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой. 190000, г. Санкт-Петербург, Прачечный переулок, 6.