

Государственный комитет Российской Федерации по высшему образованию

**РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ**

В. П. КОРОВИН

**ЗАРУБЕЖНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
В ОКЕАНОЛОГИИ**

*Рекомендовано Государственным комитетом Российской Федерации
по высшему образованию в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Гидрометеорология».
Специальность «Океанология»*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

1994

К 68

Коровин В. П. Зарубежные технические средства в океанологии. — Санкт-Петербург, 1994. — 196 с.

Рецензенты: канд. геогр. наук В. В. Ионов (кафедра океанологии, Санкт-Петербургский государственный университет); канд. техн. наук В. М. Тимец (Государственный океанографический институт).

Учебное пособие предназначено для студентов-иностранцев океанологической специальности и для всех студентов-океанологов гидрометеорологических вузов. Кроме того, может быть использовано научно-техническими работниками, занимающимися исследованием океана, и разработчиками океанографической аппаратуры.

Приведено описание иностранных технических средств для проведения океанографических работ и наиболее широко используемых приборов и автоматических информационно-измерительных систем. Рассмотрены общие принципы и теоретические основы методов создания океанографической аппаратуры.

Табл. 19. Илл. 40.

The text-book «Technical Aids of Foreign Oceanographic Services» is aimed for foreign students in oceanology and for all students of hydrometeorological institutes. Besides it may be used by specialists dealing with ocean investigation and oceanographic development engineers.

In this text-book the description of foreign oceanographical technical aids as well as the mostly distributed instruments and automatic information measuring devices is presented. Some general principles and theoretical foundations of oceanographic instruments making methods are considered.

©Российский государственный
гидрометеорологический институт
(РГГМИ), 1994.

ISBN 5—86813—063—5

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Введение	4

Раздел I. Технические средства для проведения океанографических работ

1 Глава 1. Особенности сбора информации в процессе проведения океанографических работ	6
Глава 2. Научно-исследовательские суда	7
Глава 3. Автономные буйковые станции	10
Глава 4. Буй-лаборатории	14
Глава 5. Платформы для океанологических исследований	16
Глава 6. Подводные аппараты для океанологических исследований	17
6.1. Обитаемые подводные аппараты	18
6.2. Необитаемые подводные аппараты	20
Глава 7. Неконтактные технические средства проведения океанологических исследований	22

Раздел II. Техника контактных методов проведения океанографических работ

Глава 1. Наблюдения за колебаниями уровня моря	24
1.1. Методы измерения колебаний уровня моря	—
1.2. Приборы и устройства для измерения колебаний уровня моря	27
Глава 2. Приборы и методы для измерения температуры воды	37
2.1. Методы измерения температуры воды	—
2.2. Измерители температуры морской воды	49
2 Глава 3. Приборы и методы наблюдений за течениями	60
3.1. Методы наблюдений за течениями	—
3.2. Измерители характеристик течений	77
Глава 4. Приборы и методы наблюдений за волнением	90
4.1. Методы измерения характеристик волнения	—
4.2. Инструментальные методы измерения элементов волн	91
Глава 5. Автоматические информационно-измерительные системы различных стран и фирм для океанологических исследований	107
5.1. Развитие методов измерений океанологических характеристик	—
5.2. Зондирующие гидрологические комплексы	112
5.3. Буксируемые гидрологические комплексы	133

Раздел III. Техника неконтактных методов проведения океанологических исследований

Глава 1. Задачи неконтактных методов исследования океана	142
Глава 2. Средства дистанционного зондирования	153
Глава 3. Анализ основных методов и результатов измерения с ИСЗ	166
Глава 4. Методика проведения подспутниковых экспериментов	180
Глава 5. Современные программы спутниковых исследований	189

CONTENTS

Preface	3
Introduction	4

Part I. Technical aids for oceanographical works

1. Peculiarities of the collection of oceanographic information in cruises	6
2. Research vessels	7
3. Self-contained buoy stations	10
4. Buoy-laboratories	14
5. Oceanographic platforms	16
6. Underwater oceanographic means	17
6.1. Inhabited oceanographic apparatus	18
6.2. Uninhabited oceanographic apparatus	20
7. Noncontact technical aids for oceanographical works	22

Part II. Technique of contact methods of oceanographic measurements

1. Observations of sea level oscillations	24
1.1. Methods of measurements of sea level oscillations	—
1.2. Instruments and devices for measurements of sea level oscillations	27
2. Instruments and methods for measurements of water temperature	37
2.1. Methods of measurements of water temperature	—
2.2. Water temperature meters	49
3. Instruments and methods of currents observations	60
3.1. Methods of currents observations	—
3.2. Current characteristics meters	77
4. Instruments and methods of sea waves observations	90
4.1. Methods of measurements of sea waves parameters	—
4.2. Methods of instrumental measurements of waves parameters	91
5. Automatic information measuring oceanographic systems of various countries and companies	107
5.1. Development of measuring methods of oceanographic characteristics	—
5.2. Sounding oceanographic systems	112
5.3. Towing oceanographic systems	133

Part III. Technique of noncontact methods of oceanographic measurements

1. Problems of noncontact methods of the ocean research	142
2. Means of remote sounding	158
3. Analysis of main satellite measurements and corresponding results	166
4. Methods of undersatellite experiments	180
5. Modern programmes of satellite investigations	189

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Зарубежные технические средства в океанологии» для студентов-иностранцев гидрометеорологических вузов. В учебном пособии изложены современные методы океанографических исследований; приведено описание технических средств для проведения океанографических работ, основные требования к их эксплуатации и возможности их выбора для проведения океанографических исследований; а также описание наиболее широко используемых приборов и автоматических информационно-измерительных систем. Конечно же, невозможно привести здесь все великое многообразие океанологической аппаратуры, существующей в настоящее время во всем мире. Поэтому в работе сделан упор на рассмотрение общих принципов и теоретических основ методов, на базе которых создается подобная аппаратура.

В процессе работы над учебным пособием автор использовал книги В. П. Коровина и Е. И. Чверткина «Морская гидрометрия», А. М. Трохана «Гидроаэрофизические измерения», а также наставления и руководства по проведению наблюдений в океанах и морях, справочники по океанографическим и гидрологическим приборам, рекламные проспекты иностранных фирм и труды различных мореведческих институтов и учреждений, как отечественных, так и зарубежных.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших задач, стоящих перед человечеством, является изучение и освоение Мирового океана. Мировой океан при средней глубине около 4000 м занимает 70,8 % поверхности земного шара. Учитывая его колоссальные энергетические, пищевые и минеральные ресурсы, человечество должно направить свои усилия на их освоение. Несмотря на то, что человек использует ресурсы океана с древнейших времен, исследования в этой области только в настоящее время получают поистине глобальный характер. Проблема исследования и освоения океана обуславливает быстрые темпы роста современной океанологии — совокупности научных дисциплин, изучающих различные аспекты природы Мирового океана: физические, химические, биологические, геологические.

Наука, изучающая физические и химические свойства водной среды, закономерности физических и химических процессов и явлений в Мировом океане в их взаимодействии с атмосферой, суши и дном; называется *океанографией*. *Биология моря* изучает закономерности развития биологических процессов и географического распределения морских растительных и животных организмов в их взаимодействии с окружающей средой. *Геология моря* изучает рельеф, морфологию и геологическую структуру дна Мирового океана и закономерности распределения минеральных ресурсов на нем. Все эти науки обладают своими методами и средствами, используемыми для конкретных объектов исследования.

Исходя из этого, важным моментом исследования Мирового океана является решение следующих задач: создание методики организации и проведения экспедиционных и стационарных океанологических исследований; создание методов и приборов для проведения океанологических наблюдений; разработка методики использования современных средств для производства океанологических наблюдений; разработка методик обработки результатов наблюдений.

Океанологические измерения, ведущиеся в динамически неустойчивой стратифицированной среде, физико-химические параметры которой изменяются как в пространстве, так и во времени, выдвигают жесткие требования к организации, методике и технике производства наблюдений. Пренебрежение ими может привести к оши-

точной интерпретации результатов измерений. Исходя из существующих представлений об особенностях изменчивости океанологических условий решается обширный круг задач, касающихся определения продолжительности и пространственно-временной дискретности измерений, их репрезентативности, выбора аппаратуры с оптимальной постоянной времени и чувствительности, определения скорости перемещения измерительной аппаратуры в исследуемой среде.

Материалы океанологических наблюдений используются в самых различных областях человеческой деятельности: для обеспечения безопасности мореплавания; организации и проведения рыболовства и рыбоводства; проектирования и строительства различных прибрежных сооружений; добычи разнообразного сырья из вод океана и полезных ископаемых с его дна. Они представляются обычно в виде документов, характеризующих текущие режимные характеристики вод морей и океанов; морских гидрологических краткосрочных и долгосрочных прогнозов; а также оповещений и предупреждений об опасных явлениях; гидрологических расчетов и гидрометеорологических сведений, публикуемых в виде ежемесячников, ежегодников, каталогов, таблиц, атласов, обзоров и т. д.

Раздел I

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

Глава 1. Особенности сбора информации в процессе проведения океанографических работ

Развитие современной океанологии связано с решением следующего круга задач:

- накопление общих научных знаний о Мировом океане, воссоздание истории его возникновения и происшедших изменений, исследование всех процессов, происходящих в Мировом океане;
- разработка надежных алгоритмов гидрологических процессов и процессов взаимодействия океана и атмосферы;
- проведение перспективной и текущей разведки пищевых и сырьевых ресурсов Мирового океана и разработка научных рекомендаций по их промышленному использованию;
- подготовка рекомендаций по охране природных богатств Мирового океана и защите его от загрязнения и решение экологических проблем;
- обеспечение безопасности мореплавания;
- подготовка научных и технических рекомендаций для проектирования новых типов надводных и подводных судов и различных морских инженерных сооружений, а также сооружений, защищающих водные акватории от загрязнений, что особенно важно в связи с катастрофическим загрязнением многих водоемов на Земле.

Измерения океанологических характеристик производятся, как правило, в динамически неустойчивой стратифицированной среде, все параметры которой изменяются как во времени, так и в пространстве. Все это выдвигает жесткие требования к организации, методике, технике измерений и к выбору технических средств. Кроме того, важнейшим фактором становятся задачи определения продолжительности и пространственно-временной дискретности измерений, их репрезентативности, выбора аппаратуры с оптимальной информационностью и чувствительностью, определения скорости перемещения первичных измерительных преобразователей (ПИП) и т. д. Для решения этих задач необходимо располагать определенными сведениями о характерных пространственно-временных масштабах океанологических явлений, вертикальных и горизонтальных градиентах физико-химических параметров среды.

Полученные к настоящему времени результаты океанологических исследований позволяют судить о значительной изменчивости процессов в Мировом океане, масштабы которых могут составлять от долей секунд до десятков и сотен лет во времени и от сантиме-

тров до размеров океанов в пространстве. Поэтому при постановке океанографических наблюдений всегда необходимо четко представлять, какие масштабы изменчивости будут исследоваться для решения поставленной задачи.

Учитывая временные и пространственные масштабы изменчивости процессов в океане, следует определить пространственную и временную дискретность наблюдений за процессами, выбрать соответствующий вид океанографических работ и технические средства исследования. При изучении той или иной полосы спектра изменчивости океанологических параметров и выборе необходимой точности определения статистических характеристик длину реализаций, согласно теории случайных процессов, можно приблизительно оценить, с помощью выражения

$$T_r \approx 1/BE^2,$$

где T_r — длина реализации, с; B — ширина исследуемого спектра, Гц; E — заданная точность среднего значения исследуемой характеристики. Кроме того, знание пространственно-временной изменчивости процессов крайне необходимо при выборе общей стратегии исследований, позволит объективно подойти к выбору измерительных средств для проведения океанографических работ, установить критерии экономической эффективности решения поставленных исследовательских задач.

Стремительное развитие техники в последнее время позволяет использовать в океанологической практике принципиально новые средства, пригодные для выполнения океанографических работ. К таким техническим средствам кроме традиционных научно-исследовательских судов (НИС) и автономных буйковых станций (АБС) относятся авиация, искусственные спутники Земли (ИСЗ), глубоководные обитаемые и необитаемые аппараты, океанографические буи и платформы, океанографические измерительные системы, устанавливаемые на дне океана и др. Рассмотрим основные технические средства, используемые в океанологии.



Глава 2. Научно-исследовательские суда

Основным средством исследования океана в настоящее время и обозримом будущем останутся НИС. Правда, уже сегодня для решения многих задач они оказываются помехой в получении качественной информации как из-за качки, так и из-за их шумности. Все НИС в основном предназначены для сбора, обработки, хранения и передачи информации о Мировом океане, атмосфере над ним, строении его дна и его биологических ресурсах. Для этой цели необходимо организовывать дорогостоящие морские экспедиции, где главные затраты материальных средств приходится

на экспериментальные исследования, т. е. на проведение научных наблюдений. А важнейшим показателем эффективности использования НИС является объем информации, который может быть собран за время экспедиционного рейса.

В связи со спецификой океанографических работ НИС должны иметь высокие мореходные качества, т. е. способность осуществлять безопасное и эффективное плавание в любой сезон года, в любых широтах, при самых сложных гидрометеорологических и навигационных условиях, а также обеспечивать работу с аппаратурой, опускаемой с борта судна, стоящего на якоре, лежащего в дрейфе и на ходу, в том числе и при плавании вблизи подводных препятствий и в узкостях. Они должны быть оборудованы подруливающей системой, позволяющей судну находится практически в неизменном положении даже при сильных ветре и течении. Это существенно улучшит условия проводимых исследований. В состав оборудования судов должны входить многолучевые эхолоты, гидролокаторы бокового обзора ближнего и дальнего действия, развитые вычислительные комплексы, объединяющие достаточно много мощных мини- и микро-ЭВМ для гибкого разделения общих ресурсов памяти и быстродействия, что позволит решать тактические и стратегические задачи.

Все суда должны иметь определенное число лабораторий, удобно расположенных на соответствующих палубах и снабженных необходимым энергопитанием. В них может быть размещена необходимая аппаратура, вестись первичная обработка результатов наблюдений, подготовка и ремонт приборов и оборудования. НИС должны быть комплексно снабжены исследовательскими измерительными средствами. Кроме того, суда должны быть оборудованы устройствами и приспособлениями, обеспечивающими постановку на якорь на значительной глубине, постановку АБС, а также иметь лебедки и вспомогательные механизмы для спуска за борт и подъема приборов, буксировки океанографической аппаратуры. При проектировании судна количество, типы и характеристики лебедок, кран-балок, откидных площадок и другого палубного оборудования должны быть рассчитаны с учетом конкретного назначения НИС и принятой методики работы с научным оборудованием. На судах должна быть установлена совершенная радионавигационная аппаратура, в том числе и с использованием ИСЗ, так как от точности определения местоположения судна в море в большой степени зависит достоверность и ценность получаемой информации.

Опыт эксплуатации НИС показывает необходимость наличия достаточно просторных открытых частей верхней палубы, необходимых для размещения нужного числа лебедок и подготовительной работы с кабельными и тросовыми системами сравнительно большой протяжности. В океанологической практике к настоящему времени уже сложилось несколько типов архитектурных осо-

бенностей надстроек НИС, которые можно охарактеризовать следующим образом:

— суда с баком и кормовой удлиненной надстройкой и суда с носовой и средней надстройками. Суда этих типов имеют относительно небольшую площадь открытой части палубы, поэтому часть аппаратуры приходится опускать в воду с палуб надстроек, что увеличивает опасность удара приборов о борт судна при качке;

— суда со средней надстройкой, где для проведения работ используется носовая и кормовая части верхней палубы. Правда, в этом случае при сильном волнении одна из открытых частей верхней палубы, а при положении судна лагом к волне и обе ее части, может заливаться водой, что ограничивает возможность работы судов в открытом море;

— суда с удлиненным баком, переходящим в среднюю надстройку, лишены вышеназванных недостатков. Кроме того, в последнее время появились суда с надстройкой, сдвинутой к одному, обычно левому, борту. Подобная архитектура надстройки позволяет использовать для работы кормовую часть палубы и проход вдоль средней надстройки, что дает определенные преимущества;

— катамараны до сих пор не нашли широкого использования в океанологической практике, за исключением, возможно, малых судов длиной менее 25 м. По-видимому, даже наличие таких достоинств судов подобного типа, как большая площадь рабочей части верхней палубы по сравнению с однокорпусным судном такого же водоизмещения, меньшая необходимая мощность энергетических установок, хорошая маневренность и устойчивость, не превышают их недостатков: большой строительной стоимости, необходимости дублирования ряда механизмов, воздействия волновых ударов в районе носовой части соединительного моста.

Следует отметить, что НИС отличаются высокой стоимостью конструирования, строительства и эксплуатации, которая в 1,5—2 раза превышает стоимость транспортных и рыболовных судов подобных размеров. Вполне вероятно появление в будущем парусных НИС, оборудованных современными автоматизированными системами управления парусами, что значительно снизит шумность судов, удешевит их эксплуатацию, даст возможность с большей простотой решать многие задачи океанологии.

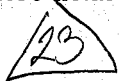
Можно отметить несколько типов судов, спущенных на воду в последнее время. В Германии в 1987 г. построен НИС «Atair», принадлежащий Гидрологическому институту в Гамбурге. Судно, длиной 51,5 м, шириной 11,4 м и с радиусом действия 4500 миль, предназначено для проведения широкого объема океанографических работ и поиска затонувших судов.

Во Франции в 1988 г. спущены на воду НИС «Laperouse» и «Borda», а в 1990 г. еще два судна этого же типа «Laplace» и «Arego». Суда этого типа имеют следующие характеристики: длина корпуса 59 м, ширина 10,9 м, осадка 3,4 м, водоизмещение 970 т, скорость хода 15 узлов, радиус автономного плавания 6000

миль. Экипаж 45 человек. В состав комплекса океанологической аппаратуры входят: батитермографы, СТД-зонды, измерители течений, преобразователи характеристик морского волнения, акустические профилографы морского дна, геофизические глубоководные зонды, электронные системы сбора и обработки экспериментальных данных.

В США в 1987—1988 гг. построены два НИС длиной 31,5 м, шириной 7,74 м, осадкой 2,8 м, водоизмещением 245 т, с максимальной скоростью 12,5 узлов, предназначенные для проведения батиметрической съемки и сейсмического зондирования донных осадков в портах и прибрежной зоне на глубине до 2000 м. С судов можно производить и океанографические исследования с помощью измерителей течения, дрейфтеров, донных самописцев уровня моря и СТД-зондов. Предусмотрено управление подводными аппаратами и телевизионными установками. Они обладают низкими уровнями вибрации и шума, хорошей маневренностью на малых скоростях и оборудованы различными типами лебедок. Автономность плавания судна — 8 суток, экипаж — 11 человек команды и 6 научных сотрудников. На НИС имеется автоматизированная система сбора данных на базе ЭВМ HP310 с внешней памятью 40 Мбайт.

В 1984 г. спущен на воду флагман научного флота Великобритании НИС «Чарльз Дарвин». Судно длиной 70 м имеет экипаж 21 человек и 18 научных сотрудников. НИС оборудовано спутниковой системой навигации, обеспечивающей определение места с точностью до 30 м, имеет телевизионное и гидроакустическое (эхолоты и гидролокаторы) оснащение, разнообразную вычислительную технику, точные электромагнитные лаги и гироскопические компасы. Исследовательские лаборатории оснащены современными океанографическими приборами — акустическим измерителем профиля течения, термосолемерами, СТД-зондами, измерителями гравитационного и магнитного поля Земли и др.



Глава 3. Автономные буйковые станции

Для решения большого круга задач океанологии требуется проведение длительных синхронных измерений основных характеристик состояния океана на больших акваториях и на различных горизонтах. Использование для массовых гидрометеорологических наблюдений буйковых автономных измерительных комплексов позволяет повысить эффективность океанографических работ, снизить их стоимость, вести наблюдения при любых условиях погоды и практически в любых районах Мирового океана, а также избавиться от погрешностей, вызываемых рысканием судна и его качкой.

В середине 50-х годов были осуществлены первые экспериментальные постановки АБС в открытом океане, и после этого они прочно вошли в состав технических средств, используемых для

различных наблюдений в морях и океанах. Так, например, при исследовании крупномасштабных синоптических вихрей в Атлантическом океане по международной программе ПОЛИМОДЕ в 1977—1978 гг. было выставлено более 45 АБС, а по программе First GARP Global Experiment для изучения поверхностных течений было задействовано 368 дрейфующих буюв. Планируется создание региональных и международных сетей АБС, охватывающих важнейшие районы Мирового океана, предназначенных для получения широкой и оперативной информации о его состоянии и атмосферы над ним, а также для ведения широких научных исследований по изучению процессов в океане и атмосфере над ним и их взаимодействию.

Представляют интерес различного типа АБС, выставленные НУОА (Национальное управление по исследованию океанов и атмосферы) вокруг США и предназначенные для сбора гидрометеорологической информации и снабженные системами энергопитания, регистрации и связи, обеспечивающими автономность работы станции до одного года и более. Буй этих станций имеет следующие характеристики:

- десятиметровый буй: водоизмещение 60 т, масса около 30 т, полезный груз 2—5 т;

- двенадцатиметровый буй: водоизмещение 100 т, полезный груз 5—7 т;

- шестиметровый буй (называемый NOMAD) судового типа: водоизмещение 8 т, полезный груз до 2 т;

- пятиметровый буй: водоизмещение 6,5 т, полезный груз до 2 т.

Можно отметить буйковый комплекс «Navy Asce» фирмы «Литтон—Амикон» (США), предназначенный для обеспечения противолодочной обороны гидрологической информацией. Буй водоизмещением около 15 т выполнен в виде высокого цилиндра с дисковым демпфером общей длиной 12,4 м. На цилиндрическую часть буя (диаметр 1,6 м, длина 4,7 м) устанавливается ферма высотой 3 м, к которой крепится 12-метровая штыревая антенна. Диаметр диска демпфера 3 м. Постановка буя может осуществляться на глубине до 3000 м. Измерительная система буя позволяет проводить наблюдения за температурой воздуха, атмосферным давлением, скоростью и направлением ветра и температурой воды на разных горизонтах с последующей передачей информации по радиоканалу на судно-базу.

Для океанографических исследований в ФРГ разработана система U-образной постановки. На универсальном поверхностном бую UB-1, изготовленном из алюминиевого сплава, установлен контейнер с электронной измерительной, регистрирующей и телеметрической аппаратурой, блок питания, угольный отражатель и проблесковый огонь.

Радиомаяк буя обеспечивает его обнаружение на расстоянии до 50 миль. Буй UB-1 высотой с антенной 5,7 м, осадкой 1,1 м, диаметром 2,5 м, массой с оборудованием и балластом 1 т может

служить носителем разнообразной метеорологической, океанографической и геофизической аппаратуры. Набор океанографических датчиков, встроенных в кабель-трос, зависит от конкретных исследовательских задач. Полученная информация записывается в цифровой форме в каждом измерителе на магнитной ленте или передается в общий блок регистрации по кабель-тросу в виде частотно-модулированных импульсов.

В океанологической практике в последнее время широко распространение нашли дрейфующие буи (дрифтеры) — используемые для изучения процессов, происходящих в поверхностном слое океана и в атмосфере над ним. Передача информации о местоположении и гидрометеорологических характеристиках с дрифтеров, так же как и с якорных АБС, если там результаты наблюдений не фиксируются собственными регистраторами, осуществляется по радиоканалу на пункт приема или ИСЗ. Дрифтеры могут сбрасываться в океан как с судна, так и с летательного аппарата (самолет, вертолет), что позволяет производить исследования в отдаленных районах. Кроме того, они могут устанавливаться на льдинах для сбора информации о дрейфе льдов и метеоданных. Так, например, по программе «Тайрос» в южной части Тихого океана США сбросили серию из 30 буев для измерения поверхностных течений, атмосферного давления и температуры воздуха. Запас энергии на этих буях, длиной 330 см и максимальным диаметром 65 см, обеспечивал автономность работы до 12 месяцев. Сброшенные с самолетов, эти буи через ИСЗ передавали всю полученную информацию в НУОА.

В США выпускается еще один тип дрифтеров, в которых алюминиевый корпус буя имеет длину 320 см, диаметр 20 см и массу 90 кг. Автономность работы буя превышает 3 месяца. С помощью подобного типа дрифтеров можно производить измерения:

- атмосферного давления в диапазоне $(900-1050) \pm 1$ гПа;
- температуры воздуха от -5 до 35°C и воды в поверхностном слое от 0 до $25,5^\circ\text{C} \pm 0,1^\circ\text{C}$;
- скорости ветра до 40 ± 1 м/с;

Полученная информация передается по радиоканалу на частоте 350—400 МГц с амплитудной модуляцией. Прием сигналов производится ИСЗ «Тайрос». Буй сбрасывается на парашюте с самолета или устанавливается с НИС.

Усовершенствованный буй SALARGOS, имеющий корпус в виде цилиндра из алюминия длиной 430 см и диаметром 20 см, содержит электронные блоки: блок питания; ПИП атмосферного давления; 6 контейнеров с ПИП электропроводности и температуры воды, устанавливаемых на горизонтах 15, 50, 100, 150, 200 и 250 м и соединенных между собой многожильным кабелем; ПИП гидростатического давления, устанавливаемый на глубине примерно 300 м. В верхней части кабеля закрепляются тороидальные подлаки, в нижней — груз. ПИП температуры воздуха установлен на корпусе буя над поверхностью воды (льда). Информация с ПИП и

цифровой форме передается через ИСЗ на пункты приема информации по системе ARGOS. Два буя прошли испытания в Арктике в 1987 г.

При постановке АБС большое внимание необходимо уделять якорной системе, которая должна соответствовать двум основным требованиям. Во-первых, масса якорей должна превышать вертикальные усилия, передаваемые по несущему тросу, чтобы не позволить отрывать якорь от дна. Во-вторых, держащая сила якорей должна превышать горизонтальные усилия, стремящиеся протянуть якоря по дну.

Надежное сцепление якоря с грунтом, которое стремятся достичь при постановке АБС, осложняет подъем станции, так как при этом возникают большие динамические нагрузки, приводящие к обрыву троса. Этот обрыв из-за ослабления верхней части станкового троса, особенно при продолжительных буйковых постановках, чаще всего происходит как раз сверху. При этом основная часть гидрофизической аппаратуры тонет. Для устранения этого недостатка в настоящее время используют размыкатели троса, среди которых наибольшее распространение получили гидроакустические. Такие размыкатели включают в себя механический замок с исполнительным механизмом, гидроакустический приемник, дешифратор кодовых команд и батареи питания, помещенные в прочный корпус. Обычно размыкатель устанавливается в нижней части троса.

В качестве примера можно привести акустический размыкатель троса фирмы O. R. E. (Великобритания), три модели которых отличаются друг от друга лишь некоторыми конструктивными особенностями. Эта система состоит из двух основных компонентов. Собственно акустического размыкателя троса, состоящего из чувствительного гидрофона, настроенного на нужную частоту; блока питания в виде батарей, способных работать в течение трех месяцев; детектора и механической размыкающей схемы. Вторым компонентом является бортовой блок, формирующий кодовые двухполосные сигналы и передающий их на размыкатель. Акустический размыкатель троса помещен в легкий прочный корпус, выдерживающий большое давление (до глубины 2000 м) и помещается обычно вблизи якоря. Размыкающий механизм представляет собой стопорный палец, удерживаемый шпонкой. Бортовой блок вырабатывает двухполосный сигнал с несущей частотой 7,8 кГц с низкочастотным уровнем модуляции. Для кодирования используются три уровня детектирования сигнала: точность несущей и модулирующей частоты и комбинация этих частот в течение определенного промежутка времени. Таким образом, достигается большое число комбинаций. Передаваемый с борта судна кодированный сигнал принимается настроенным на данную частоту гидрофоном, модулируется и подается на размыкающий механизм, срабатывание которого отцепляет якорный трос.

В некоторых случаях используются также упрощенные конструкции программно-временных размыкателей троса, срабатывающих при электрохимическом разрушении под воздействием морской воды стопорной тяги, изготовленной, например, из сплава магния и алюминия.

25

Глава 4. Буй-лаборатории

При проведении «тонких» океанологических экспериментов с использованием НИС, в случае исследования некоторых гидрофизических полей, испытаний аппаратуры и т. д. возникают затруднения, вызываемые самим судном, его дрейфом, турбулентностью потоков от движения судна и шумом от работы двигателей, винтов и т. п. В целях исключения подобных влияний в последнее время в ряде стран, например США, Франции, Италии, России, создан ряд обитаемых и автономных буй-лабораторий, которые действуют в широком диапазоне морских глубин и на которых можно размещать целые измерительные комплексы. Эти системы могут длительное время находиться в заданном районе или дрейфовать вместе с водными массами. Достоинством таких буйев является их хорошая пространственная стабилизация, относительно высокая устойчивость, которые позволяют обеспечивать океанологические измерения в заданной точке и ориентации. Рассмотрим некоторые типы подобных систем.

Еще в 1962 г. в Институте океанографии Скриппса (США) был разработан и задействован в научных исследованиях обитаемый буй-лаборатория ФЛИП (Floating Instrument Platform). Носовая часть буя выполнена, как у судна, для удобства буксировки к месту исследований в горизонтальном положении. На месте его балластные цистерны заполняют водой и переводят буй в вертикальное положение. По вертикали буй разделен на четыре отсека: машинное отделение, жилое помещение, лаборатория и компрессорная. Имеется также отсек-лаборатория, заполненная водой. Общая масса буя с оборудованием — 590 т. Установленная на буйе аппаратура предназначена для измерения акустических сигналов, сейсмических и внутренних волн, микротермической структуры моря, течений и других характеристик водной среды и приводного слоя атмосферы.

В том же Институте океанографии Скриппса для проведения акустических исследований сконструирован необитаемый буй-лаборатория СПАР (Seagoing Platform Aqustic Research) сигарообразной формы. СПАР работает вкпе с двумя вспомогательными судами: одно для буксировки и снабжения буя электроэнергией по километровому кабелю, а другое для передачи электромагнитных и акустических сигналов в радиусе до 100 миль. Сигналы, принятые на буйе, передаются для анализа по кабелю на судно.

На основе опыта эксплуатации буя ФЛИП в 1988 г. введен в действие буй-лаборатория ФЛИП-П, способный работать при самых сложных гидрометеорологических условиях как в дрейфе, так и при одно-, двух- и трехъякорных постановках. Кроме производства акустических измерений буй предназначен для выполнения гидрофизических, метеорологических и гидробиологических исследований.

Можно также отметить еще несколько автономных необитаемых буйковых систем, разработанных в последнее время. Метеорологический и океанологический буй ARGOS (Франция) столбобразной формы, предназначенный для использования в морях вокруг побережья Антарктиды. На бую установлены ПИП атмосферного давления, температуры воздуха и скорости ветра. Вдоль подвешенного к бую троса длиной 155 м размещены ПИП температуры и электропроводности морской воды. Погрешности измерения атмосферного давления 1 гПа, температуры воздуха 1°C, скорости ветра 1 м/с, температуры воды 0,03—0,1°C, электропроводности ветра 0,003 мСм/см. Получаемая информация передается на ИСЗ ARGOS, движущийся по полярной орбите.

Буйковая система фирмы «Дженерал дайнамик корпорейшн» массой 100 т предназначена для проведения исследований в глубоководных районах Мирового океана. Буй в форме перевернутого гриба диаметром 12,2 м имеет следующие особенности:

- конструкция буйковой системы позволяет производить метеонаблюдения на высоте 5 и 10 м над буюм и использовать различные океанографические ПИП;

- к центральной части корпуса буя снизу крепится дакроновый трос диаметром 50 мм и длиной 500 м, к которому подвешен силовой электрический кабель для питания блоков океанографических ПИП (температура и электропроводность морской воды, скорость и направление течения, скорость звука и гидростатическое давление), размещенных на горизонтах 10, 20, 30, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300 и 500 м;

- обеспечена возможность осмотра, ремонта, замены оборудования на борту буя.

Ключевым элементом системы сбора данных служит портативная ЭВМ, которая обеспечивает:

- опознавание и проверку поступающих сигналов;
- выполнение команд, получаемых с береговой базы в соответствии с программой, заложенной в памяти ЭВМ;
- выдачу указаний ПИП для сбора метеорологической и океанологической информации;
- прием команд и участие в получении информации от ПИП в заданное время;
- автоматическое получение, обработку и хранение данных в промежутках между измерениями;
- выдачу команд обеспечивающим системам буя, подготовку и формирование ответа и его передачу на береговую базу;

— контроль за работой передатчика, включение аварийной сети переменного тока;

— опрос специальных ГИП, получение и обработку поступающей от них информации.

Среднее время наработки на отказ измерительной аппаратуры буйковой системы составило 4500 ч, а безремонтный срок службы установлен два года при возможной эксплуатации в сложных гидрометеорологических условиях.

Буйковая управляемая система типа 1120 фирмы ENDEGO (США) представляет собой самоходное радиоуправляемое судно на подводных крыльях с дизельным двигателем. Данная буй-лаборатория предназначена для проведения комплексных океанологических исследований в прибрежных водах и использует спутниковую систему навигации с питанием аппаратуры от солнечных батарей. На борту буй-лаборатории размещен комплект океанологических и метеорологических ГИП, микро-ЭВМ для управления аппаратурой и обработки поступающей информации и радиопередатчик.

Океаническая исследовательская заякоренная или установленная на льду лаборатория, снабженная автономной измерительной аппаратурой, предназначенной для исследования распределения гидрофизических и гидробиологических характеристик океана на глубине (США). Для непрерывного перемещения измерительного блока вдоль кабель-троса до глубины 400 м используется гидравлический подъемник с крылом треугольной формы площадью 0,29 м², работающего под воздействием имеющегося в месте проведения измерений течения. Минимальная скорость течения для привода подъемника составляет 3 см/с. Температуру воды измеряют в диапазоне 5—35 °С с погрешностью $\pm 0,01$ °С, электропроводность до 7 См/м с погрешностью $\pm 0,001$ См/м и гидростатическое давление до 62 МПа с погрешностью $\pm 0,05$ %.

27

Глава 5. Платформы для океанологических исследований

Основным техническим средством исследования океана в настоящее время и в обозримом будущем останутся НИС. Однако для решения многих океанологических задач, в частности при проведении «тонких» гидрофизических экспериментов в море, требующих жесткой ориентации измерителей в пространстве, классические технические средства (НИС, АБС и т. д.) могут вносить значительные погрешности, так как они подвержены воздействию ветра, волнения и течения и обладают определенной «шумностью». Для исключения подобных «паразитных» воздействий в последнее время в океанологической практике находят применение стационарные и передвижные, в том числе и погруженные, платформы, которые можно устанавливать на больших глубинах. Их сравните-

льно несложно перемещать буксирами с места на место. Особенно широко эти платформы используются при изучении мелкомасштабных процессов в океане, а также при длительных непрерывных гидрофизических и гидрометеорологических исследованиях на значительном удалении от берега.

В США вблизи г. Сан-Диего на расстоянии 1 мили от берега Лаборатория электроники ВМФ (Калифорния) установила платформу для океанологических исследований. Опорой станции служат стальные трубы, внутри которых трубы-шпильки утоплены в грунт на 20 м. На площади главной палубы размером 11,4×6,6 м размещены рубка, лаборатории, лебедки, стеллажи для оборудования. Станция снабжена термогирляндой с термисторами через 0,6 м, датчиками радиоактивности, измерителями течений, аппаратурой для биологических исследований и телевизионными камерами. Для изучения горизонтальной термической структуры вод на расстоянии 200 м от платформы установлено 40 датчиков температуры, образующих круг диаметром 133 м. Кроме того, платформа используется для испытаний уникальной экспериментальной гидрофизической аппаратуры.

Следует заметить, что для проведения океанологических исследований стали широко применяться также сооружения, установленные в море и используемые для добычи нефти со дна моря. Таким примером могут служить нефтяные вышки различных конструкций, расположенные во многих районах Мирового океана. В последнее время появились предложения ряда фирм для добычи нефти и газа использовать так называемые шарнирные платформы, опирающиеся своей нижней оконечностью (достаточно тяжелой) о дно. В верхней части платформы сосредоточены плавучести, что и делает платформу устойчивой. Такие платформы могут устанавливаться на глубине до 300 м со значительно меньшей трудоемкостью, чем все остальные.

Использование подобных платформ в океанологии в ближайшем будущем сулит получение ценных научных результатов, которые невозможно получить с НИС.

10

Глава 6. Подводные аппараты для океанологических исследований

Развитие науки и техники в последние десятилетия позволили создать большое число подводных аппаратов для океанологических исследований. В настоящее время в мире насчитывается около 500 необитаемых аппаратов и 150 обитаемых. Они разнообразны по назначению и конструкции, но все служат человеку в деле изучения, освоения и использования океана. Существующие подводные аппараты предназначены в основном для выполнения научных исследований на всех глубинах Мирового океана, а также ко-

нкретных задач, связанных с рыболовством, гидрогеологией, прокладкой труб по дну, бурением и т. д. В настоящее время не существует твердо установленной и общепринятой классификации подводных аппаратов, но условно их можно разделить по четырем основным признакам:

- по обитаемости они делятся на обитаемые (с человеком на борту) и необитаемые или автоматы с дистанционным управлением;

- по глубине погружения на аппараты малых глубин (до 600 м), средних (до 2000 м), больших (до 6000 м) и предельных (до 11 000 м);

- по способу поддержания в воде на привязные (поддерживаемые тросом — гидростаты, батисферы), беспоплавковые (поддерживаемые плавучестью прочного корпуса), поплавковые — батискафы, донные — передвигающиеся по дну;

- по автономности и связи с базой на транспортируемые — доставляемые судном в район исследований и буксируемые на тросе, автономные — доставляемые судном и самостоятельно перемещающиеся после спуска на воду, полностью автономные с базой на берегу.

6.1. Обитаемые подводные аппараты

Первенцами из всего многообразия обитаемых подводных аппаратов (ОПА), несомненно, являются привязные аппараты, которые используются и сейчас. В целом привязные ОПА имеют ряд важных достоинств. Кабель-трос не только держит аппарат в толще воды, но и позволяет подавать энергию и осуществлять связь. Экономия в массе и полезной площади из-за отсутствия энергетической установки позволяет оснащать эти ОПА большим комплексом исследовательской аппаратуры, увеличить автономность работы и человеко-вместимость. Возможность передачи электроэнергии с борта судна позволяет установить гребные электродвигатели, т. е. перемещаться на значительное расстояние. К недостаткам таких ОПА относится малая глубина погружения, отсутствие автономности, сложность операций подъема и спуска из-за кабель-троса и шлангов. Кроме того, в штормовую погоду порой становится невозможной работа аппарата.

К привязным ОПА относятся батисферы, гидростаты. В 1951 г. в Японии был построен гидростат «Курсою» для изучения пищевых ресурсов на глубине до 200 м с экипажем в четыре человека и с большим (для того времени) комплексом исследовательской аппаратуры. Аппарат мог перемещаться и поворачиваться. Реконструкция этого аппарата позволила создать неавтономную подводную лодку с тем же названием. В это же время строились привязные ОПА в США, Италии и Франции.

Наиболее многочисленную группу составляют самоходные ОПА для малых глубин водоизмещением до 15 т, со скоростью 1—3 м/с.

Их отличает значительная автономность, большая маневренность, они могут покрывать большие расстояния надводным ходом, обследуя обширные районы шельфа. Основная трудность в использовании ОПА данного типа заключается в доставке их в район исследований.

Во многих странах целые фирмы специализируются на выпуске подобных аппаратов. В 1959 г. во Франции по проекту Ж.-И. Кусто был построен ОПА «Дениза» — «ныряющее блюдо» — уникальный аппарат с водометным двигателем, обеспечивающим скорость до 1,5 узла и дальность до 3 миль. Из ОПА США наиболее интересны «Кабмарин», «Бентос», «Стар» и их различные модификации. Так, например, фирма «Перри субмарин болдер», начав с ОПА «Кабмарин РС-3х», выпускает уже современные аппараты 10-го — 15-го поколений. ОПА серии «Стар», также претерпев ряд модернизаций, стали одними из лучших в своем классе. Японская лодка «Иомиури», построенная фирмой Мицубиси в 1964 г., также послужила толчком к созданию более совершенных аппаратов малых глубин.

Обитаемые подводные аппараты больших и средних глубин имеют прочный корпус, выполненный в виде сферы из материала с высокой удельной прочностью. В США в 1964 г. появилось сразу два таких аппарата: «Алвин» и «Аллюминаут». «Алвин» выполнен в виде сферы из стали толщиной 34 мм, рассчитан на двух человек с автономностью 24 ч. Аппарат оборудован дифферентной системой, эхолотом, системой переменного балласта, гайдропом и т. п. и предназначен для производства картирования дна, отбора проб грунта и поднятия предметов. «Аллюминаут», напоминая подводную лодку с прочным корпусом в виде сферы, был первым ОПА, оборудованным телекамерой.

Американские конструкторы совместно с Ж.-И. Кусто разработали целую серию аппаратов «Дипстар», прообразом которых стала «Дениза». Аппараты этого типа широко используются в ВМС США и в океанологических исследованиях. В настоящее время для изучения Мирового океана кроме отечественных «Мир-1» и «Мир-2» используются аппараты глубиной погружения до 6000 м «Сиклифф» и «Наутилус» (США), участвовавшие в работах по «Титанику», и «Синкай-6000» (Япония).

Достижение максимальных глубин Мирового океана стало возможным только после создания в 1953 г. Огюстом Пикаром принципиально нового аппарата — батискафа «Триест». Батискаф — это автономный аппарат, состоящий из поплавка в виде легкого корпуса, заполненного малосжимаемой жидкостью, например бензином, которая обеспечивает положительную плавучесть, и прочной сферы — гондолы. Поплавок «Триеста», масса которого составляла 15 т, был разделен на отсеки переборками жесткости, а толщина стенок гондолы (от 90 до 150 мм) позволяла выдерживать давление на глубине 15 км. Через 7 лет после перестройки «Триест» достиг рекордной глубины 10 919 м.

Дальнейшее развитие батискафов было направлено на решение проблемы малой маневренности этих ОПА, размещения большего количества аппаратуры, снижения массы, облегчения управления. Частично эти трудности были решены в батискафах ФНРС-3 и особенно «Архимед». Но они по-прежнему неудобны при транспортировке, обладают малой маневренностью и ограничены в проведении работ.

Следует отметить, что ОПА находятся в начале своего развития и их КПД довольно низок. Любая, даже простая, операция на дне выполняется в течение длительного времени. В дальнейшем, по-видимому, следует ожидать возрастания уровня автоматизации исследований, выполняемых ОПА. Человек в этих аппаратах должен стать супервизором, решающим только основные стратегические задачи. ОПА будут снабжены минироботами, выпускаемыми для осмотра дна, для разрушения скальных пород, для отбора проб грунта, для проведения прецезионных гидрофизических исследований вдали от ОПА. Очень важно создание аппаратов с большой автономностью плавания, до нескольких сотен миль, что расширит сферу их применения, комплекс и масштаб решаемых задач. Первые шаги в этом направлении уже сделаны фирмой «Миконери».

6.2. Необитаемые подводные аппараты

Необитаемые подводные аппараты (НПА) предназначены для исследования океана и выполнения сравнительно несложных работ в его глубинах. Основные преимущества их перед ОПА заключаются в отсутствии сложных систем жизнеобеспечения, существенно меньшей массе, габаритах и энергопотреблении, т. е. простоте, надежности и мобильности. С этих же позиций предъявляются и основные требования к аппаратуре НПА: она должна быть простой, надежной и иметь минимальные массу, габариты и энергопотребление.

Большую группу составляют привязные НПА, с помощью которых удастся выполнять длительные измерения параметров среды на заданных горизонтах, картографирование дна и поиск затонувших объектов. Такие системы обычно буксируются на кабель-тросе, который одновременно служит еще энергопитающим и информационным каналами. По-видимому, буксируемые НПА в ближайшем будущем исчерпают свои возможности. Буксировка НПА — довольно дорогая и трудоемкая операция, выполняемая на скорости не более 2 узлов, при которой не исключена возможность потери аппарата, оборудованного уникальной и дорогостоящей техникой, особенно при исследованиях придонных горизонтов. Для избежания этого, по всей видимости, необходимо увеличить количество получаемой информации в единицу времени. В будущем буксируемые НПА будут снабжены выпускаемыми минироботами, способными производить осмотр дна, отбор проб грунта и выполнять различные локальные исследовательские задачи. Связь между букси-

руемыми НПА и минироботами может осуществляться по гидроакустическому каналу. Все это существенно повысит информативность исследований, их эффективность и снизит стоимость.

Автономные НПА предназначены для выполнения исследовательских задач по заранее определенной программе. Такие аппараты могут работать либо в толще воды, либо непосредственно у дна, а также как в строго зондирующем режиме по вертикали, так и в режиме пространственного зондирования, когда спуск и подъем происходят, например, по спирали. В ходе движения могут осуществляться измерения параметров среды, фотографирование дна, отбор проб воды, а при посадке на грунт также может выполняться и отбор проб грунта. Связь НПА с судном-базой обычно осуществляется по гидроакустическому каналу. В настоящее время в мире насчитывается более 40 конструкций автономных НПА, из них около 20 действующих.

Наиболее часто встречающимися у подводных аппаратов являются винтовые движители. Управление по курсу и дифференту осуществляется с помощью гидродинамических рулей или подруливающих устройств. Погружение аппаратов чаще всего производится за счет подвешивания дополнительного груза, часть которого сбрасывается при достижении необходимого горизонта, а в рабочем режиме сохраняется небольшая положительная плавучесть. Нахождение на заданном горизонте регулируется подруливающими устройствами, иногда гайдропами. В некоторых аппаратах используются балластно-дифферентные системы. В США разработан проект автономного НПА BCU (Buoyancy Control Unit), в котором плавучесть изменяется путем вытеснения водного балласта сжатым воздухом. В качестве источников питания используются дизель-генераторы или батареи.

Основными трудностями создания и эксплуатации автономных НПА являются разработка источников энергии с высокими удельными характеристиками, исключение использования гидроакустических каналов связи (ГАКС) на большом расстоянии, отсутствие передачи больших объемов информации. Исключить подобные трудности попытались в Канаде при создании автономного дистанционно управляемого аппарата (ARCS), предназначенного для обследования ледовой обстановки и выполнения гидрографических работ в Арктике. Автономные НПА стоимостью около 1,5 млн. долларов оснащены пятью отдельными гидроакустическими системами и 23 микропроцессорами, что позволяет им без управления с поверхности выполнять обследование заданного района моря, площадью свыше 3 квадратных миль, двигаясь по заранее заданному маршруту, самостоятельно обходя препятствия и возвращаясь после этого в исходную точку. Одновременно с этим с аппарата по ГАКС на судно-базу передается информация о местоположении аппарата, глубине места, высоте аппарата над дном, температуре и солености воды в данной точке. Кроме того, ГАКС применяется и для управления аппаратом с судна-базы.

Анализ продолжительности эксплуатации ПА показывает, что для действующих аппаратов 50 % времени затрачивается на обслуживание морских нефтепромыслов, осмотр подводных трубопроводов и кабелей, около 20 % на укладку в грунт труб и кабелей, 12 % на подводные и аварийно-спасательные работы, остальное время на океанологические исследования, контроль загрязнения океана. Исследовательское значение ПА в основном ограничивается «описательными» или «созерцательными» областями океанологии. Но следует надеяться, что с развитием гидрофизических средств экспериментальных измерений физических и химических полей Мирового океана роль подводных аппаратов будет возрастать. По-видимому, в дальнейшем ПА будут эффективным средством выполнения исследований, экспериментов и работ на любых глубинах Мирового океана, поэтому темпы их строительства с каждым годом будут увеличиваться.

32

Глава 7. Неконтактные технические средства проведения океанологических исследований

В последнее время при исследовании Мирового океана большое значение приобретают неконтактные средства, использование которых основано на получении данных излученного или отраженного океанологическими объектами электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. При этом неконтактная измерительная аппаратура (т. е. аппаратура, не имеющая непосредственного контакта с исследуемой средой) может быть установлена на борту не только НИС, но и чаще всего авиационных и космических носителей.

Характерными особенностями всей неконтактной измерительной аппаратуры являются косвенный характер измерения океанологических параметров и воздействие на результаты измерений многих неустраняемых помехообразующих факторов, что приводит к погрешностям измерений, как правило, превышающим погрешности измерений, выполненных с помощью контактной аппаратуры; невозможности получения информации о глубинных слоях океана (в настоящее время лишь до глубины 30—40 м); невозможности получения результатов измерений с приемлемой точностью.

К положительным качествам данных технических средств относятся: возможность получения практически непрерывных пространственных реализаций полей океанологических характеристик; возможность освещения больших акваторий за ограниченный промежуток времени; возможность, особенно с помощью космических систем, регулярного освещения всей акватории Мирового океана с временной дискретностью 2—3 ч в течение весьма длительных промежутков времени (годы и даже десятилетия); возможность

получения массовых данных о таких океанологических явлениях и характеристиках, которые невозможно получить контактными методами, например о глобальном распределении ледяного покрова и толщине льда; отсутствие влияния при производстве наблюдений штормовых условий.

Раздел II

ТЕХНИКА КОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

19

Глава 1. Наблюдения за колебаниями уровня моря

1.1. Методы измерения колебаний уровня моря

Колебания уровня моря уже в глубокой древности обращали на себя внимание прибрежных жителей и мореплавателей. В местах с большими, в том числе и с приливными колебаниями уровня, в устьях судоходных рек, в заливах и бухтах, служивших естественными убежищами для мореплавателей, постепенно начинались наблюдения за уровнем моря. Сначала их вели, вероятно, без всяких приборов — по обнажающимся и вновь покрываемым водой скалам, камням и т. п., а затем, и уже довольно давно, появились простейшие водомерные рейки (рейки с делениями, предназначенные для непосредственного отсчета уровня воды).

Колебания уровня моря, величина которых есть разность между наибольшим и наименьшим значением уровня моря за определенный интервал времени, являются результатом наложения волновых колебаний различного происхождения. Эти колебания отличаются амплитудно-частотными характеристиками и требуют специально организованных систематических измерений. Практически во всех приморских странах организована, как правило, сеть постоянных береговых и островных уровенных постов (место, оборудованное для наблюдений за уровнем моря).

Все эти измерения производятся различными типами приборов, включая и простую водомерную рейку. При этом необходимо отметить, что проведение систематических измерений уровня связано со значительными затруднениями, вызываемыми физико-географическими, гидрофизическими и гидродинамическими условиями прибрежной зоны. Это и большая осушка, и открытый берег, и большие скорости течений, и перенос твердых частиц, и ледовые явления, и разрушение берегов, обрастание измерительных приборов и т. п. Подобные условия требуют для установки измерительных приборов строительства капитальных дорогостоящих сооружений, а иногда приходится ограничиваться созданием временных, сезонных уровенных постов, но даже и это не всегда оказывается возможным.

Уровнем моря принято называть *высоту поверхности моря, свободную от влияния ветровых волн и волн зыби, измеренную относительно условного горизонта*. При этом в качестве *уровенной поверхности используют поверхность морей и океанов, нормальную к направлению силы тяжести*. В качестве условного горизонта можно использовать или так называемый нуль поста (*условная*

постоянная для данного уровня поста поверхность, от которой отсчитываются уровни моря), или единый нуль постов моря (единая условная поверхность, от которой производится отсчет уровня моря на всех уровнях постах данного моря или ряда морей).

Таким образом, основные требования к измерениям уровня моря, а в данный момент определяется мгновенный уровень моря, состоят в исключении короткопериодных волн, вызываемых ветровыми волнами колебаний, волн зыби и в постоянстве условного горизонта (принятого нуля отсчета). Гидрометеорологические и физико-географические условия района производства наблюдений определяют требования к точности, дискретности и методике производства наблюдений, т. е. к возможности использования того или иного вида приборов.

При исследовании колебаний уровня моря прежде всего необходимо учитывать величину и характер колебаний. Наиболее существенные изменения уровня наблюдаются на морях с наличием приливных явлений (*динамические и физико-химические процессы в водах морей и океанов, вызванные приливообразующими силами*), когда периодические повышения и понижения уровня могут составлять от 10 до 130 см за 1 ч. Значительное влияние на колебания уровня оказывают и сгонно-нагонные явления — *изменение уровня морей и океанов под воздействием ветра и атмосферного давления*. При этом изменение уровня может достигать 30—40 см за 1 ч. Кроме того, можно отметить *эвстатические колебания уровня моря — изменения уровня Мирового океана, связанные с изменением объема воды в нем, а также с изменением емкости морей и океанов*; плотностные колебания уровня — *изменения уровня моря, обусловленные изменениями плотности воды*; сейшевые колебания уровня — *свободные колебания уровня моря в виде стоячих волн в замкнутых и полужамкнутых водоемах, происходящие по инерции после воздействия внешних сил*. Кроме того, выбор тех или иных приборов и способов их установки зависит от характера берега, глубин прибрежной части, ледовитости в районе наблюдений.

Измерения колебаний уровня моря должны выполняться с необходимой для решения определенной задачи точностью, достаточной, например, для обеспечения нужд мореплавания (судовождение, базирование, эксплуатация причалов и якорных стоянок), гидрографии (морской картографии, лоций, средств навигационного оборудования), океанографии (режимных обобщений, специальных исследований, расчетов и прогнозов), геофизики, гидротехнического проектирования и строительства, добычи полезных ископаемых в море и т. д.

Постоянная информация об уровне необходима не менее четырех раз в сутки, т. е. 1 раз в 6 ч. При сгонно-нагонных колебаниях наблюдения должны производиться каждый час, а при опасных для района повышениях или понижениях уровня и чаще. На практике часто приходится пользоваться и средним уровнем моря —

величиной, полученной в результате осреднения наблюдаемых значений уровня за определенный интервал времени.

Практически во всех приморских странах прибрежные наблюдения за колебаниями уровня моря ведутся на специально оборудованных уровневых постах. По устройству различают речные, свайные, свайно-речные посты, а также уровневые посты с установкой самописцев уровня моря различного типа (СУМ). Для решения же отдельных задач кроме наблюдений на стационарной сети ведутся и эпизодические наблюдения на дополнительных и временных уровневых постах.

Речные уровневые посты, как правило, оборудуются в портах у приглубого берега и снабжаются постоянными металлическими водомерными рейками. Свайные уровневые посты оборудуются при пологом дне моря и отсутствии гидротехнических сооружений и состоят из ряда свай, устанавливаемых в створе с противелированным профилем и с расстояниями между ними не более 50 м, причем головка самой нижней сваи должна быть на 25—50 см ниже минимально возможного уровня, а самой верхней сваи — на 25—50 см выше максимально возможного уровня. Наблюдения выполняются переносными водомерными рейками. Свайно-речные уровневые посты оборудуются при пологом дне и значительных колебаниях уровня, когда дополнительно к сваям устанавливают постоянные водомерные рейки, а при необходимости можно использовать и переносные водомерные рейки.

Выбор типа уровневого поста и его конкретное выполнение целиком зависят от местных условий с учетом целей и задач проводимых наблюдений. И зачастую приходится идти на устройство капитальных установок, несмотря на их высокую стоимость, что, правда, полностью оправдывается при организации многолетних наблюдений. Иногда подобные установки включаются непосредственно в план строительства портовых сооружений (молы, волноломы и т. д.) и возводятся вместе с ними. При экспедиционных работах используются, естественно, самые простые установки. При налаженной работе (своевременное нивелирование в первую очередь) риск устройства подобных постов, так как велика возможность потери приборов в штормовую погоду, оправдывается громадным выигрышем во времени и степени информативности.

Основное требование ко всем прибрежным наблюдениям за уровнем моря — это их надежная связь с самим берегом. Высотное положение нуля каждого уровневого поста должно быть точно определено относительно ближайшей высотной марки (репера) государственной нивелировки (триангуляционной сети). В случае отсутствия вблизи расположения уровневого поста марки государственной нивелирной сети здесь закладываются специальные (основные) реперы с расчетом обеспечения их сохранности на срок не менее 20—25 лет.

1.2. Приборы и устройства для измерения колебаний уровня моря

По принципу измерения условно можно выделить два типа приборов и устройств: приборы и устройства, измеряющие непосредственно колебания уровня моря, например с помощью водомерных реек, поплавковых систем и т. п.; приборы, с помощью которых колебания уровня моря измеряются косвенным путем, например путем измерения гидростатического давления, затухания радиоактивного излучения и т. д. (23)

Наиболее простым устройством для измерения колебаний уровня моря, с помощью которого ведутся систематические наблюдения на уловенных постах без автоматических регистраторов и контрольные наблюдения в пунктах с автоматическими регистраторами являются водомерные рейки. Они бывают постоянные (футштоки), крепящиеся вертикально к неподвижным сооружениям или скале, и переносные, по которым наблюдения производятся на свайных или свайно-реечных постах, устанавливая их в момент наблюдений на головку сваи. В России, например, широко используется морская водомерная рейка ГМ-3, состоящая из нескольких металлических пластин, укрепленных на металлическом основании корытного типа толщиной примерно 1 см. В отверстиях пластин размещаются фарфоровые вкладыши делений шкалы (по 2 см) и через 10 см ее оцифровки. Погрешность шкалы рейки на любом ее участке составляет ± 2 мм на каждый погонный метр. Используются два следующих типа рейки:

Длина рейки, м	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
2,8	2900×240×80	86
4,0	4100×240×80	150

В последнее время водомерные рейки стали изготавливать из синтетических материалов. Они легки, не боятся обмерзания, устойчивы к ударам, легко читаемы и долговечны. Кроме того, они могут снабжаться дополнительными устройствами для регулирования высоты нуля отсчета. Иногда используются водомерные рейки с успокоителем в виде металлической трубы с отверстием у дна, внутри которой помещается поплавок. Как правило, применяются два типа постоянных реек с успокоителем. В одном из них поплавок крепится к мерной ленте, перекинутой через блок; к другому концу ленты присоединен противовес, а в верхней части трубы врезано окошечко с индексом, позволяющим производить отсчеты делений мерной ленты. В другом типе поплавков прикреплен к штоку, на верхнем конце которого имеется указатель, скользящий по рейке, прикрепленной к трубе. Этот тип рейки обычно используется при небольших колебаниях уровня. Существуют также и переносные рейки с успокоителем. (21)

Поплавковые измерители колебаний уровня моря. Они довольно просты по своему устройству и надежны в эксплуатации. Чувствительным элементом в данных приборах является поплавок. Их инструментальные погрешности составляют 1—3 см. Работа при-

бора основана на принципе механической передачи изменений положения поплавка относительно нуля отсчета, вызываемых колебаниями уровня, т. е. изменения уровня моря передаются поплавку, соединенному с противовесом с помощью троса или цепи, перекинутых через поплавочное колесо. Условие равновесия всей этой системы в статическом режиме будет (по Г. Н. Мору)

$$F_2 = F_1 - F_3, \quad (1)$$

где F_1 — сила тяжести поплавка; F_2 — сила тяжести груза противовеса; F_3 — подъемная сила поплавка при погружении его на глубину H .

Подъемная сила поплавка постоянного сечения при чистой открытой поверхности будет

$$F_3 = \alpha SH, \quad (2)$$

где α — удельный вес поверхностного слоя воды; S — площадь сечения поплавка. Учитывая, что $S = \frac{\pi d^2}{4}$, получим

$$F_3 = \alpha H \frac{\pi d^2}{4},$$

где d — диаметр рабочей части поплавка. При колебаниях уровня моря поплавки следят за ними только при наличии равновесия системы. Так, при падении уровня

$$F_2 < (F_1 - F_3) + \Delta F_3, \quad (3)$$

а при повышении

$$F_2 > (F_1 - F_3) - \Delta F_3, \quad (4)$$

где ΔF_3 — приращение подъемной силы поплавка. Здесь важным фактором является соблюдение неравенств при крайних значениях диапазона измерений

$$\Delta F_3 = \alpha \Delta H \frac{\pi d^2}{4}, \quad (5)$$

где $\Delta H = \Delta H' + \Delta H''$ — суммарное приращение глубин погружения поплавка; $\Delta H'$ и $\Delta H''$ — приращение глубин погружения поплавка при падении и повышении уровня соответственно, т. е. движение поплавка начнется при высоте уровня выше или ниже начального на ΔH .

Согласно (3) — (4), сила тяжести поплавка в пределах $F_2 = (F_1 - F_3) \pm \Delta F_3$ меняется из-за приращения его глубины погружения, что автоматически регулируется подъемной силой поплавка. Очевидно, что изменение глубины погружения поплавка является источником погрешности в измерении колебаний уровня. Приращение глубины погружения поплавка не является постоянным, а зависит от многих факторов. Из (5) видно, что для уменьшения ΔH необходимо уменьшить ΔF_3 или увеличить d , что наиболее эффективно. В общем виде

$$\Delta H = f(F'_1, F'_2, \Delta F_2, F_{\text{тр}}, d, \Delta l), \quad (6)$$

где F'_1, F'_2 — сила тяжести левой и правой части троса соответственно; ΔF_2 — подъемная сила части троса и груза противовеса в воде; $F_{\text{тр}}$ — сила трения в узлах системы; Δl — линейное термическое расширение части троса с подвешенным поплавком. Следовательно, факторы, оказывающие влияние на погрешностные характеристики поплавковых измерителей: $F_1, F_2, \Delta F_3$ и в какой-то мере $F_{\text{тр}}$ — связаны с колебаниями уровня моря, а d и Δl — с колебаниями температуры воды и воздуха.

Опыт эксплуатации и результатов расчетов поплавковых измерителей позволяет сделать вывод, что оптимальная высота рабочей части поплавка h должна быть $h = \Delta H_{\text{max}}$, а точность измерений в основном зависит от внешнего диаметра поплавка, т. е. от приращения его подъемной силы F_3 , а также от амплитуды колебаний уровня и может быть доведена до ± 1 см. Сила тяжести груза противовеса должна быть равна максимальному приращению подъемной силы поплавка, т. е. $F_2 = \Delta F_{3\text{max}}$ при соблюдении условия равновесия и неравенств системы. Поплавковому измерителю свойственна асимметрическая погрешность, которая зависит от подбора (расчета) элементов прибора.

В качестве примера поплавкового измерителя уровня можно привести поплавковые СУМ фирмы «Фишер и Портер», используемые на сети уровенных постов береговой и геодезической службы США. В этом приборе, который устанавливается в специальном колодце, применяется поплавок диаметром 21,5 см и отсутствует груз противовеса, вместо которого используется крутящий момент спиральной пружины, установленной на ведущем валу. Успокоитель в виде двойной крученной пружины может накапливать колебания уровня в используемом колодце диаметром 30,5 см порядка 0,5 м в течение восьмисекундной регистрирующей фазы. Регистрация колебаний уровня осуществляется каждые шесть минут на перфоленте, допускающей визуальное считывание. Обработка перфолент довольно проста и не занимает много времени. Так, для перевода 7000 ординат в табличную форму требуется 35 мин. Максимальная погрешность измерения уровня данным прибором составляет 3 см.

В береговой и геодезической службе США используется также переносной поплавковый СУМ, отличающийся небольшими размерами и более легкой методикой установки, но, правда, имеющей меньшую точность измерений. Прибор в кожухе с поплавком диаметром 8 см устанавливается на верхнем конце трубы диаметром 10 см. В нижней части трубы имеется соединительная муфта и коническое окончание с резьбовым отверстием, в которое вставляется втулка с отверстиями диаметром 1,25; 1,6 и 1,9 см, предназначенными для гашения короткопериодных волновых колебаний. Труба с прибором с помощью соединительной муфты крепится на забитой в грунт трубе такого же диаметра и также име-

ющей отверстия для поступления воды. Поступающая информация о колебаниях уровня моря регистрируется на восковой бумаге. Прибор снабжен часовым механизмом и восьмидневным заводом. Предусмотрена возможность подбора шестеренок для изменения масштаба записи на ленте.

Для установки всех поплавковых СУМ требуется специальный колодец, свободно сообщающийся с морем и в то же время надежно защищенный от короткопериодного волнения. Наиболее надежной, но и наиболее дорогой установкой для СУМ является колодец, вырытый на берегу и в нижней части соединенный с морем прямой трубой. Дно колодца должно быть ниже самого низкого уровня моря. Труба закладывается почти на уровне дна колодца, а ее выходной диаметр может меняться с помощью специальной задвижки, играющей роль фильтра низких частот, отсекающей влияние ветрового волнения на получаемую информацию о колебаниях уровня моря. Колодец и труба должны быть легко доступны для очистки от наносов. Над колодцем строится прочная и отапливаемая будка, в которой устанавливается самописец.

Несколько проще осуществляется установка СУМ при использовании каких-либо портовых сооружений — пирса, стенки набережной и т. д. В этом случае используют широкую металлическую трубу, сруб из ряжей или бетонный колодец, прочно прикрепленный к стенке сооружения. Для сообщения с морем в нижней части трубы высверливается несколько отверстий. Как бы ни был установлен СУМ, в непосредственной близости от него, но всегда вне колодца устанавливается футшток, нуль которого нивелировкой связывается с береговым репером. Контрольные отсчеты футштока позволяют следить за правильностью записи СУМ.

(24) Электроконтактные измерители уровня моря. Они являются преобразователями положения уровня воды в электрические импульсы, которые могут фиксироваться в различном виде. Первичный измерительный преобразователь (ПИП) прибора состоит из ряда электрических контактов, расположенных на жестком основании через равные промежутки выше и ниже уровня воды. Системой резисторов электрические контакты соединены со схемой питания прибора и самописцем. При подъеме уровня контакты поочередно замыкаются на «землю», в результате чего электрическое сопротивление в цепи ПИП меняется скачкообразно. При падении уровня наблюдается обратный процесс. Электрический измеритель японского образца позволяет измерять уровень непрерывно или дискретно и обеспечивает точность (при отсутствии ветровых волн), соответствующую половине расстояния между контактами.

Информация об уровне, фиксируясь с помощью электроконтактов, может передаваться по различным каналам телеметрии. Например, в Японии «автоматическое устройство для телеметрической регистрации приливного уровня» включает в себя радиоканал связи. Регистрация уровня здесь осуществляется в определенное время, а при опасных колебаниях уровня прибор автоматически

переключается на непрерывную регистрацию и одновременно передает сигнал тревоги на пункт управления.

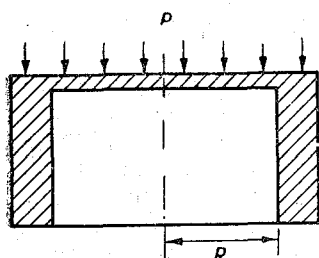
Фирма «Плесси» (Великобритания) выпускает волнограф-уровнемер с ПИП проволочного типа, прикрепленным к свае. Изменение сопротивления провода, вызванное колебаниями уровня, модулирует частоту генератора, устанавливаемого вблизи от ПИП. Этот модулированный сигнал по трехжильному кабелю поступает на блок преобразования, устанавливаемый на берегу с возможностью использования радиоканала. С выхода преобразователя информацию можно получить в цифровом виде на перфоленте, магнитной ленте или на аналоговом самописце. Уровень моря определяется путем схемного осреднения волновых колебаний водной поверхности. Погрешность прибора не превышает 1 % от длины проволоки, которая может меняться от 3 до 12 м.

Достоинством подобных измерителей является возможность определения с высокой точностью положения уровня моря в момент замыкания контактов. Уровень моря определяется количеством замкнутых контактов и расстоянием между ними. При наличии ветровых волн прибор не позволяет измерять уровень непосредственно. Для определения колебаний уровня моря сигналы, поступающие с ПИП, подвергаются фильтрации. В этом случае регистрация колебаний с периодами более 30 с может производиться с точностью 1—2 мм (при расстоянии между контактами 7 мм). Однако с обрастанием контактов точность измерений может резко снизиться. Поэтому данный прибор при эксплуатации требует постоянного наблюдения за его состоянием.

Гидростатические измерители уровня моря. Эти приборы основаны на измерении флуктуации гидростатического давления, вызванных колебаниями уровня. Измерение флуктуаций гидростатического давления чаще всего базируется на использовании упругой деформации (перемещения) чувствительного элемента под действием приложенной разности давлений, т. е. мерой приложенного давления является линейно связанная с ним деформация. Упругим элементом в ПИП давления являются мембраны (плоские или гофрированные), сильфоны и трубчатые пружины. В свою очередь размер деформации измеряется с помощью механических, электрических, магнитных, оптических и других систем, а по используемому методу преобразователи классифицируются на резистивные, индуктивные, емкостные, пьезоэлектрические и резонансные. Причем в океанологической практике емкостные и пьезоэлектрические не нашли широкого применения. Рассмотрим коротко упругие элементы и методы преобразования информации.

Упругая мембрана является универсальным первичным преобразователем давления. Варьируя ее толщину и диаметр, а также применяя соответствующие материалы, удается использовать преобразователи этого типа для очень широкого диапазона измеряемых давлений. Для получения одинаковых температурных коэффи-

Рис. 1. Плоская упругая мембрана.



циентов расширения желательнo изгото- влять мембранные преобразователи и корпуса этих преобразователей из одно- го и того же материала, что обеспечи- вает в определенной степени репрезента- тивность измерений.

Возьмем плоскую круглую мембрану с жесткой заделкой в качестве чувстви- тельного элемента, на которую действует равномерно распреде- ленное давление (рис. 1). В случае если максимальные прогибы мембраны y_0 малы (сравнимы с толщиной мембраны), что обы- чно наблюдается в ПИП, то можно записать

$$y_0 = 3P \frac{(2 - \mu^2)}{16E} \frac{R^4}{h^3}, \quad (7)$$

где P — давление, действующее на мембрану, $(\text{кг} \cdot \text{с})/\text{см}^2$; μ — коэф- фициент Пуассона; E — модуль упругости материала мембраны, $(\text{кг} \cdot \text{с})/\text{см}^2$; R — радиус мембраны, см; h — толщина мембраны, см; основная резонансная частота колебаний мембраны f_0 будет

$$f_0 = 10,21 \frac{h}{R^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1 - \mu^2)}}, \quad (8)$$

где ρ — плотность материала мембраны. При этом влияние при- соединенной к мембране массы морской воды на резонансную час- тоту мембраны может быть учтено введением поправки

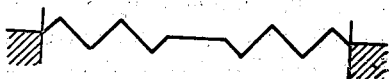
$$f = f_0(1 + \beta)^{-0,5}; \quad \beta = 0,669 \frac{\rho_1}{\rho} \frac{R}{h}, \quad (9)$$

где ρ_1/ρ — отношение плотности морской воды к плотности мем- браны.

Собственная частота мембраны определяет верхний частотный диапазон применения прибора. Высокие частоты можно получить путем увеличения толщины и уменьшения диаметра мембраны, что, правда, связано с уменьшением чувствительности. Практически идеальная линейность зависимости максимального прогиба мем- браны от давления обеспечивается, если размер прогиба не превы- шает 0,3 ее толщины.

Максимально допустимое смещение в центре мембраны можно допустить за счет более эффективного распределения деформации по диаметру мембраны, что обеспечивает гофрированная мембрана или мембранная коробка. Перемещение центра гофрированной мем- браны (рис. 2) может достигать 4 % радиуса. Профили гофров могут быть синусоидальными, пилообразными, трапециевидными. Преимущественное влияние на характеристику оказывает глубина гофрирования и число гофров при заданном диаметре мембраны.

Рис. 2. Гофрированная мембрана.



Гофрированные мембраны могут соединяться в коробки при пропорциональном возрастании перемещения центра. Мембранные anerоидные коробки обеспечивают большее перемещение по сравнению с максимально возможным для одиночной мембраны, но наряду с высокой чувствительностью они обладают существенной нелинейностью. Их целесообразно использовать в устройствах для измерения малой изменчивости давлений, например при исследовании волновых пульсаций давления.

Сильфонные преобразователи являются самыми распространенными ПИП с упругим чувствительным элементом, особенно при зондировании и исследованиях колебаний уровня (рис. 3). Они обладают малой жесткостью и позволяют получать большие линейные перемещения в результате малых изменений давления. Связь между перемещениями центра y_c и гидростатическим давлением P для сильфонов при числе гофров у них n , при наружном радиусе R_n , внутреннем $R_{вн}$ и толщине материала гофров h_c определяется выражением

$$y_c = \frac{2nA_p P R_n^4}{E h_c^3},$$

$$A_p = \frac{3(1 - \mu^2)(c^2 - 1 - 4c^2 \ln c)}{16c^4}; \quad c = \frac{R_n}{R_{вн}}. \quad (10)$$

Сильфоны часто используются в механических устройствах для измерения уровня как в серийных, так и в экспериментальных измерительных устройствах. Рабочий диапазон давления у них составляет 10^4 — 10^6 Па, а погрешность измерений 0,5—3 %.

Трубочатые пружины — так называемые трубки Бурдона — представляют собой трубки эллиптического или овального сечения, согнутые по дуге окружности с центральным углом 180—270°. Один конец пружины неподвижен, другой связан с механической регистрирующей системой. Такие С-образные трубки применяются для измерения давления от $3 \cdot 10^4$ до 10^8 Па с погрешностью 0,2—4 %.

Таким образом, мерой значения давления при использовании мембранных преобразователей является упругая деформация, или максимальный прогиб. Рассмотрим несколько наиболее типичных, за исключением механических, методов регистрации размера прогиба мембраны.

Резистивные преобразователи можно подразде-

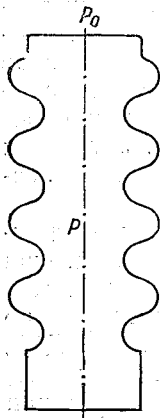


Рис. 3. Сильфонные преобразователи.

лить на проволочные и полупроводниковые тензорезисторы и реостатные преобразователи. Принцип действия проволочных тензорезисторов основан на изменении сопротивления металлических проводников при их деформации. Так как сопротивление проводника R определяется выражением

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (11)$$

(ρ — удельное электрическое сопротивление, l — длина, S — площадь поперечного сечения), то при наличии продольной и поперечной деформации (растяжение и сжатие) изменяются его длина и площадь поперечного сечения, т. е. сопротивление. Металлические тензометры обычно изготавливают из материалов с высоким удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом сопротивления (константан, манганин, нихром и т. д.) в виде проволочной сетки или сетки из узких полосок фольги, наклеиваемой на подложку, или в виде тонких металлических пленок (20—50 мкм), напыляемых на непроводящую подложку, которые в свою очередь приклеивают к упругому элементу, например мембране.

Полупроводниковые тензорезисторы имеют коэффициент тензочувствительности почти на два порядка выше, чем проволочные. Различают продольную, поперечную и сдвиговую тензочувствительности. Характеристики каждой из них зависят от того, каким образом тензопластинка вырезана из кристалла. Обычно делают так, чтобы сдвиговая чувствительность была близка к нулю. Зависимость сопротивления полупроводникового тензорезистора от деформации в направлении продольной оси будет

$$R_\varepsilon = R_0 (1 + k_1 \varepsilon + k_2 \varepsilon^2), \quad (12)$$

где R_0 — сопротивление ненагруженного тензорезистора, k_1 и k_2 — коэффициенты, ε — относительная деформация.

До последнего времени использование полупроводниковых тензорезисторов сдерживалось, несмотря на их повышенную тензочувствительность, из-за недостаточной разработанности методов линеаризации и термокомпенсации. В настоящее время развитие интегральной технологии позволяет наносить на подложку одновременно с тензорезисторами схемы термокомпенсации. У лучших образцов подобных преобразователей суммарная погрешность составляет 0,1—0,5 %.

Реостатные преобразователи отличаются простотой конструкции, используются при больших перемещениях жесткого центра (сильфоны) или некоторой точки (трубки Бурдона). Они представляют собой резистор из высокоомного провода с минимально возможным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), намотанного на цилиндрический каркас с изолированными витками, а ползунок реостата скользит по очищенному от изоляции участку.

Индуктивные преобразователи используют воздействие перемещения чувствительного элемента на один или несколько определяющих параметров магнитной цепи, что вызывает изменение индуктивности. Обычно используются дифференциальные схемы, в которых мембрана располагается между двумя катушками индуктивности, когда изменение размера прогиба одновременно увеличивает индуктивность одной катушки и уменьшает индуктивность другой.

Резонансные преобразователи используют струны, тонкие металлические пластины, цилиндры и пьезокварцевые пластины, в которых резонансная частота колебаний пропорциональна измеряемому давлению. Наибольшее распространение в океанологической практике нашли струнные преобразователи, в которых собственная частота колебаний натянутой струны f соответствует выражению

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{F}{ml}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{E\Delta l}{\rho l^3}}, \quad (13)$$

где F — сила натяжения струны, m — масса, l — длина, Δl — удлинение струны, E — модуль Юнга, ρ — плотность материала струны.

Флуктуации прогиба мембраны вызывают изменение частоты собственных колебаний струны и силы ее натяжения (ее удлинение). Струна изготавливается обычно в виде стальной проволоки или ленты, а ее жесткость, как правило, значительно меньше жесткости мембраны. Принцип работы устройства (рис. 4) следующий. Электрическая система в виде приемника 1 (катушка с сердечником), усилителя 2 и электромагнита 3 создает автоколебания струны на ее резонансной частоте. Любое случайное отклонение струны, обладающей некоторой остаточной намагниченностью, вызывает в приемнике появление электрического импульса, который после усилителя создает на электромагните магнитное поле, притягивающее струну, и процесс повторяется. Таким образом устанавливаются незатухающие механические колебания струны на ее резонансной частоте. Частота же соответствующих электрических колебаний несет информацию о деформации мембраны. Собственная частота струны подобных преобразователей составляет несколько кГц. Погрешность струнных преобразователей равна 1—3 %. Они используются, как правило, для измерения гидростатического давления, в том числе и в измерителях уровня.

Гидростатические измерители уровня можно разделить на две группы: автономные регистраторы уровня, в которых

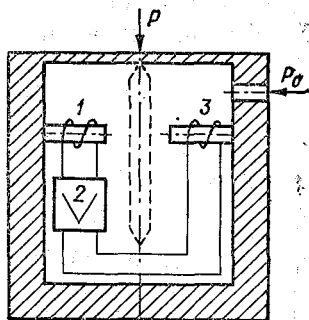


Рис. 4. Струнный преобразователь.

ПИП и регистратор находятся в одном корпусе, устанавливаемом под водой, без связи с берегом; автоматические приборы с жесткой передачей информации от ПИП к регистратору (пневматической, гидравлической или электрической).

Недостатком приборов первого типа является наличие присущих им значительных погрешностей измерения уровня, а также невозможность получения информации непосредственно в момент измерений. Приборы второго типа, несмотря на их существенные недостатки, особенно с пневматическим и гидравлическим каналами связи (ограниченность дальности передач до 200—300 м при пневматическом канале и до 50 м при гидравлическом; возможность закупорки трубопровода и даже замерзания жидкости в нем и т. д.), нашли довольно широкое применение.

В качестве примера приборов первого типа можно привести используемый в России самописец уровня моря типа ГМ-28, чувствительным элементом которого является сильфонный преобразователь. Изменение гидростатического давления вызывает перемещение нижней плоскости сильфона, что в свою очередь через рычажно-шарнирную систему приводит в движение стрелку с пером самописца. Одно из плеч этой системы одновременно является компенсатором температуры и выполнено в виде биметаллической пластины. Изменяя активную длину пластины, можно регулировать термокомпенсатор. Верхняя часть передающего перемещение нижней плоскости сильфона на рычажно-шарнирную систему штока заострена и свободно упирается в приемную пластину рычажной системы, что позволяет, изменяя длину штока, программировать глубину постановки.

Сильфонный преобразователь закрывается защитным кожухом, в нижнюю часть которого ввинчивается пробка с отверстием, служащим своеобразным механическим фильтром высокочастотных колебаний для устранения влияния на запись ветрового волнения. Диаметр отверстия определяется степенью волнения моря и выбирается от 0,5 до 2,0 мм. Запись колебаний уровня производится на диаграммную ленту, закрепленную на барабане.

Примером второго типа СУМ может быть пневматический самописец уровня, используемый Береговой и Геодезической службами США. Он является гидростатическим самописцем уровня с дистанционной пневматической передачей информации. ПИП гидростатического давления мембранного типа с термокомпенсацией неподвижно устанавливается на дно моря ниже минимально возможного уровня и соединен с береговым регистратором воздухопроводом. Прибор также включает в себя баллон со сжатым газом, регулятор давления и аналоговый регистратор. Воздух из баллона с берега по воздухопроводу непрерывно подается к погружному устройству, а его излишки, преодолевая гидростатическое давление над ПИП, выходят в воду. Изменения гидростатического давления, вызванные колебаниями уровня, меняют давление в воздухопроводе и регистрируются на ленте самопишу-

щего манометра, установленного на берегу. Высокочастотные колебания, обусловленные ветровым волнением, частично исключаются введением в систему добавочной емкости с помощью ограничительного клапана между выходным отверстием и преобразователем, регулировки подачи газа, а также за счет большой длины воздухопровода. Автономность работы прибора зависит от объема баллона, диаметра отверстия, скорости выхода излишков воздуха, колебаний уровня и составляет несколько месяцев без смены баллона. Погрешность измерений не превышает 1% от диапазона измерений уровня. Показания прибора привязываются и контролируются по рейке.

В Гидрографической службе Канады, например, используется гидростатический самописец уровня «Оттбюро», ПИП которого представляет собой медный цилиндр высотой 8,9 см и диаметром 12,7 см, состоящий из двух секций, разделенных мембраной из синтетических материалов. Нижняя секция снабжена регулируемым отверстием, а верхняя — подсоединена к капиллярной трубке диаметром 2 мм и длиной до 150 м, по которой колебания гидростатического давления передаются на регистратор. Чувствительным элементом регистратора является сильфонный преобразователь. Запись осуществляется на бумажной ленте. Погрешность измерений не ниже 2% от измеряемого диапазона.



Глава 2. Приборы и методы для измерения температуры воды

2.1. Методы измерения температуры воды

Температура воды Мирового океана — один из основных параметров океанической среды и меняется в очень широких пределах как во времени, так и в пространстве. В высоких широтах в период льдообразования значение температуры поверхности воды, в зависимости от ее солености, может составлять от $-1,8$ до $-1,9^{\circ}\text{C}$, что соответствует нижней границе ее изменчивости. Температура поверхности воды в тропической зоне океана не превышает обычно 30°C , а в таких районах, как Карибское и Красное моря, Персидский залив, она может достигать и 32°C , что соответствует верхней границе ее изменчивости. Температура, являясь термодинамической величиной, характеризует состояние термодинамического равновесия как всей океанической системы, так и ее отдельных частей. Температура определяет направление передачи энергии путем теплообмена. Изменение температуры воды приводит к изменению всех ее частиц, и практически все характеристики воды становятся функцией температуры. Подобные изменения происходят и с любым веществом. Поэтому в качестве термометрических выбираются такие вещества, которые с изменением температуры довольно сильно и линейно меняют свои свойства. Кроме того, для целей термометрии можно использовать и зависи-

мость оптических, электрических, акустических и других характеристик водной среды от изменений температуры. Все это является необходимым условием, так как температуру нельзя измерить непосредственно, и ее значение определяется по изменению какой-либо физической характеристики термометрического вещества.

Основой измерения температуры является *температурная шкала*, построенная по нескольким опорным точкам, неизменность которых подтверждается общими физическими законами. Такими точками могут быть значения температуры кипения или затвердевания чистых веществ. Взяв различные термометрические вещества, можно построить различные шкалы. Наибольшее распространение получила шкала Кельвина — термодинамическая шкала температур, за основу которой принята одна опорная точка — тройная точка воды, со значением температуры 273,16 К. Длина этой шкалы от абсолютного нуля до бесконечно больших температур. В практическом приложении шкалы Кельвина используется Международная практическая температурная шкала. Так, МПТШ 1968 г. опирается на шесть опорных точек, воспроизводимых равновесными состояниями, приписанными определенным значениям температуры, и на эталонные приборы, градуированные при этих значениях температуры. Эталонные приборы необходимы для осуществления интерполяции между температурами опорных точек.

Измерение температуры воды в Мировом океане имеет немало важные особенности. Как уже отмечалось, температура океанической воды подвержена существенным колебаниям как во времени, так и в пространстве. Ее значения могут регистрироваться как неподвижными, так и движущимися измерительными системами. При этом в первом случае значение принимаемого сигнала определяется амплитудой и периодом флуктуаций температуры, а во втором — в основном линейными размерами температурных неоднородностей, хотя при определенных обстоятельствах и здесь оказывает влияние амплитуда и период флуктуаций.

Температуру воды можно измерять различными способами, использующими разнообразные физические принципы и, конечно же, обладающими различными точностными характеристиками. Методы измерения температуры воды подразделяются на контактные и неконтактные. Контактный метод основан на введении в исследуемую среду измерительного зонда, содержащего соответствующий термометрический элемент, в качестве которого используют жидкостные (ртутные) термометры, термоэлектрические термометры (термопары), проволочные и полупроводниковые термометры сопротивления, кварцевые и деформационные (металлические) термометры. В этом случае за температуру среды принимают температуру измерительного зонда. Неконтактные методы основаны на измерении термометрических свойств самой среды, т. е. используется собственное тепловое излучение водной поверх-

ности в инфракрасном и микроволновом диапазонах спектра электромагнитных волн, являющееся функцией термометрических свойств среды.

При использовании аппаратуры для измерения температуры морской воды во всей ее толще термометрический элемент (условимся называть его первичным измерительным преобразователем — ПИП) помещают в специальный кожух, чтобы предохранить его от воздействия агрессивной среды, которой является морская вода, и гидростатического давления. Это увеличивает размеры термоприемника, приводит в какой-то мере к пространственному искажению поля температуры и увеличивает тепловую инерцию, т. е. время запаздывания принятия ПИП температуры окружающей среды. Подобные недостатки становятся в итоге основными источниками погрешностей при исследовании пространственно-временной изменчивости полей температуры в Мировом океане.

Рассмотрим условия теплообмена ПИП с водной средой, определяющие в принципе его *тепловую инерцию*. При флуктуациях температуры водной среды, которые обычно наблюдаются в океане, температура ПИП всегда отстает от температуры воды. Пусть ПИП в защитном корпусе имеет массу m , удельную теплоемкость C , температуру T , площадь поверхности S и помещен в воду с температурой T_0 . Тогда количество тепла dQ , получаемое ПИП за единицу времени t определяется как

$$\frac{dQ}{dt} = dS(T_0 - T). \quad (14)$$

Если в ПИП поле температуры однородно, можно считать, что все это тепло идет на изменение его температуры, т. е.

$$dQ = mcdT. \quad (15)$$

Отсюда

$$mc \frac{dT}{dt} = dS(T_0 - T). \quad (16)$$

Введя обозначение $\tau = mc/dS$, получим

$$\tau = (T_0 - T) \frac{dt}{dT}. \quad (17)$$

Величина τ , имеющая размерность времени, носит название постоянной времени ПИП, а коэффициент тепловой инерции определяется скоростью изменения температуры ПИП при единичной разности температур между ним и средой. Исходя из (17), τ является функцией инерционности ПИП, но следует подчеркнуть, что свое особое влияние на τ оказывает также и скорость обмывающего ПИП потока.

Жидкостные стеклянные термометры получили широкое распространение в силу своей простоты. В них используется зависи-

мость между температурой и объемом термометрической жидкости, заключенной в резервуаре, соединенным жестко связанным с температурной шкалой капилляром. В качестве термометрической жидкости чаще всего применяют не смачивающую стекло чистую и осушенную ртуть, что позволяет получать довольно высокую чувствительность за счет использования капилляров с малым диаметром (около 0,1 мм). Кроме того, ртуть обеспечивает хорошую линейность шкалы. В качестве термометрической жидкости применяются также керосин, толуол, спирт, пентан. Однако они обладают большей тепловой инерцией за счет большей вязкости и худшей теплопроводности. Средний коэффициент объемного теплового расширения β в диапазоне температур 0— T определяют по формуле

$$\beta = \frac{V_T - V_0}{V_0 T}. \quad (18)$$

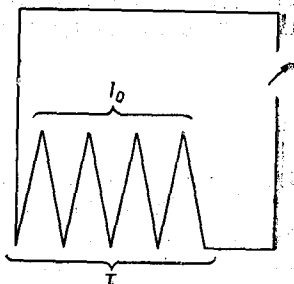
Стекло, используемое для изготовления капилляров термометров, также должно отвечать определенным требованиям. Оно, например, должно обладать минимальным термическим старением. В противном случае это явление может привести к изменению объема резервуара с ртутью. Кроме того, одновременно с изменением объема термометрической жидкости меняется и объем корпуса термометра, т. е. термометр на самом деле регистрирует «видимый» коэффициент расширения, равный разности истинных коэффициентов расширения жидкости и стекла. Так, для ртути коэффициент объемного теплового расширения имеет значение порядка $0,00018^\circ\text{C}^{-1}$, а для стекла $0,00002^\circ\text{C}^{-1}$.

26 *Металлические (деформационные) термометры* чаще всего изготавливают из биметаллических элементов, состоящих из металлов с резко отличающимися коэффициентами теплового расширения. Так, например, для изготовления термометров можно использовать материалы с большим коэффициентом расширения — латунь, никель, сталь и т. д., и с малым коэффициентом — инвар. Биметаллические термометры изготавливают обычно из двух прочно соединенных, примерно равных по толщине пластин, пружин или диафрагм. С изменением температуры, из-за различия коэффициентов расширения, эти элементы изгибаются (деформируются) в сторону слоя с меньшим тепловым расширением и приводят в действие механическую или электрическую систему регистрации. Благодаря своей простоте, компактности и дешевизне, несмотря на невысокую точность, биметаллические термометры широко используются при измерении температуры в жидкостях и газах.

28 *Термоэлектрические термометры* основаны на использовании открытого в 1821 г. явления термоэлектричества (эффект Зеебека). Если два проводника из разных материалов (A и B) соединены концами в замкнутый контур и места соединений находятся при разных температурах, то в контуре возникает электрический ток. Оба соединенных проводника, называемые термоэлектродами,

Рис. 5. Термопары.

образуют термопару. Одно из мест спайки проводников, помещенное в среду с измеряемой температурой, называется рабочим концом термопары, а второе, находящееся при постоянной известной температуре, называется свободным концом термопары. Термоэлектродвижущая сила (ТЭДС), возникающая в цепи термопары, зависит от температуры рабочего (T) и свободного (T_0) концов, а также от свойств материала термоэлектродов.



Объяснение термоэлектрического эффекта связано с представлением о наличии в металлах свободных электронов. Количество электронов в единице объема материала зависит от состава вещества и его температуры. Если существует электрический контакт между двумя материалами с различными концентрациями свободных электронов, то возникает диффузия из материала A в материал B . Это в свою очередь способствует появлению разности потенциалов между ними, препятствующей диффузии. А при небольшой разности температур между рабочим и свободным спаями разность потенциалов будет пропорциональна возникающей ТЭДС (E) и коэффициенту термоэлектрической способности термопары (α)

$$E = U_A - U_B = \alpha (T - T_0). \quad (19)$$

Коэффициент α постоянен только при небольшом перепаде температур, так как он сам в общем случае зависит от температуры.

В качестве материала для измерительных термопар выбирают материалы с постоянными α в достаточно широком диапазоне температур. В качестве примера наиболее распространенных термопар можно привести: платина—платинородий; железо—константан; медь—константан и т. д. Для увеличения чувствительности в малом диапазоне температур несколько термопар соединяют последовательно (рис. 5) и получают термобатарею. Ток, регистрируемый при этом измерительным прибором, будет

$$I = \frac{n\alpha(T - T_0)}{R_n + nR_{тп} + r}, \quad (20)$$

где n — число термопар; R_n , $R_{тп}$, r — сопротивление прибора, термопары и подводящих проводов соответственно. ТЭДС батареи равна сумме ТЭДС пар, но ее тепловая инерционность больше, чем у отдельной термопары.

Термометры сопротивления используют эффект зависимости электрического сопротивления различных веществ, металлов и полупроводников от их температуры. Эта зависимость характеризуется температурным коэффициентом сопротивления (ТКС),

определяемым как относительное приращение электрического сопротивления вещества при изменении его температуры на единицу:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}, \quad (21)$$

где R — сопротивление вещества при температуре T .

Термосопротивления используют в качестве как образцовых, так и рабочих приборов самого различного назначения. В качестве материалов для термосопротивлений пригодны только те, физические и химические свойства которых не изменяются с течением времени в исследуемом диапазоне температур. Сопротивление такого материала должно хорошо воспроизводиться и с изменением температуры монотонно и линейно возрастать или уменьшаться. Кроме того, внешние воздействия (давление, влажность, деформация, коррозия) не должны оказывать влияние на сопротивление термометра. Для получения хорошей временной стабильности отношения входного и выходного сигналов термосопротивления должны быть хорошо стабилизированы (искусственно состарены). ТКС, так же как и удельное сопротивление ПИП, должны быть возможно больше, чтобы сам термopроводник занимал возможно меньший объем.

Широкое применение в океанологической практике нашли *проволочные* (ПТС) и *полупроводниковые* (ППТС) термометры сопротивления. ПТС, как правило, представляют собой спираль, намотанную на жесткое основание и помещенную в защитный корпус, чаще всего в виде трубки. В качестве термометрического элемента используются платина, медь, а в последнее время никель и вольфрам. Характеристики некоторых термометрических материалов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Термометрические характеристики материалов

Материал	Интервал температур, К	ТКС, К ⁻¹ (средний для интервала 0—100 °С)	Коэффициент температурности (для 0 °С), Вт/(м·К)	Удельное электро-сопротивление (для 20 °С), (Ом·м)·10 ⁶	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Платина	13—1600	3,94·10 ⁻³	—	0,0866	136
Медь (99,9 %)	13—700	4,26·10 ⁻³	388	0,0168	377
Никель (97—99 %)	210—600	6,34·10 ⁻³	58	0,138	461
Вольфрам	До 1800	4,4·10 ⁻³	—	—	—
Железо	До 450	6,57·10 ⁻³	—	—	—
Золото	—	3,77·10 ⁻³	—	0,0237	134

Температурный коэффициент сопротивления для большинства металлов в принципе постоянен в большом диапазоне температур, следовательно, проинтегрировав выражение (21), получим

$$R = R_0^{a\Delta T}, \quad (22)$$

где $\Delta T = T - T_0$ — интервал изменения температур. Разложив показательную функцию в ряд, ограничившись двумя первыми членами разложения, для ряда металлов, например платины и меди, при $T_0 = 0^\circ\text{C}$ с достаточной степенью точности можно записать

$$R = R_0(1 + \alpha T), \quad (23)$$

где R_0 — сопротивление при $T = 0^\circ\text{C}$.

Прочный корпус ПИП температуры изготавливают из стали, а для уменьшения тепловой инерции иногда используют золото. В целях увеличения теплопроводности внутреннее пространство между самим ПИП и его корпусом заполняют трансформаторным или силиконовым маслом или специальной пастой высокой теплопроводности.

Проволочные термометры сопротивления отличаются простотой не только изготовления, но и схемного решения вторичного преобразования при довольно высокой точности и разрешающей способности. Лучшим материалом для ПТС ввиду высокой стабильности, воспроизводимости характеристик, хорошей линейной зависимости сопротивления от температуры, высокой коррозионной стойкости и большого удельного сопротивления является платина высокой чистоты, несмотря на ее высокую стоимость. Платиновый ПТС принят в качестве эталонного прибора для воспроизведения Международной практической температурной шкалы. Платиновый стандартный ПТС обеспечивает разрешение порядка $0,001^\circ\text{C}$, погрешность около $0,01^\circ\text{C}$, обладает постоянной времени до 0,5 с, а нелинейность статической характеристики не превышает 0,55 % в рабочем для океана диапазоне температур. Для понижения постоянной времени чувствительный элемент может быть изготовлен из тонкой (диаметром около 0,02 мм) изолированной медной проволоки, сотканой на основе капроновой нити в виде тонкой ленты. Такой ПИП обладает постоянной времени порядка 0,02 с и достигает в рабочем диапазоне температур стабильности показаний $\pm (0,01 - 0,05)^\circ\text{C}$. Никелевые ПТС обладают более высокой чувствительностью по сравнению с платиновыми и медными, но очень трудно и сложно получить никелевую проволоку высокой чистоты, что сказывается на стабильности во времени.

К недостаткам ПТС можно отнести малую крутизну преобразования, обусловленную сравнительно небольшой величиной α для металлов (порядка $10^{-3} \text{ град}^{-1}$) и малым собственным сопротивлением, что усложняет передачу информации от ПИП на измерительные схемы.

Полупроводниковые термометры сопротивления (ППТС) имеют значительно большую крутизну преобразования, т. е. более высокий ТКС (до 6—8 % на 1°C) и большое удельное сопротивление. Все это позволяет изготовить термометры с высокой чувствительностью, пригодные для измерения малых градиентов температуры, при очень малых размерах; облегчает конструирование телеизмерительных систем и регистраторов, позволяя, например, использовать их непосредственно в качестве задающих резисторов в измерительных генераторах. Измерение температуры путем преобразования сопротивления ППТС в частоту с помощью RC-генератора обеспечивает высокую помехозащищенность, удобство передачи, регистрации, анализа результатов измерений и весьма перспективно.

В последнее время широкое распространение получили полупроводниковые термосопротивления (термисторы), выполненные на основе германия, кремния, оксидов металлов и т. д. Малая тепловая инерция ППТС (до 20 мс) и высокое разрешение (порядка $5 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}$) позволяют использовать их для измерения флуктуаций температуры в море при исследовании тонкой структуры.

Зависимость температурного коэффициента термистора α_T от температуры можно представить в виде

$$\alpha_T = \frac{B}{T^2}, \quad (24)$$

где $B = \Delta E / 2K$ — const для каждого конкретного полупроводника, E — энергия активации, K — постоянная Больцмана. Зависимость сопротивления термистора R_T от температуры определяется выражением

$$R_T = AT^b e^{B/T}, \quad (25)$$

где B и A — const. Обычно при практических расчетах в небольших интервалах температур (20—30°C) величиной T^b пренебрегают, так как $b \ll 1$. Тогда выражение (25) примет вид, аналогичный (22) для ПТС, т. е.

$$R_T = Ae^{B/T}. \quad (26)$$

Значения постоянных коэффициентов здесь можно определить путем измерения сопротивлений при двух известных значениях температуры.

К недостаткам ППТС следует в первую очередь отнести нелинейность их температурной характеристики (их чувствительность меняется на различных участках диапазона измерений) и временной дрейф (изменение характеристик с течением времени). Все это заставляет использовать ППТС в случае допустимой невысокой точности при необходимых высоком разрешении и малой постоянной времени. Правда, современные полупроводниковые термисторы не уступают платиновым ПТС. Кроме того, можно ис-

пользовать узкий диапазон измерений, где нелинейность была бы ниже допустимой погрешности, или искусственно линеаризовать термисторную характеристику с помощью различных существующих в настоящее время методов.

Уменьшение тепловой инерции как ПТС, так и ППТС можно достичь, если их чувствительные элементы изготовить в виде пленки. Обычно пленку напыляют на кварцевый или керамический каркас. Постоянная времени таких пленочных термометров может достигать значений порядка 10^{-7} с. При использовании подобных термометров в такой агрессивной среде, как морская вода, следует применять защиту чувствительных элементов в виде кварцевой пленки или тонкой пленки различных лаков, напыляемых поверх металла.

32
Термочувствительные кварцевые резонаторы, применяемые в виде термометров, используют температурную зависимость упругой постоянной пьезокристаллов, в основном кварца, имеют высокую добротность, стабильность параметров (максимальный дрейф после начального периода старения кристалла имеет значение порядка 10^{-3} К в месяц), обладают высоким разрешением (10^{-4} — 10^{-6} К) с абсолютной погрешностью в рабочем диапазоне температур до $0,02^\circ\text{C}$. Кварцевые термометры пригодны для эксплуатации при наличии ударов и вибраций (10 — 1000 g) и постоянную времени 1 — 5 с. Другим их важным преимуществом является то, что их чувствительный элемент — термочувствительный срез пьезокристалла — является частотно-избирательным элементом с высокой добротностью и стабильностью и может быть использован непосредственно в качестве частотно-задающего элемента в системах телеизмерений с частотной модуляцией.

Кристалл кварца (SiO_2) представляет собой шестигранную призму, ограниченную двумя пирамидами. В кристалле кварца различают (рис. 6) взаимно перпендикулярные оптическую ось Z , три электрические оси X (проходят через вершины шестиугольника поперечного сечения) и три механические оси Y (проходят перпендикулярно сторонам шестиугольника поперечного сечения). Кристалл кварца анизотропен и его свойства в направлении различных осей неодинаковы, поэтому и свойства кварцевых пластин зависят от угла среза. Для обозначения углов среза обычно используют систему, предложенную Институтом радиоинженеров США (рис. 6б). Выбор среза осуществляется в зависимости от желаемых свойств кварцевого резонатора — его температурных и частотных характеристик. В качестве чувствительных элементов используют срезы с большим температурным коэффициентом частоты (ТКЧ), чаще это простые срезы и прежде всего Y -срез, когда плоскость пластинки параллельна оси X . Частота собственных колебаний кварцевой пластинки связана с ее размерами, плотностными и механическими свойствами кристалла, поэтому ТКЧ связан с температурными зависимостями этих величин.

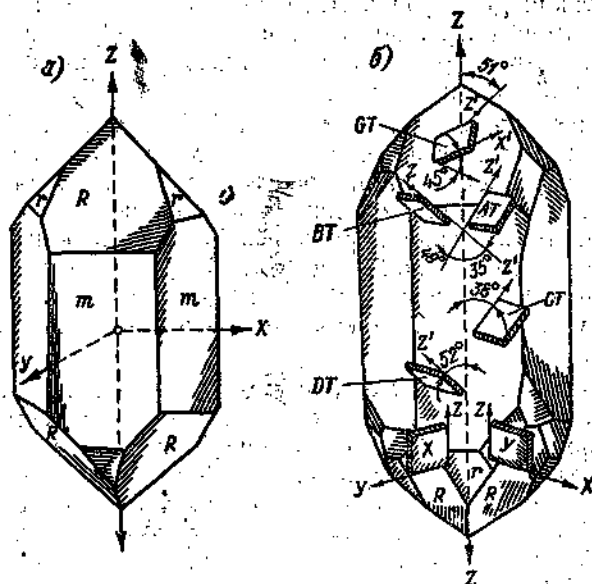


Рис. 6. Кристалл кварца.

В диапазоне температур от -50 до $+250^\circ\text{C}$ собственная частота пьезокристалла хорошо описывается полиномом третьего порядка

$$f(T) = f_0(1 + AT + BT^2 + CT^3), \quad (27)$$

где $f(T)$ — частота при $T^\circ\text{C}$, f_0 — частота при $T_0^\circ\text{C}$; A , B , C — const. Выбрав соответствующий срез кристалла, можно получить значения B и C , близкие к нулю, т. е. линейную зависимость выходной частоты от температуры. В распространенных кварцевых термометрах используется Y-срез, при этом чувствительность термометров, например, модели 2801A (США) составляет $0,0001^\circ\text{C}$ в диапазоне от -80 до 250°C . Кристаллы чувствительных элементов могут иметь форму, например, плосковыпуклой линзы диаметром 8 мм с радиусом кривизны 100 м и толщиной линзы в центральной части около 0,35 мм. Их размещают, как правило, в металлическом корпусе, подобном корпусу стандартных транзисторов, заполняемом гелием при давлении 0,1–1 атм. Для обеспечения виброустойчивости кристаллы крепят на пружинящих контактах.

Отрицательными характеристиками кварцевых ПИИ температуры являются сравнительно большое значение постоянной времени и определенная сложность схем вторичного преобразования. Для создания термометров особенно удобным является использование двух кварцевых генераторов, один из которых с термочувствительным кварцем, а другой — с опорным, термостабилизиро-

ванным, когда срез кристалла не чувствителен к изменению температуры. Выходная частота с обоих генераторов поступает на смеситель, с которого и снимается разностная частота. В случае, когда частота чувствительного кварца при 0°C совпадает с частотой опорного, при измерении частоты на выходе смесителя мы получаем в цифровом виде непосредственное значение температуры в градусах Цельсия. Собственная резонансная частота кварцевых ПИП температуры колеблется в пределах от 3 до 30 мГц, а изменение частоты при изменении температуры на 1°C составляет 100—200 Гц.

Кварцевый термометр следует использовать для измерения с высокими точностью и разрешающей способностью постоянных или медленно меняющихся (частоты менее 0,1 Гц) процессов, например при исследовании длиннопериодных флуктуаций температуры, особенно при проведении длительных автономных наблюдений.

Характеристики наиболее широко используемых термодатчиков сведены в табл. 2.

31
Неконтактные методы измерения температуры морской воды основаны на измерении собственного теплового излучения водной поверхности в инфракрасном и микроволновом (СВЧ) спектрах. Несмотря на преимущества (измерения могут проводиться практически в любую погоду и в любое время суток), использование СВЧ-диапазона для определения температуры поверхности моря (ТПМ) затрудняется относительно низкой излучательной способностью воды в этом диапазоне и существенной зависимостью от состояния поверхности моря (волнение различных масштабов, пена, брызги и т. д.). Анализ имеющихся в настоящее время ре-

Таблица 2

Характеристики термодатчиков

Параметр	Типы датчиков			
	термопара	термометр сопротивления	термистор	кварцевый преобразователь
Стабильность	0,5—1 $^{\circ}\text{C}$, дрейф в течение года	0,1 %, дрейф в течение 5 лет	0,1—2,5 $^{\circ}\text{C}$, дрейф в течение года	0,01 $^{\circ}\text{C}$, за месяц при температуре 0°C
Чувствительность	10—50 мкВ/ $^{\circ}\text{C}$	0,2—10 Ом/ $^{\circ}\text{C}$	100—1000 Ом/ $^{\circ}\text{C}$	1000 Гц/ $^{\circ}\text{C}$
Взаимозаменяемость, %	$\pm 0,75$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	—
Рассеиваемая мощность, Вт	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$0,1-40 \cdot 10^{-3}$	$0,05-81 \cdot 10^{-1}$	$10 \cdot 10^{-6}$
Линейность, %	0,1	0,55	5—20	$\ll 0,05$

зультатов спутниковых экспериментов показывает, что получение оценок ТПМ в этом диапазоне с погрешностью менее $1,5-2^{\circ}\text{C}$ в ближайшем будущем маловероятно. В ИК-диапазоне на измерения ТПМ сильное влияние оказывает атмосфера (так как при наличии значительной облачности измерение ТПМ практически исключается), что вызывает необходимость корректного его учета или исключения.

Влияние атмосферы проявляется в молекулярном и аэрозольном рассеянии ИК-излучения облачностью, селективным и неселективным его поглощением в основном атмосферным водяным паром, углекислым газом и озоном, а также поглощение ИК-излучения кристаллами льда, располагающимися вблизи тропопаузы. Если влияние облачности в ИК-измерениях избежать практически невозможно (результаты измерений ТПМ при наличии облачности должны каким-либо образом выделяться из общего массива данных), то рассеяние водяным паром, CO_2 , O_3 и поглощение кристаллами льда можно в значительной мере уменьшить. Для этого, во-первых, измерения в ИК-диапазоне проводят в так называемых окнах прозрачности атмосферы, характеризующихся почти полным пропусканием излучения, а, во-вторых, использованием многоканальных ИК-радиометров, обладающих техническими характеристиками, достигнутыми в настоящее время. Кроме того, для оценки ТПМ можно воспользоваться методами, в которых осуществляются эмпирические связи температуры воды с рядом измеряемых величин. Это может быть реализовано путем использования данных прямых одновременных подспутниковых измерений гидрометеорологических параметров с последующей статистической обработкой результатов наблюдений с помощью регрессионного, корреляционного анализов и др. Использование подобных методов позволило достигнуть погрешности оценки ТПМ в пределах $0,5-1,0^{\circ}\text{C}$. Применение ИК-радиометров с самолетов на небольших высотах позволяет достигнуть еще большей точности измерения ТПМ.

Анализируя положительные и отрицательные стороны существующих дистанционных методов измерений ТПМ, можно прийти к выводу, что измерения температуры воды наиболее целесообразно проводить комплексно, с использованием как подспутниковых прямых измерений, так и ИК- и СВЧ-методов. В этом случае прямые подспутниковые измерения используются как калибровочная база для ИК-измерений, проводимых в условиях безоблачной атмосферы. Результаты этих измерений (точность которых принципиально достигается более высокой, чем при СВЧ-радиометрических измерениях) будут уже калибровочной основой для всепогодного метода определения ТПМ — метода СВЧ-радиометрии. Можно надеяться, что реализация такого подхода позволит повысить точность определения температуры поверхности океана.

Таким образом, существует большое количество различных возможностей измерения температуры морской воды. По принци-

пу и месту проведения измерений все измерители температуры можно подразделить на глубоководные измерители, измерители температуры поверхности моря (ТНМ) и измерители температуры поверхностного слоя моря (ТПСМ).

Под температурой поверхностного слоя понимается температура верхнего слоя морской воды толщиной не более 1 м. Вместе измерения, принимаемая за среднюю в этом слое и условно распространяемая на ближайшую акваторию. Температуру поверхностного слоя следует отличать от температуры поверхности моря, под которой понимается температура тонкого поверхностного слоя морской воды толщиной от нескольких микрон до 1—2 см. Температура поверхности моря может отличаться от температуры поверхностного слоя на 1—3°C. Вследствие испарения она обычно ниже температуры поверхностного слоя.

2.2. Измерители температуры морской воды

В настоящее время в океанологической практике для измерения ТПМ используются в основном лишь неконтактные методы (ИК- и СВЧ-радиометры). Так как наибольшее применение нашли ИК-радиометры, остановимся более подробно на их принципе действия. Они используют, как известно, естественное (тепловое) излучение водной поверхности.

При рассмотрении теплового излучения фундаментальной основой является понятие об абсолютно черном теле (АЧТ) — теле, поглощающем все падающее на него излучение любых длин волн. Спектральное распределение излучения АЧТ описывается законом Планка

$$W_{\lambda} = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 e^{hc/\lambda K T}} = \frac{c_1}{\lambda^5 e^{c_2/\lambda T}} \quad (28)$$

где: W_{λ} — спектральная плотность излучения, Вт/(см²·мкм); λ — длина волны, мкм; h — постоянная Планка, $(6,6256 \pm 0,0005) \times 10^{-34}$ Вт·с; T — абсолютная температура, К; c — скорость света, $(2,997925 \pm 0,000003) \cdot 10^{10}$ см/с; $c_1 = 2\pi h c^2 = (8,7415 \pm 0,00019) \times 10^8$ мкм⁵·К; K — постоянная Больцмана, $(1,38054 \pm 0,00018) \times 10^{-23}$ Вт·с/К.

Анализ выражения (28) позволяет сделать вывод, что лучистый поток, излучаемый АЧТ, быстро возрастает с ростом температуры. Выражение этого возрастания можно получить, проинтегрировав уравнение Планка:

$$W_{\lambda} = \int_0^{\infty} d\lambda = \frac{2\pi^5 K^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4 \quad (29)$$

Это соотношение называется законом Стефана — Больцмана, а $\sigma = (5,6697 \pm 0,0029) \cdot 10^{-12}$ Вт/(см²·К⁴) — постоянная Стефана —

Больцмана. Продифференцировав уравнение Планка, получим закон смещения Вина

$$\lambda_{\max} T = a, \quad (30)$$

где $\lambda_{\max}$ — длина волны, на которой наблюдается максимум распределения спектральной плотности излучения при данной температуре; $a = 2897,8 \pm 0,4$ мкм·К.

Рассчитав с помощью (28) излучение АЧТ при температуре от 240 до 300 К, температурах экстремальных состояний океанологических объектов ($-33...27^\circ\text{C}$), получим, что максимальные плотности излучения будут лежать в пределах длин волн 9,5—12,1 мкм и иметь значения $1,03 \cdot 10^{-3}$ и $3,14 \cdot 10^{-3}$ Вт/(см²·мкм). Свыше 99 % плотности излучения приходится на спектральную область 4—40 мкм, а в диапазоне 8—13 мкм сосредоточено 35 % всей плотности излучения.

Формирование теплового излучения моря происходит в тонком поверхностном слое, толщина которого в диапазоне 8—14 мкм составляет около 0,02 мкм. Термический режим этого слоя отличается от режима нижележащих слоев и определяется эффективным ИК-излучением поверхности моря (разностью между длинноволновыми излучениями поверхности моря и атмосферы), потерями тепла на испарение, теплообменом с атмосферой и нижележащими слоями воды (в меньшей степени). Разность ТПМ и воды на глубине около 0,5 м может составлять от десятых долей градуса Цельсия до нескольких градусов и может подвергаться суточным колебаниям и по величине, и по знаку.

При прохождении от водной поверхности до приемника измерительного прибора ИК-излучение подвергается поглощению и рассеянию газами атмосферы, жидкими и твердыми частицами, находящимися во взвешенном состоянии. Основными газами атмосферы, поглощающими ИК-радиацию, являются водяной пар, углекислый газ и озон. При наличии осадков и облачности измерение инфракрасной радиации проводить также невозможно. Поглощение ИК-излучения указанными газами атмосферы является избирательным и селективным. Имеются участки ИК-диапазона, где спектральный коэффициент пропускания T_λ практически равен нулю и, наоборот, где он близок к единице. Первые из этих участков называются полосами поглощения, а вторые, где атмосфера прозрачна для ИК-излучения, называются окнами прозрачности атмосферы.

Инфракрасные измерительные приборы регистрируют спектральную плотность излучения и носят название инфракрасных радиометров. Принцип получения данных о ТПО по результатам измерения спектральной плотности излучения основывается на использовании законов теплового излучения. Простая и очевидная связь температуры излучающей поверхности и интегральной спект-

ральной плотности W_{T_0} вытекает из использования законов Стефана — Больцмана, Ламберта, Кирхгофа

$$W_{T_0} = \frac{\varepsilon \sigma}{\pi} T_0^4, \quad (31)$$

где ε — интегральная излучательная способность водной поверхности, σ — постоянная излучения, T_0 — термодинамическая температура излучающей поверхности.

Поэтому, измерив W_{T_0} и зная ε , легко вычислить искомую величину T_0 . Как известно, не существует способов непосредственного измерения лучистых потоков. Для их количественного определения применяются преобразователи лучистой энергии в другие виды энергии, чаще всего в электрический сигнал. Этими преобразователями, называемыми приемниками излучения, могут быть термоэлементы, болометры, фотоэлементы. Термоэлементы представляют собою спай различных проводников или полупроводников. Болометры представляют собой металлические или полупроводниковые термометры сопротивления с зачерненной поверхностью. Фотоэлементы являются приборами, реализующими фотоэлектрический эффект. Блок-схема ИК-радиометра, типичная для большинства систем подобного рода, приведена на рис. 7.

Радиационный поток от водной поверхности попадает в ИК-радиометр через входное отверстие, закрытое светофильтром 1, прозрачным для ИК-излучения в пределах рабочего интервала длин волн $\Delta\lambda$, и фокусируется зеркальным объективом 2 на приемник излучения 4. Электрический сигнал от приемника излучения, пропорциональный радиационному потоку, подается в блок усиления и преобразования 5, после чего попадает на регистратор 6. Для повышения точности ИК-радиометр снабжается опорным источником для сравнения возникающего сигнала с сигналом от водной поверхности. Для этого используется макет АЧТ 9 в виде, например, полости конической формы, зачерненной внутри. Температура макета АЧТ регулируется и измеряется термосопротив-

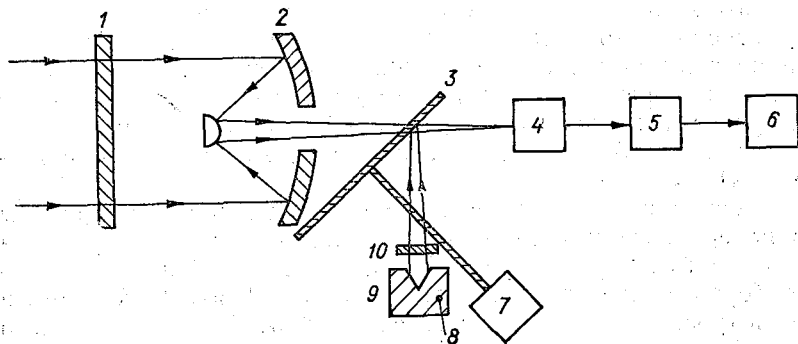


Рис. 7. Блок-схема ИК-радиометра.

лением 8. Излучение от водной поверхности и от опорного источника попеременно с помощью модулятора 3 направляется на приемник излучения 4. В качестве подобного модулятора может использоваться зеркальный диск с прорезями, вращаемый электродвигателем 7. Перед макетом АЧТ на пути потока излучения ставится светофильтр 10, идентичный светофильтру 1.

Существует много конструкций ИК-радиометров, различающихся использованием различных типов приемников излучения, расположением модулятора, типом применяемых объективов (линзовые или зеркальные), размещением макета АЧТ и т. п. Некоторые модификации, использующие в качестве приемников излучения термоэлементы, могут совсем не иметь модуляторов и опорных источников. В этом случае один спай термоэлемента термостатируется. Кроме того, для получения температурного поля поверхности океана могут использоваться сканирующие ИК-радиометры. Они позволяют освещать широкую полосу на водной поверхности по обе стороны от маршрута полета летательного аппарата и получать непосредственно ее тепловые изображения.

Проведенные в США исследования ИК-радиометров, установленных на ИСЗ, показали, что двухканальный ИК-радиометр компенсирует влияние на измерение температуры водяного пара, что исключает необходимость измерения профилей температуры и пара в атмосфере. А при использовании четырехканального ИК-радиометра возможно уменьшение погрешности измерения температуры поверхности моря при отсутствии облачности за счет осуществления коррекции и на поглощение ИК-излучения слоем кристаллов льда, расположенных вблизи тропопаузы.

Измерение температуры поверхностного слоя воды (глубина до 1 м) может производиться различными типами измерителей. Остановимся на некоторых из них.

Поверхностный термометр в специальной оправе, выпускаемый, например, фирмами «Гидро-биос» (ФРГ) и «Огава Сейки» (Япония). Оправа служит для увеличения постоянной времени термометра после его подъема на палубу. Для этого нижняя часть оправы изготавливается в виде стаканчика, заполняемого водой из точки измерения, это сводит к минимуму искажение результатов из-за изменения температуры окружающей среды. Кроме того, оправа предохраняет хрупкую конструкцию ртутного стеклянного термометра от механических повреждений. Термометр данной конструкции может работать в диапазоне от 0 до 35 или 50 °C с точностью $\pm 0,1$ или $\pm 0,5$ °C.

Для измерения пространственного распределения температуры воды в поверхностном и приповерхностном слоях на ходу судна используются буксируемые устройства. Простейшим из буксируемых приборов является термометр сопротивления, буксируемый на кабель-тросе в поверхностном слое воды. Примером такого типа устройств может служить *буксируемая система ВМС США*. ПИП температуры воды данного устройства в виде платинового

термометра сопротивления в стальном корпусе с небольшим вертикальным стабилизатором для ориентации по потоку с диапазоном измерений $-5...30^{\circ}\text{C}$ и погрешностью $\pm 0,015^{\circ}\text{C}$ вмонтирован в кабель-трос. Выдержка системы на рабочем горизонте осуществляется установленным на конце кабель-троса V-образным снарядом фирмы Брайнзон. Система может буксироваться со скоростью до 12 узлов, а рабочая глубина определяется по длине вытравленного кабеля. Одной из модификаций данной системы является устройство, в котором V-образный углубитель фирмы Брайнзон служит одновременно и контейнером для измерительной аппаратуры. ПИП температуры — прецизионный термистор с диапазоном измерений $-2...30^{\circ}\text{C}$ и точностью $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$. ПИП гидростатического давления потенциометрического типа с диапазоном измерений 0—150 м. Точность удержания на горизонте при соответствующей длине вытравленного троса и скорости хода около 3 м.

Температуру воды на различных горизонтах в толще воды позволяют измерять *глубоководные опрокидывающиеся термометры* (ТГ), выпускаемые многими фирмами, например фирмами «Огава Сейки» (Япония) и «Гидро-биос» (ФРГ). ТГ состоят из основного и вспомогательного термометров, заключенных в общую стеклянную оболочку, предназначенную для предохранения термометров от внешнего давления.

Основной термометр, служащий для измерения температуры воды на горизонте наблюдений, состоит из резервуара с ртутью и прикрепленного к нему толстостенного капилляра с нанесенной на нем шкалой. Пространство между резервуаром и стеклянной оболочкой для увеличения теплопроводности заполнено ртутью, отделенной от остальной части термометра пробкой, служащей одновременно и для крепления термометра. На некотором расстоянии от резервуара капилляр имеет сужение и специальное ответвление (глухой отросток), предназначенные для обрыва ртути при опрокидывании ТГ и фиксации определенного ее объема, соответствующего измеренной температуре. Вслед за отростком капиллярная трубка завернута петлей для приема излишка ртути. С противоположной стороны капилляр заканчивается приемником, который при опрокидывании ТГ заполняется полностью. Объем приемника и капилляра до точки нуля для каждого термометра постоянен, выражается в градусах и обозначается V_0 или Vol.

Вспомогательный термометр, смонтированный в опрокинутом положении относительно основного, служит для измерения температуры внутри стеклянного баллона в момент производства отсчета, что позволяет внести поправку в показания основного термометра на изменение температуры окружающей среды (редукционная поправка).

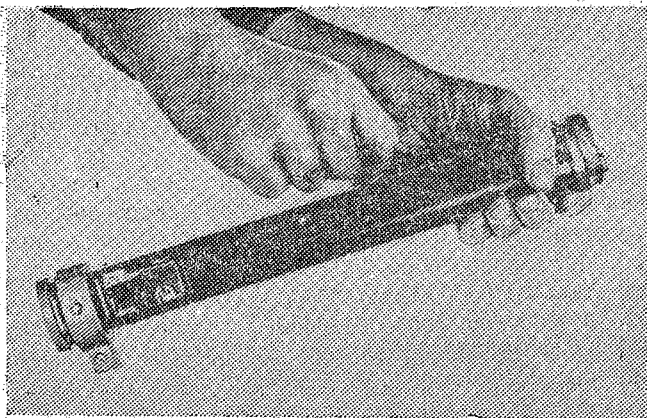


Рис. 8. «Мини» измеритель температуры модели SD-5.

Фирмы выпускают ТГ с различными шкалами от $-2...8^{\circ}\text{C}$ до $-2...32^{\circ}\text{C}$ с погрешностью измерений соответственно от $\pm 0,05$ до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Можно отметить «Мини» измеритель температуры модели SD-5 фирмы «Маркдан» (Дания), позволяющий производить регистрацию температуры воды как в поверхностном слое, так и на глубинах до 600 м. Этот прибор (рис. 8) массой 0,8 кг состоит из прочного корпуса (диаметр 50 мм и длина 250 мм) и узла электроники. Последний включает в себя ПИП температуры, блок преобразования, цепь электронного таймера, дисплей на жидких кристаллах и блок питания (4 щелочных элемента типа AA).

При подготовке прибора к работе переключатель программирования его электронной части устанавливается на определенное время срабатывания (от 0 до 9 мин через 1 мин), достаточное для опускания устройства на заданный горизонт. Отсчет времени начинается после того, как к положению «Старт» на внешней стороне корпуса прибора на несколько секунд прислоняют постоянный магнит. После этого прибор крепится на тросе и опускается на заранее выбранный горизонт, где через запрограммированное время осуществляется одиночное измерение температуры, результаты которого откладываются в память. Затем, в любое удобное время, прибор поднимается на борт судна. Значение температуры в $^{\circ}\text{C}$ высвечивается на дисплее после поднесения постоянного магнита к позиции «READ» на внешней стороне корпуса. Точность регистрации $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Информация сохраняется в памяти прибора до проведения следующего измерения. Операцию «READ» можно повторять сколько угодно раз.

В настоящее время в океанологической практике используется большое количество различного типа термобатиграфов, позволяю-

щих получать оперативную операцию о распределении температуры воды по глубине в дрейфе или на ходу судна. Существуют механические и электронные термобатизонды. Следует отметить, что механические термобатиграфы обладают значительными погрешностями, малым разрешением и несовершенной формой регистрации. Современные автоматизированные электротермобатизонды позволяют получать информацию в виде, удобном для ввода в ЭВМ. Связь бортового блока с зондирующим устройством осуществляется по многожильному или одножильному кабелю-тросу, гидроакустическому каналу или радиоканалу. Существуют также полностью автономные зонды, снабженные внутренним регистратором. Рассмотрим более подробно некоторые, наиболее широко используемые термобатизонды. Технические характеристики более широкого круга подобных систем приведены в табл. 3.

К механическим термобатизондам относится *Батитермограф*, выпускаемый многими фирмами, в том числе «Гидро-биос» (ФРГ), «Браун» (Великобритания), «Маркдан» (Дания), «Огава Сейки» модель OSK 3259 (Япония). Все они в какой-то мере отличаются глубиной погружения, но конструкция их практически одинакова. Более подробно остановимся на устройстве батитермографа фирмы «Гидро-биос». Прибор предназначен для работы на глубинах до 275 м, измеряет температуру в диапазоне $-1...35^{\circ}\text{C}$ с точностью $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ и представляет собой цилиндрический корпус с утяжеленной носовой частью, к которой крепятся вертлюг и скоба для подсоединения к тросу, и стабилизаторами, укрепленными к кормовой части корпуса (рис. 9).

Первичный измерительный преобразователь температуры представляет собой температурно-компенсированную трубку Бурдона в виде капилляра длиной около 14 м, наполненного ксиленом. Капиллярная трубка намотана на гексагональную основу, расположенную в хвостовой части прибора. Один конец трубки закреплен неподвижно, а другой заканчивается пером. ПИП гидростатического давления выполнен в виде набора пустых мембранных коробок (сильфоны), один конец которых закреплен неподвижно, а другой — с прикрепленным к нему держателем металлизированной стеклянной пластинки, предназначенной для записи получаемой информации о температуре и глубине, имеет степень свободы при сокращении длины сильфона под воздействием изменяющегося гидростатического давления.

Прибор используется в зондирующем варианте на ходу судна, с судна, лежащего в дрейфе или стоящего на якоре. При закрытии крышки батитермографа перо, прикрепленное к капиллярной трубке, входит в соприкосновение со стеклянной металлизированной пластиной, укрепленной в держателе. Во время опускания батитермографа гидростатическое давление вокруг него изменяется, что вызывает сокращение сильфона и соответственно движение пластинки. При этом одновременно наблюдается изменение температуры воды, что в свою очередь вызывает перемеще-

Основные технические характеристики

Изготовитель и тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерения	Погреш- ность	Чувст- витель- ность	Посто- янная пре- дела
-------------------------------	------------------------	-----------------------	------------------	----------------------------	---------------------------------

«Морская акустика» Модель SVPT-200	Температура, °C	0—40	±0,25 %		
	Давление, атм.	0—640	±0,5 %		
«Сиплика» Модель Т-4 Термозонд разового действия	Температура, °C	-2...30	±0,15	0,02	0,1
	Давление, атм. 2-х диапазонов	0—45 0—75	±2 % ±2 %		
«Биссет, Берман» Термозонд разового действия	Температура, °C	-2...35	±0,2		0,15
	Давление, атм.	0—60	±2 %		

Я.по

«Осава Сейки» Модель OSK 3259	Температура, °C	-2...32	±0,2		
	Давление, атм. 3 типа	1) 0—7 2) 0—14 3) 0—27	±3 % ±3 % ±3 %		
	Температура, °C	-2...40	±0,05	0,01	
Модель OSK 3246	Давление, атм. 3 типа	1) 0—100 2) 0—200 3) 0—600	±0,3 % ±0,3 % ±0,3 %	0,1 % 0,1 % 0,1 %	
	Температура, °C	-2...30	±0,1 ±0,15		
	Давление, атм. 2 типа	1) 0—183 2) 0—46			
«Шурум Сейки» Дифференциальный термометр «Морской конек»	Температура, °C	0—35	±0,2		
	Давление, атм.	0—63,5	±2,5 м		
«Метокан» Модель МОХ-БТ-2Ф	Температура, °C	-2...38	±0,05		
	Давление, атм.	0—100	0,3 %		

Велико

Модель ET-5	Температура, °C	-5...40	±0,05		
	Давление, атм.	0—30			
«Гидробиос» Батитермограф	Температура, °C	-1...30	±0,2		
	Глубина, м	0—275	±2,5		

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Средняя температура, °С	Историческая память	Масса, г	Габариты, мм
---------	------------	-------------	-------------------------	---------------------	----------	--------------

США

Термистор	Бумажная лента	Кабель-трос ЧМ-сигнал	6000			
	Двужильный провод	Аналоговая	450	Борт-сет		
			750			
Термистор	ЧМ-сигнал по однопроводному проводу	Аналоговая на бумажной ленте	800	Борт-сет	1,5	

НН

Трубка Вурдона Силифон	Пером на стекле с	Автономная запись	70		12	Длина 790, Ø=127
			140			
			270			
Платиновый терморезистор	Цифропечат аналоговая	Автономная запись			31	
			1000			
			2000			
			6000			
Термистор	ЧМ-сигнал по однопроводному кабелю	Аналоговая на бумажной ленте	1830	Борт-сет	1,8	Ø70×483
			460		1,3	Ø71×355
	Магнитная память	Автономный	635	Набор батарей	9	Длина 610, Ø140
	Магнитная память	Автономный	10	Набор батарей		Длина 493, Ø140

Британия

Термистор	Аналоговый по кабелю	Средний индикатор	300		0,3	Длина 100, Ø25
-----------	----------------------	-------------------	-----	--	-----	----------------

ФРГ

Трубка Вурдона Силифон	Пером на стекле	Автономный	245			Длина 790, Ø140
------------------------	-----------------	------------	-----	--	--	-----------------

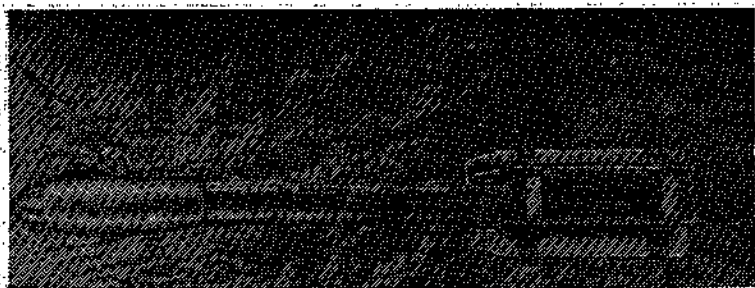


Рис. 9. Батитермограф фирмы «Гидро-биос».

ние свободного конца капиллярной трубки с укрепленным на нем пером. Таким образом, в результате этих двух перемещений на металлизированной поверхности стекла вычерчивается кривая, характеризующая распределение температуры воды по глубине. При этом вертикальная ось — ось глубины, а горизонтальная характеризует значение температуры воды. При выборке зонда кривая распределения температуры по глубине повторяется.

Широкое применение в океанологической практике в последнее время нашли термозонды разового действия (ХВТ), выпускаемые многими фирмами. Обращают на себя внимание ХВТ-зонды: модели Т-4 фирмы «Сиппикан» (США); частотный термозонд фирмы «Биссет Берман» (США) и модель OSK 3260 фирмы «Огава Сейки» (Япония). ХВТ-зонды могут быть использованы как с борта судна, так и с летательных аппаратов (самолетов, вертолетов).

Рассмотрим для примера ХВТ-зонд модели OSK 3260 фирмы «Огава Сейки». Измерительная схема зонда размещена в обтекаемом корпусе (рис. 10). Информация с использованием частотной модуляции по прочному одножильному кабелю передается на двухкоординатный самописец, находящийся на борту носителя. ПИП температуры — термистор — включен в схему делителя напряжения, значение которого на выходе пропорционально измеряемой температуре. Преобразователем напряжение — частота является блокинг-генератор, частота которого изменяется в пределах 350—400 Гц в диапазоне измеряемой температуры. Катушка с тонким одножильным кабелем помещена внутри обтекаемого корпуса, а второй конец кабеля намотан на вторую катушку, установленную в метательном устройстве. Метательные устройства могут быть двух типов: ручное переносное (рис. 11) массой 3 кг, включая 150 м кабеля, и палубное стационарное (рис. 11) массой 35 кг, включая 330 м кабеля, и длиной пусковой трубки 132 см. Первая катушка устройства разматывается при опускании зонда, а вторая — при движении носителя вперед. Подобная система поз-

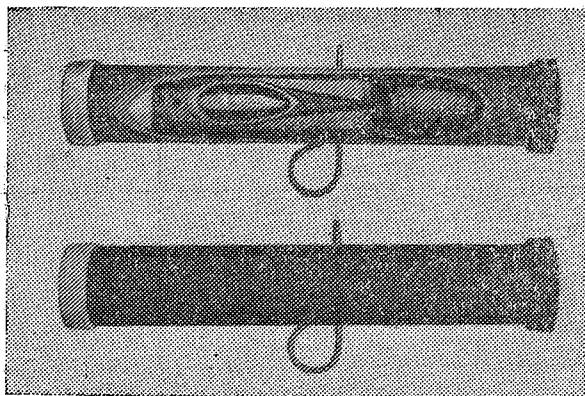


Рис. 10. ХВТ-зонд модели OSK 3260.

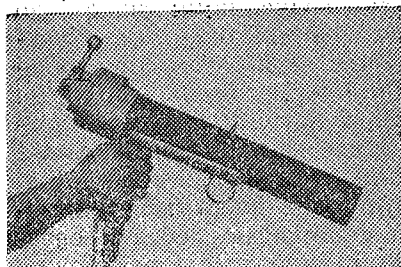


Рис. 11. Метательные устройства ХВТ-зонда.
Слева — ручное, справа — палубное, стационарное.

воляет точно сбрасывать зонд в заданную точку поверхности независимо от скорости и курса носителя. Скорость зондирования в различных моделях может варьироваться от 2 до 7 м/с. После достижения определенной глубины кабель обрывается, и зонд теряется. Существует несколько модификаций модели OSK 3260 (табл. 4).

Цифровой запоминающий термобатиграф модели МОХ-БТ 2Ф фирмы «Метокван» (Япония) рассчитан для оценки вертикального распределения температуры морской воды до 1000 м с дискретностью измерения температуры по глубине 1 и 10 м. Прибор состоит из зондирующего и бортового дешифрирующего устройств. Зондирующее устройство работает автономно и, питаясь от фирменного батарейного источника тока, опускается на обычном тросе. Получаемая информация откладывается в магнитной памяти. После подъема на борт, зондирующее устройство подключают к

Характеристики модифицированной модели OSK 3260

Марка	Глубина пробурива- ния, м	Максимальная рабочая ско- рость опускания зонда	Диаметр	Длина	Масса кг.
			мм		
3260-A	150	15-16	70	855	1,3
3260-B	150	7	70	855	1,3
3260-C	150	25	70	883	1,8
3260-D, для вертолета	150	25	70	885	1,3

работающему от бортовой дешифратору размерами 105×190×410 мм, где полученная информация подается на цифропечать и графопостроитель.

Микрокомпьютерный батитермограф модели OSK 3246 фирмы «Огава Сейки» (Япония) предназначен для измерения температуры воды по глубине с имеющимися модификациями: тип А-1 до 1000 м; тип А-2 до 2000 м и тип А-6 до 6000 м. Также может осуществляться отбор проб воды на разных горизонтах. Вся электронная часть зонда помещена в прочный герметичный контейнер. Получаемая информация откладывается в магнитную память зонда, а ее регистрация осуществляется при использовании типа А-1 каждый метр, при типе А-2 — каждые два метра, при типе А-6 — каждые шесть метров. Прочный корпус зонда простыми зажимами крепится к тросу, на котором он с помощью лебедки опускается в воду. Причем только при снятии прибора с троса можно собрать отобранные *in situ* пробы воды и с помощью фото-магнитной соединительной системы осуществить передачу собранной информации на бортовой блок, где осуществляется цифропечать результатов измерений температуры и гидростатического давления, а с помощью графопостроителя строится график распределения температуры по глубине.

2

Глава 3. Приборы и методы наблюдений за течениями

3.1. Методы наблюдений за течениями

Возникновение течений в Мировом океане, связанное с общей циркуляцией, является следствием различных гидрометеорологических процессов, протекающих как в планетарном, так и в региональном масштабах. Все это вызывает как горизонтальные, так и вертикальные циркуляции. Изменчивость океанических течений во времени и пространстве изучены еще явно недостаточно, а ме-

тологии и технология измерения вертикальной циркуляции в настоящее время находится еще на начальной стадии. Максимальные скорости таких мощных океанских течений, как Гольфстрим, Куросио, достигают 2,0—2,5 м/с, экваториальных противотечений 1,0—1,5 м/с, средняя скорость обычных океанских течений составляет примерно 0,1 м/с, а средняя меридиональная скорость глубинной циркуляции — около 0,035 м/с.

Обычно в потоке наблюдается турбулентный режим движения воды, который характеризуется перемешиванием водных масс, вызывающим пульсацию скоростей как по значению, так и по направлению. Существующая аппаратура позволяет измерять подобные изменения скорости и направления течений во времени. Результаты проведенных исследований показывают, что, например, пульсационные изменения происходят с большой частотой, причем на отдельные пики значительной амплитуды накладываются пики меньшей амплитуды, но большей частоты. Поэтому различают мгновенную и местную скорость в точке потока.

Исследования гидродинамических процессов в Мировом океане основываются на прямых и косвенных методах измерения скорости потока. Выбор того или иного метода измерения параметров течений и характеристик измерительной аппаратуры в первую очередь определяется целью исследований для необходимого диапазона масштабов и способа описания движения. В зависимости от этого измерения проводят в фиксированной точке или разносят по пространству, выбирают количественный и качественный состав аппаратуры.

В настоящее время существует много способов измерения параметров течений, основанных на различных физических принципах. В соответствии с этими принципами можно выделить несколько основных методов измерений характеристик течений на различной глубине, в поверхностном и придонном слоях: навигационный, поплавочный, вертушечный, геоэлектромагнитный, термодинамический, акустический, оптический, гидродинамический, вихревой, метод меток, электрохимический и т. д.

Навигационный метод долгое время был одним из самых распространенных методов наблюдений за течениями. Основные сведения о поверхностных течениях Мирового океана получены путем обработки массовых навигационных определений, заключающихся в сопоставлении счислимых и обсервованных мест судов.

Поплавочный метод измерения течений основан на измерении положения в пространстве и во времени поплавков, движущихся в потоке воды. Для измерения характеристик течений используются различного рода поплавки, которые могут запускаться как на поверхность воды, так и на требуемую глубину. Скорость течений принимается равной скорости движения поплавка, определенной по времени прохождения поплавком определенного расстояния.

Вертушечный метод является наиболее распространенным в настоящее время в океанологической практике. В качестве приемников используются датчики гидродинамического типа, ротор Савониуса, крест Робинсона, крылатки, винт Архимеда, импеллеры. Их действие основано на практически линейной зависимости между скоростью потока u и числом оборотов датчика n , т. е. $u=f(n)$.

Опыт практического использования различных типов датчиков скоростей течения с учетом возможных колебаний прибора из-за турбулентных и волновых воздействий показал, что для измерения характеристик течений более всего подходят реверсивные датчики. Этот тип датчиков автоматически исключает компоненты скорости с периодами меньше времени экспозиции (время осреднения характеристик течения прибором). Нереверсивные датчики независимо от скорости, а в некоторых случаях и от направления потока, вращаются только в одну сторону. Наиболее распространенными и наиболее простыми по конструкции реверсивными датчиками скорости являются различные виды импеллеров (например, модель OSK 900 фирмы «Огава Сейки», Япония). Наиболее рациональным является тип импеллера с уменьшенной площадью лопастей вблизи ступицы (модель CM-18, фирмы «Того Дентан», Великобритания). Эта конструкция наиболее проста в технологическом отношении. Кроме того, ступицы вблизи лопасти имеют низкий КПД, а их изготовление в виде стоек снижает порог чувствительности датчиков, уменьшает влияние неравномерности трения в подшипниках и неточность балансировки.

Из всех типов датчиков винт Архимеда и импеллер обладают наименьшей инерционностью (0,5—10 с), их начальная скорость от 0,5 до 1,0 см/с и им необходимо ориентирование по потоку. Крест Робинсона и ротор Савониуса обладают диаграммой направленности, близкой к круговой, т. е. им не нужно ориентирование по потоку. Они обладают такой же начальной скоростью, что и импеллеры, но до скорости 3 см/с имеют нелинейный начальный участок характеристики числа оборотов в зависимости от скорости потока. Ротор Савониуса (им укомплектованы, например, измерители течений модель 135 фирмы «Интероушн», США, и модель SD-4 фирмы «Маркдан», Дания) подвержен биологическим обрастаниям и обладает заметным гистерезисом — его реакция при знакопеременных течениях различна. Диапазон измерений скоростей течений датчиками вертушечного типа лежит в пределах 0,5—300 см/с. Погрешность измерений механическими вертушками определяется в основном качеством исполнения датчиков и в лучших образцах не превышает 0,5 %.

Для анализа уравнения движения лопастного винта, основанного на зависимости $u=f(n)$, можно использовать известный закон механики, сообщаемый, что для вращающейся системы произведение момента механической инерции системы относительно

оси вращения на угловое ускорение равно сумме моментов сил, действующих на систему. Для вертушки уравнение движения лопастного винта в общем виде представляется как

$$\frac{d\omega}{dt} = \sum_{i=1}^n M_i$$

где ω — угловая скорость; $\sum_{i=1}^n M_i$ — сумма моментов сил, приложенных к лопастному винту:

$$\sum_{i=1}^n M_i = M_d - M_c = M_d - M_r - M_t - M_p$$

где M_d — движущий момент, M_c — момент сил сопротивления, M_r — момент сил гидродинамического сопротивления, M_t — момент сил трения в опорах, M_p — момент реакции регистрирующей системы. Отсюда ясно, что точность измерений скорости течений зависит от плотности среды, условий обтекания, структуры и флуктуаций течения, т. е. зависимость нелинейна и количественно может быть оценена только при рассмотрении малых отклонений от установившегося состояния.

Преобразование числа оборотов лопастного винта в электрический сигнал может осуществляться, например, магнитами, установленными на ободе лопастного винта. Эти магниты, вращаясь вместе с лопастным винтом, проходят мимо геркона, фиксирующего число оборотов. Частота импульсов на герконе пропорциональна скорости вращения лопастного винта. В качестве магниточувствительного элемента можно использовать также небольшую рамку из пермолоя с обмоткой, включаемой между корпусом и общей точкой двух конденсаторов. Магниты лопастного винта, проходя мимо рамки, намагничивают пермолуй, а возникающий сигнал преобразуется в частоту счетных импульсов с возможностью моделирования в цифровой код или аналоговый сигнал.

В океанологической практике нашли широкое применение микровертушки с индуктивным или резистивным преобразователями выходного сигнала. Они обычно используются для измерения мгновенных скоростей потока в диапазоне 0,04—10 м/с с погрешностью 2—5 % и постоянной времени 0,01—0,2 с. 76

Геоэлектромагнитный метод заключается в индуцировании ЭДС в проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля. Эта ЭДС прямо пропорциональна скорости движения проводника, напряженности магнитного поля и размерам проводника. В океанологической практике при измерении скорости потока таким проводником может являться морская вода, движущаяся в естественном магнитном поле Земли, и одновременно участок кабеля между двумя неполяризующимися электродами, буксируе-

22

именно по поверхности воды. Согласно закону Фарадея, величина индуцируемой ЭДС (E) будет

$$E = LuH_z, \quad (32)$$

где L — база измерений (длина кабеля между электродами), u — скорость движения любой среды относительно магнитного поля Земли с напряженностью H_z .

Измерители подобного типа могут быть использованы для исследования крупномасштабных поверхностных систем течений на ходу судна. Но погрешности этого метода сильно возрастают при работах в высоких широтах, вблизи берегов (< 30 миль), в узкостях и на глубине менее 100—200 м. Точность приборов этого типа обычно не превышает 3—5 %, расстояние между электродами составляет 100—200 м; чувствительность 4—6 мВ/(м·с).

Кроме собственного магнитного поля Земли можно использовать и магнитное поле, возбуждаемое постоянными или электромагнитами. Если заменить проводник потоком проводящей жидкости, пропущенной между полюсами магнита, и при этом измерять наведенную в жидкости ЭДС, то принципиальная схема электромагнитного измерителя скорости потока, предложенная еще самим Фарадеем, будет иметь вид, представленный на рис. 12. Индуцируемую на неполяризующихся, изготовленных, например, из платиновой черни электродах, помещенных между полюсами магнитов, ЭДС можно вычислить по формуле, аналогичной (32):

$$E = -kBDu,$$

где B — магнитная индукция в зазоре между полюсами магнита; k — коэффициент, зависящий от вида магнитного поля (при использовании постоянного магнита $k=1$, а при изменении магнитного поля во времени t с частотой f $k = \sin 2\pi ft$); D — диаметр потока.

Электромагнитные измерители потока состоят из канала (прямоугольной или цилиндрической формы) со стенками из немагнитного материала, а иногда со специально нанесенным покрытием с большим удельным сопротивлением. Это уменьшает вихревые токи, искажающие магнитный поток, предотв-

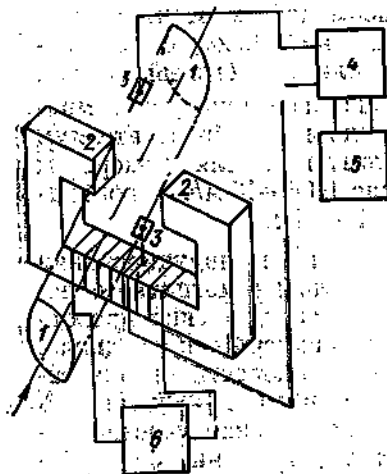


Рис. 12. Принципиальная схема электромагнитного измерителя скорости потока.

1 — поток в канале; 2 — полюса магнита; 3 — электроды для схемы ЭДС; 4 — УИП; 5 — регистратор; 6 — блок питания.

рашает короткое замыкание и увеличивает коррозионную стойкость. В противоположные стенки канала заподлицо с поверхностью изоляционного покрытия вводят два точечных, неполяризующихся, стойких к воздействию окружающей среды электрода для съема наведенной в морской воде ЭДС, что исключает влияние на выходной сигнал данного ПИП взвешенных в воде частиц, пузырьков газов и физико-химических свойств жидкости. Эти ПИП не пригодны для исследования потоков в жидкостях с электропроводностью менее 10^{-7} — 10^{-5} См/с. Чувствительность их лежит в пределах 1,0—1,5 мВ/(м·с).

Существенным недостатком подобной аппаратуры является поляризация измерительных электродов, меняющая сопротивление преобразователя, чего нет у электромагнитных преобразователей с переменным магнитным полем. Но у них возникают трансформаторный и емкостной эффекты, образующиеся из-за наличия вторичных преобразователей, соединительных проводов и большой разности потенциалов между системой возбуждения магнитного поля и электродами. Устранение подобных недостатков, возможное с помощью специальных стабилизирующих устройств, усложняет конструкцию. Преимуществом подобных систем является их малая постоянная времени, что крайне важно при измерении быстро меняющихся потоков.

Термодинамический метод основан на зависимости теплообмена между измерительным зондом и средой от значения скорости течения. В этом случае используется либо теплопередача от зонда к потоку (термоанемометр), либо от зонда к зонду через поток. Термодинамический метод используются в основном для исследования пульсационных характеристик течений. Между зондом, введенным в поток, и водной средой устанавливается теплообмен, интенсивность которого в основном зависит от скорости течения. Впервые эта зависимость была использована для прибора, измеряющего скорость ветра (термоанемометр Кинга, 1913 г.). Затем принцип теплообмена был использован для измерения скорости водного потока. Строго говоря, теплообмен между зондом и потоком зависит не только от скорости течения, но и от температуры, ее плотности, вязкости, теплопроводности, отношения удельных теплоемкостей и т. п. Подобные зависимости существенно ограничивают области использования термодинамических методов измерения скорости.

Термоанемометры должны иметь следующие свойства: высокая разрешающая способность, линейность тарировочных характеристик, малый уровень собственных шумов, надежность и удобство в эксплуатации, отсутствие влияния температуры и солености, широкий диапазон измерений и т. п. К сожалению, в настоящее время не существует измерителей, отвечающих всем этим требованиям. В океанологической практике при измерении пульсаций скорости течений широко используются платиновые проводочные и пленочные, а также гидрорезисторные термоанемомет-

ры. В качестве их ПИП используются платиновая проволока, платиновая пленка и кондуктометрическая ячейка. По принципу работы различают термоанемометры постоянного тока и постоянной температуры. В первых поддерживается постоянный ток, протекающий через ПИП, регистрируется его сопротивление и температуру, зависящие от скорости течения. Во вторых поддерживается постоянная температура ПИП, что позволяет регистрировать колебания тока, тоже зависящего от скорости потока. В океанологической практике наиболее распространен второй тип прибора.

В поток помещают тонкую платиновую проволоку (нить) и пропускают через нее ток, нагревающий ее. В потоке проволока охлаждается в зависимости от скорости потока, что и изменяет ее электрическое сопротивление. Допустим, что нить перпендикулярна потоку, жидкость несжимаема, разность температуры нити бесконечно мала, число Прандтля постоянно, то количество тепла Q , теряемого нитью в единицу времени, описывается формулой Кинга

$$Q = L\Delta T (k + \sqrt{2\pi k \rho c_p u d}), \quad (33)$$

где L — длина нити; $\Delta T = T_n - T$, T_n — температура нити, T — температура воды в потоке; k — коэффициент теплопроводности; ρ — плотность; c_p — коэффициент теплоемкости; u — скорость потока; d — диаметр нити. В безразмерной форме эта зависимость примет следующий вид:

$$Nu = A\sqrt{Re} + B,$$

где A и B — const; $Nu = Q/(\pi L k \Delta T)$ — число Нуссельта; $Re = (u\rho d)/\mu$ — число Рейнольдса. Тепло, теряемое нитью, компенсируется электроподогревом, который контролируется и служит средством измерения количества этого тепла. В практических расчетах потерю тепла находят из уравнения теплового равновесия

$$I_E^2 R = S\alpha (T_n - T), \quad (34)$$

где I_E — ток через рабочий элемент с сопротивлением R ; S — площадь поверхности охлаждаемого тела; α — коэффициент теплоотдачи, являющийся функцией скорости потока, показатель теплового воздействия среды на тело. Для проволочных датчиков

$$\alpha = C \frac{K_c}{d} d^m \frac{1}{\nu^m} u, \quad (35)$$

где C и m — коэффициенты, зависящие от числа Рейнольдса и геометрических размеров датчиков; ν — коэффициент молекулярной вязкости. Для скорости потока до 80 м/с $K_c = 0,015-0,03$; $m = 0,64$ и $C = 0,81$.

В современных термоанемометрах вместо проволоки широко используется платиновая пленка, наносимая очень тонким слоем на подложку из стекла или кварца в виде конуса или клина. Про-

текаемый через пленку ток, поддерживаемый постоянным, нагревает ее и создает определенную разность температур ПИП и окружающей среды. В воде эта разность обычно составляет 10—20 °С. Термоанемометры пленочного типа отличаются малым уровнем шумов. Среднеквадратический уровень шумов, приведенный к единицам скорости, в диапазоне частот 1—250 Гц составляет 0,12 мм/с.

Гидрорезисторный термоанемометр представляет собой объем воды, находящийся между центральным (точка диаметром 0,5 мм) и кольцевым (диаметр до 9 мм) электродами датчика, помещенными на полусферическую поверхность. Изменение температуры измерительного объема воды вызывает флуктуации электропроводности, которые в свою очередь вызывают изменение добротности измерительного генератора с включенными в его схему электродами, что и модулирует амплитуду напряжения снимаемого с генератора. Эта амплитудная модуляция и дает нам информацию о скорости набегания потока на ПИП и его пульсациях. Минимальный размер пульсаций, измеряемых подобной аппаратурой, составляет около 2 мм/с.

С помощью термоанемометров при скорости набегающего потока до 30 см/с удается получить чувствительность 0,7 мм/с. Приборы подобного типа могут измерять скорость течений в широких пределах от 0,01 до 0,15 м/с с погрешностью 2—5 %, а их информативность в принципе не зависит от средней скорости потока. К недостаткам термоанемометров следует отнести нелинейность градуировочной характеристики; влияние геометрических размеров ПИП на результаты измерений; зависимость результатов измерений от возможностей коррозии, обрастания, поляризационных эффектов и тому подобных причин, что понижает надежность термоанемометров и ограничивает иногда до нескольких часов время их использования. 13 26

Акустические методы измерения характеристик течений начали использоваться в океанологии где-то с середины 60-х годов. Они обладают высокой точностью и чувствительностью, что особенно важно при исследовании процессов турбулентности и малых скоростей течений. Большинство акустических методов основано на принципе измерения скорости прохождения ультразвука в морской воде, ибо скорость его распространения относительно прибора включает в себя и составляющую скорости движения исследуемой среды, вектор которой совпадает с вектором движения звуковой волны. Известно, что в турбулентном потоке, а это обычная картина для Мирового океана, существуют как флуктуации самой среды, так и, например, неоднородности температуры и различных концентраций. А температурные неоднородности, вызывающие колебания скорости звука, могут на порядок изменить измеряемую величину. Поэтому в океанологической практике измерение скорости звука в одном направлении из-за возникающих погрешностей малоэффективно. Для сведения к минимуму влия-

ние колебаний скорости звука на точность измерения скорости потока необходимо использовать приборы, измеряющие разность времени прохождения ультразвука между излучателем и приемником, движущегося в противоположных направлениях. А для исследования мелкомасштабной турбулентности регистрируется сдвиг частоты акустических колебаний за счет различных неоднородностей среды — метод Доплера.

Приборы, предназначенные для реализации этих методов, содержат один или два акустических канала: излучатель — приемник. Приемный и излучающий кристаллы ориентируются по потоку, т. е. направление передачи акустических импульсов совпадает с направлением течения, или направлено против него. Скорость звука в этих приборах может измеряться импульсным или фазовым методами. Импульсный метод наиболее распространен в океанологической практике, так как фазовый метод обладает малым динамическим диапазоном.

Двухканальные приборы содержат два параллельных канала. В одном из них ультразвук распространяется по направлению потока, в другом — навстречу потоку. Аппаратура подобного типа проста в исполнении, но требует соблюдения важного условия — идентичности среды на измерительных участках обоих каналов. Одноканальные измерители исключают это требование, но имеют более сложное конструктивное решение, так как в этом случае один канал используется для измерения скорости распространения ультразвука в двух направлениях. Оба кристалла одновременно служат и приемником, и излучателем, причем один из них принимает сумму скоростей звука и потока, а другой — их разность. Рассмотрим принцип действия подобной аппаратуры. Пусть c — скорость распространения ультразвука в неподвижной среде; u — скорость потока (течения); T_1 и T_2 — время прохождения ультразвукового импульса по течению и против течения соответственно на расстоянии базы L между излучателем и приемником. Тогда

$$T_1 = \frac{L}{c+u}; \quad T_2 = \frac{L}{c-u}, \quad (36)$$

а разность времени прохождения сигнала в разных направлениях

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \frac{2Lu}{c^2 - u^2} \quad (37)$$

является функцией u и c . При $c = \text{const}$ значение ΔT однозначно определяет u . Но в реальных условиях скорость звука не постоянна и зависит от внешних факторов (температура, соленость морской воды и т. п.). Для избежания подобных явлений удобнее перейти от уравнения для приращения времени ΔT к уравнению для частоты принимаемых ультразвуковых сигналов. Сообразуясь с (36), имеем

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{c+u}{L}; \quad f_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{c-u}{L}, \quad (38)$$

где f_1 и f_2 — частоты сигналов, распространявшихся по течению и против течения соответственно. Отсюда

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{2u}{L}. \quad (39)$$

Выражение (39) подчеркивает однозначную зависимость разности частот Δf от скорости потока u и лежит в основе частного метода измерения скорости распространения ультразвука. Быстродействие прибора определяется необходимой точностью измерений. При отсчете разности частот через 1 с чувствительность измерений скорости составляет 4 см/с. Если уменьшать дискретность опроса, или увеличивать выходную частоту, то можно повысить чувствительность. Объединив в одном устройстве несколько подобных измерителей, мы можем одновременно измерять различные составляющие скорости. Чувствительность, достигнутая в этих приборах, составляет $f = 200$ кГц; $df/du = 300$ Гц/(см·с).

При использовании фазовых методов измеряется разность фаз (времени прихода) двух встречных акустических импульсов. Если φ_1 и φ_2 — разности фаз между опорным сигналом, снимаемым с генератора, и сигналами, прошедшими по течению и против него соответственно, то

$$\varphi_1 = \omega \frac{L}{c+u}; \quad \varphi_2 = \omega \frac{L}{c-u}, \quad (40)$$

или

$$\varphi_1 = \omega \frac{L}{c} + \omega \frac{uL}{c^2}; \quad \varphi_2 = \omega \frac{L}{c} - \omega \frac{uL}{c^2}, \quad (41)$$

а для разности фаз получим

$$\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\omega \frac{uL}{c^2}, \quad (42)$$

где $\omega = 2\pi f$, т. е. чувствительность преобразователя, основанного на измерении скорости распространения ультразвука фазовым методом, пропорциональна частоте ω .

Акустический измеритель характеристик течений, основанный на измерении доплеровского сдвига частоты излученных колебаний, содержит передатчик акустических сигналов с узкой диаграммой направленности, приемник сигналов объемного отражения и смеситель, выявляющий разность частот излучающего и принимаемого сигналов. Доплеровский метод основан на том, что в водную среду, в которой всегда находится множество мелких рассеивающих звук частиц и которая движется относительно прибора со скоростью u , излучаются колебания с частотой f . Предположим, что рассеиватели (неоднородности физических свойств сре-

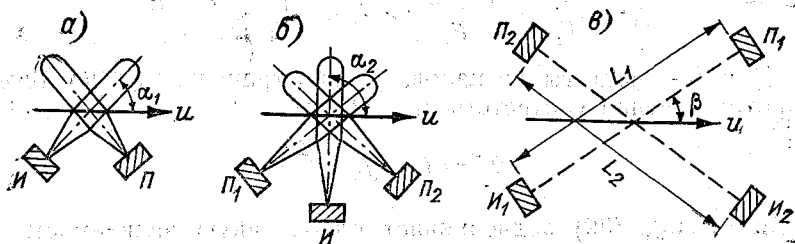


Рис. 13. Диаграммы направленности акустических преобразователей.

ды) имеют малые размеры, стационарны относительно потока и перемещаются вместе с ним. Рассеянная на этих неоднородностях физических свойств среды ультразвуковая волна имеет доплеровский сдвиг по частоте относительно излученного сигнала. Помещенный в рассеянное поле приемник ультразвуковых колебаний фиксирует этот сигнал. Сигнал доплеровской частоты проявляется в виде амплитудной модуляции несущей частоты.

Для исключения необходимости селекции по дальности часть потока, в которой производится измерение, локализуют посредством пересечения диаграмм направленности акустических преобразователей (рис. 13 а и б). В этом случае используют непрерывное излучение ультразвука. Для неподвижной пары излучатель — приемник и движущихся центров рассеивания при условии $u/c \ll 1$ доплеровский сдвиг частоты f_d будет равен

$$f_d = f' - f = f \frac{u}{c} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2), \quad (34)$$

где f' — частота принимаемого сигнала; α_1 и α_2 — углы между вектором скорости потока и направлениями на излучатель и приемник соответственно.

Использование двух приемников (см. рис. 13 б) позволяет определить векторную скорость течения относительно оси излучателя, положение которого может быть фиксировано или известно. При α_1 и $\alpha_2 < 90^\circ$ излучение происходит по ходу движущегося прибора, а рассеянный сигнал приходит из области, расположенной впереди прибора, т. е. скорость потока измеряется на некотором расстоянии от прибора, в невозмущенном объеме жидкости. Подобные приборы обладают хорошей линейностью, большим динамическим диапазоном измерений и высоким пространственным разрешением. Чувствительность измерений у них, согласно (34), зависит от частоты излучения, которую необходимо выбирать более высокой. В океанологических приборах она выбирается около 5—6 МГц, что позволяет при малых размерах приемников и излучателей получить узкую диаграмму направленности и в свою очередь определяет пространственное разрешение. В современных приборах информативная зона (зона измерений) имеет наименьшие линейные размеры около 0,5 см.

В океанологической практике распространен также еще один вариант измерителя с использованием эффекта Доплера (рис. 13 в). В нем первичный измерительный преобразователь является двухканальным и состоит из двух излучателей I_1 и I_2 и двух приемников $П_1$ и $П_2$ ультразвукового излучения. Подобное расположение ПИП с учетом соотношения векторов скорости течения и распространения акустического сигнала, согласно выражению (38), позволяет уравнение (43) представить в виде

$$f_A = f' - f = \left(\frac{c + u \cos \beta}{L_1} - \frac{c - u \cos \beta}{L_2} \right),$$

или

$$f_A = u \frac{(L_1 + L_2) \cos \beta}{L_1 L_2} + c \frac{L_2 - L_1}{L_1 L_2}. \quad (44)$$

Для реально достижимой точности $L_1 - L_2 = L$ и при незначительных изменениях c можно считать

$$c \frac{L_2 - L_1}{L_1 L_2} = 0,$$

отсюда

$$f_A = \frac{2u}{L} \cos \beta, \quad (45)$$

т. е. скорость течения u однозначно определяется f_A .

Из числа недостатков, присущих доплеровским измерителям, можно отметить их слабую энергетическую обеспеченность из-за малости коэффициента обратного рассеяния звука в морской воде, а также сильные флуктуации рассеянного средой сигнала, обусловленные как статическим распределением рассеивателей, так и конечным временем пребывания их в измерительной зоне. Рассеянный сигнал является суммарным от множества отдельных частиц, рассредоточенных по всему измерительному объему. Все это приводит к расширению спектра приемного сигнала. Для регистрации средней скорости необходимо использовать интегрирование с большой постоянной времени.

Созданные в настоящее время океанологические приборы для измерения характеристик течений, основанные на акустических методах, имеют разрешение по скорости порядка 1 см/с в диапазоне частот пульсаций скорости 0—0,3 Гц.

Оптические методы измерения скорости течения подразделяются на доплеровский и фазовый. Для измерения скорости потока и ее изменений во времени используют как искусственное излучение, в виде лазерных или обычных электрических источников света, так и собственное излучение.

Доплеровский метод дает возможность получить частотное разрешение, что позволяет измерять скорости порядка мм/с. Он описывается уравнением.

$$f' = f \frac{\sqrt{1 - u^2/c^2}}{1 - u/c \cos \alpha} n \cos \alpha,$$

а после преобразования с учетом малости величин получим

$$f' = f \frac{u}{c} n \cos \alpha, \quad (46)$$

где f и f' — частоты излучения и принимаемого сигнала соответственно, u — скорость потока, c — скорость света, n — показатель преломления света, α — угол между вектором скорости и линией наблюдения.

На рис. 14 представлена схема лазерного доплеровского измерителя скорости потока. Источник света в виде лазера 1 излучает свет перпендикулярно к потоку u , в котором он рассеивается и объективом 2 через зеркало 3 фокусируется на фотодетекторе 5. Опорный луч, ослабленный нейтральным фильтром 7, отражается от зеркала 4, прозрачной пластины 6 и попадает в ту же точку детектора. Положение пластины 6 регулируется так, чтобы длины оптических путей обоих лучей были равны. Частота биений регистрируется анализатором спектра. Для увеличения интенсивности рассеянного света в исследуемую среду иногда вводят разлетные золи, например в виде полистироловых шариков.

Фазовый оптический метод измерения скорости течений включает в себя известный принцип сдвига интерференционной картины. Разность хода ΔL в длинах волн λ определяется как

$$\Delta L = \frac{2L u x_1 n^2}{\lambda (n^2 - n^2 u^2)} \approx \frac{2L u (n^2 - 1)}{\lambda c} \quad (47)$$

где L — длина оптической базы; $x_1 = 1 - 1/n^2$.

Особенностью оптических измерителей является большая чувствительность к изменениям коэффициента преломления света, а значит и к плотности морской воды. Оптические измерители, используя свою высокую частоту излучения, в принципе могут иметь достаточно высокую разрешающую способность и чувстви-

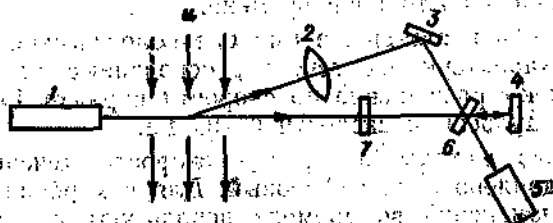


Рис. 14. Схема лазерного доплеровского измерителя скорости потока.

тельность, но относительная погрешность и различные паразитные эффекты аналогичны акустическим измерителям. Кроме того, в них еще возникают большие трудности регистрации и анализа изменяющихся по амплитуде доплеровских сигналов излучения.

Гидродинамический метод основывается на измерении давления, оказываемого потоком на находящееся в нем тело. Между скоростью течения и давлением, оказываемым потоком на тело, существует зависимость

$$R = \frac{1}{2} c_m \rho S v^2, \quad (48)$$

где R — давление потока на тело; c_m — коэффициент, зависящий от формы тела и числа Рейнольдса; ρ — плотность воды; S — площадь проекции тела на плоскость, нормальную направлению течения. Отсюда

$$v = \sqrt{\frac{2R}{c_m \rho S}}, \quad (49)$$

т. е., измерив давление потока на тело, мы можем определить и скорость течения.

Вихревые методы измерения скорости течений основаны на регистрации последовательности вихрей, возникающих при обтекании различных тел в потоке жидкости, так называемых дорожек Кармана. Регулярные вихри образуются в области чисел Рейнольдса 60—5000, при этом частота образования вихрей f прямо пропорциональна скорости течений

$$f = \frac{Sh}{d} v, \quad (50)$$

где d — диаметр обтекаемого тела; Sh — число Струхала. Для $Re < 60$ течение позади тела ламинарное, для $Re > 5000$ — турбулентное.

Для измерения вихреобразований используют термодатчики и ПИД давления. В последнее время широко используется метод модуляции вихрями акустического и лазерного луча. К недостаткам подобных измерителей относится довольно высокий нижний предел применимости 5—10 см/с, а также их критичность к горизонтальному положению, так как частота образования вихрей зависит от вращения измерителя в горизонтальной плоскости, что может загибать результаты измерений на 20—25 %.

Метод меток основан на измерении времени переноса потоком определенного, обычно малого, объема метки с помощью соответствующих приборов. Метки могут быть как искусственными, так и естественно существующими в потоке. Они могут состоять из микрочастиц (атомов, молекул или ионов) и макрочастиц, взвешенных в исследуемой среде. Метка может отличаться от окружающей среды температурой, степенью ионизации, зарядом, плот-

ностью, светимостью, коэффициентом преломления, поглощательной способностью, радиоактивностью и т. д.

Погрешность измерения скорости методом меток складывается из погрешности определения времени и пути прохождения метки и погрешности, возникающей в случае отличия скорости движения метки от скорости потока. Если используются искусственные метки, к этим составляющим добавляется погрешность за счет искажения потока самой меткой. Учитывая, что две первые погрешности сравнительно малы, а третью можно надежно оценить метод меток довольно перспективен для создания образцовых средств измерения характеристик скорости течения.

Электрохимический метод основан на воздействии потока морской воды, смывающего пузырьки газа, возникающие в процессе электролиза. При этом уменьшается и сопротивление электрической цепи. На входные характеристики подобной системы оказывает влияние изменение формы электродов, участвующих в реакции, и диафрагм, окружающих электроды. Эта зависимость позволяет проводить измерения направления вектора скорости течения при использовании множества электродов. Постоянная времени данных электрохимических ячеек составляет обычно секунды и десятки секунд и в значительной мере зависит от скорости потока. На погрешность измерений оказывают влияние температура, соленость морской воды и гидростатическое давление.

Аэрокосмические методы дают возможность получать практически синхронную картину распределения течений на больших акваториях за короткий период времени. Использование аэрокосмических методов в сочетании с судовыми наблюдениями и наблюдениями на АБС позволяет получить наиболее полную картину течений и их изменений во времени и пространстве. При изучении характеристик течений аэрокосмическими методами используются разные косвенные методы: от регистрации положения температурных фронтов, уклона уровня, полей цветности до маршрутных аэрофотосъемок положения различных видов поплавков с последующим фотограмметрическим вычислением векторов течений.

4 **Измерение направления течений** в океанологической практике в основном осуществляется гироскопическим и магнитным методами. Гироскопический метод использует свойство волчка гироскопа сохранять плоскость своего вращения постоянной. Магнитный метод базируется на измерении угла между направлением магнитного меридиана и направлением горизонтальной составляющей вектора скорости течения. Угол поворота компасной катушки и плоскости вращения волчка гироскопа относительно азимутального кольца фиксируется с помощью механических, электромеханических, потенциометрических, феррозондовых, фотоэлектрических и других преобразователей, способных модулировать значение угла поворота в аналоговый или цифровой код.

В этих случаях, особенно при использовании датчиков скорости вертушечного типа, возникает необходимость ориентирования корпуса измерительного прибора с находящимся в нем датчиком направления по потоку. Для достижения подобного эффекта в конструкции подобных приборов предусматривается установка рулей и направляющих плоскостей, площади которых зависят от постоянной времени измерителя и необходимой чувствительности к изменению направления потока. В измерителях скорости потока, не требующих ориентирования по потоку (ротор Савониуса, крест Робинсона), для определения направления, как правило, используется не связанный жестко с корпусом флюгерный датчик.

Чувствительность измерителей направления определяется соотношением между моментом сил динамического давления потока на корпус и рулевое оперение и моментом сил сопротивления, возникающим при повороте корпуса прибора. Динамическое давление возрастает с увеличением скорости потока, соответственно увеличивается и чувствительность данного прибора с увеличением скорости потока.

Уравнение движения датчиков направления подобного типа можно получить по аналогии с аэродинамическими силами (Л. Г. Качурин). Основные силы, действующие на корпус прибора в водном потоке, представляются следующим образом. Силы инерции с моментом

$$K \frac{d^2\varphi}{dt^2},$$

где K — момент механической инерции датчика направления относительно оси поворота, φ — угол поворота корпуса прибора, t — время. Силы трения с моментом

$$k_1 \frac{d\varphi}{dt},$$

где k_1 — коэффициент трения.

Силы динамического давления на корпус прибора вместе с рулевым оперением с восстанавливающимся моментом

$$k_2 (\varphi - \varphi_n),$$

где k_2 — коэффициент динамического давления; $\varphi - \varphi_n$ — угол между положением корпуса прибора и направлением потока.

Силы гидродинамического демпфирования с моментом

$$k_3 \frac{d(\varphi - \varphi_n)}{dt}.$$

где k_3 — коэффициент гидродинамического демпфирования.

Практика использования подобных приборов показывает, что коэффициенты k_2 и k_3 возрастают с увеличением скорости потока, причем k_2 значительно быстрее, чем k_3 . Оба они примерно про-

порциональны площади рулевого оперения, возрастают по мере увеличения расстояния между осью вращения и центром тяжести оперения, правда, по-разному, и существенно зависят от формы корпуса прибора и рулевого оперения.

Уравнение движения корпуса прибора можно записать в виде

$$K \frac{d^2\varphi}{dt^2} + k_1 \frac{d\varphi}{dt} + k_3 \frac{d(\varphi - \varphi_n)}{dt} + k_2(\varphi - \varphi_n) = 0. \quad (51)$$

Обозначив

$$\frac{k_1 + k_3}{K} = 2b; \quad \frac{k_2}{K} = K^2; \quad \frac{k_3}{K} = q, \quad (52)$$

получим (51) в виде

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2b \frac{d\varphi}{dt} - q \frac{d\varphi_n}{dt} + K^2(\varphi - \varphi_n) = 0. \quad (53)$$

Соответствующие коэффициенты данного уравнения зависят также и от внешних неуправляемых факторов — скорости и турбулентности водного потока.

Наиболее широко используемые в океанологической практике магнитные датчики направления являются экономичными, обладают минимальными габаритами, обеспечивают при долговременной работе точность $\pm (2-3)^\circ\text{C}$ с постоянной времени 0,2—2 мин. И, как уже указывалось, их инерционность в основном зависит от массы и габаритов самого прибора, площади и формы корпуса с рулевым оперением, от типа подвески картушки компаса, качества подшипников и т. п.

В последнее время для измерения направления вектора скорости стали использоваться феррозондовые датчики магнитного меридиана, учитывающие изменение индуктивности нескольких взаимноперпендикулярных обмоток, расположенных на сердечнике из магнитомягкого материала с высокой магнитной проницаемостью (обычно пермаллоя) под действием магнитного поля Земли. Действие магнитного поля Земли способствует возникновению пропорциональной ему второй гармоники, которую можно измерить и преобразовать в кодовый сигнал. Одна из этих обмоток вырабатывает сигнал, пропорциональный синусу угла поворота датчика относительно магнитного меридиана, а другая — косинусу этого угла. Точность измерения при горизонтальном положении подобного прибора около 2° при разрешающей способности $0,1^\circ$.

Иногда для определения направления потока используют показания двух или трех независимых ПИП составляющих скорости течения. Сопоставляя их показания, судят о направлении вектора скорости водного потока.

Для регистрации направления, особенно при длительном измерении характеристик течений, иногда используют «скользящие» контакты, движущиеся по круговой намотке потенциометра. Разре-

шающая способность по углу подобных потенциометрических измерителей составляет $0,5-2^\circ$ с точностью измерений $3-10^\circ$. При использовании потенциометрического преобразователя компасную картушку можно также поместить в раствор электролита. В этом случае угловое положение картушки будет пропорционально выходному сигналу электрической схемы. Преимуществом подобного измерителя является отсутствие подвижных механических контактов.

6

3.2. Измерители характеристик течений

Измерение течений в поверхностном слое моря. Проведение подобных измерений затруднено, так как на используемую здесь аппаратуру кроме течения большое влияние оказывают ветер и волнение, вносящие значительные погрешности в результаты измерений. Поэтому в данном случае можно использовать лишь немногие методы. Одним из таких методов является поплавочный, когда поплавки пускают в свободный дрейф. Поплавки должны удовлетворять основному требованию — площадь вертикального сечения части поплавка, возвышающейся над водой, и площадь сечения части поплавка, погруженной в воду, должны находиться в отношении $1:100$ и меньше. В настоящее время для массового разбрасывания в качестве поплавков используются полиэтиленовые конверты, плавающие на поверхности. Сведения о пущенных конвертах регистрируют в журналах. Первичная обработка результатов наблюдений с помощью конвертов производится по схематической карте, на которую наносятся траектории движений конвертов. Точки, в которых отмечены конверты, соединяются прямыми линиями. Снятое со схемы расстояние, пройденное конвертами, делят на время и получают скорость течения в сантиметрах в секунду.

Буксируемая система для измерения течения модели 150А фирмы О. Р. Е. (Великобритания). С ее помощью можно измерять характеристики поверхностного течения. Модель 150А — геомагнитный электрокинетограф (ГЭК) предназначен для измерения поперечной составляющей поверхностного течения. Это достигается регистрацией градиента потенциала напряжения, создаваемого движением морской воды в магнитном поле Земли. Получаемая информация регистрируется на бумажной ленте электроного потенциометра, шкала которого откалибрована в узлах и в сантиметрах в секунду. Кроме того, в бортовом блоке имеется специальный переключатель магнитной напряженности на семи позиций от $0,1$ до $0,7$ эрстед, предназначенный для регулировки чувствительности в зависимости от местной интенсивности вертикальной составляющей магнитного поля Земли.

Для уменьшения паразитных сигналов, вызванных поверхностным волнением, и ошибки, возникающей из-за провисания кабеля, измерительные электроды отнесены от плавучего кабеля. Общая

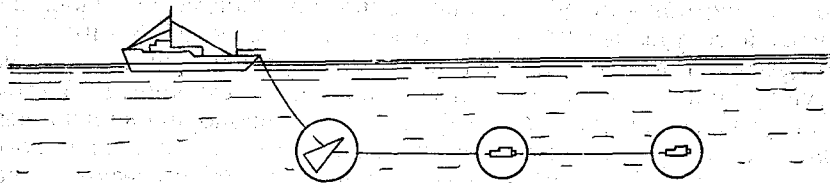


Рис. 15. Схема буксируемой системы для измерения течений.

длина кабеля 230 м. Электроды подсоединяются к кабелю через соединительные неметаллические коробки, прикрепленные к кабелю на расстоянии 100 м друг от друга. Кабель с электродами буксируется за депрессором, погруженным на глубину 12 м (рис. 15). Одним из наиболее важных узлов аппаратуры являются электроды, служащие для контакта датчика с морской водой и подключения к цепи измерительного контура. Используются серебряные-хлорсеребряные неполяризующиеся электроды, помещенные в корпуса из оргстекла. Выбор материала электродов обусловлен стабильностью во времени их собственных электрических потенциалов. Электроды подбираются парами с минимальными значениями собственных ЭДС и достаточной для метода стабильностью.

Самописец течений модели Т-4 фирмы «Интероуин» (США). В нем используется электромагнитный способ измерения характеристик течений. С помощью современной технологии в этой модели удалось избавиться от многих недостатков, присущих ранее использовавшимся электромагнитным измерителям течений. Самописец Т-4 предназначен для измерения в автономном режиме (на АБС) характеристик течения, температуры, удельной электропроводности и гидростатического давления. На автономной буйковой станции прибор крепится в разрыве троса с помощью проходящей сквозь корпус самописца штанги, способной выдержать нагрузку до 4,5 т. Прибор имеет форму шара диаметром 250 мм, внутри которого расположены регистрирующая и запоминающая (устройство твердотельной памяти) аппаратура, а также блок питания (литиевые батареи), обеспечивающий автономную работу прибора в течении 2800 ч. Масса прибора на воздухе 8 кг, в воде он обладает нейтральной плавучестью.

Поплавки нейтральной плавучести используются для измерения характеристик течения на глубине. Сваллоу впервые в мире использовал поплавок подобного типа, изготовленный из двух труб алюминиевого сплава длиной по 3 м. В одной трубе размещались передатчик и блок питания, а вторая труба обеспечивала плавучесть поплавка, способного работать на глубине до 5000 м. Передатчик устройства работал на частоте 10 кГц. Методика работы с поплавком Сваллоу заключается в следующем. Перед началом работ на предполагаемом горизонте наблюдений опреде-

яется плотность воды путем измерений там температуры и солености. Регулировка плавучести поплавка нейтральной плавучести осуществляется в соответствии с данной плотностью, после его поплавок опускается в воду.

Регистрация ультразвукового сигнала с поплавка производится парой гидрофонов, опускаемых с носа и кормы судна, что позволяет определить скорость и направление перемещения поплавка в потоке на основе разности времени прихода сигнала, т. е. на расстоянии от поплавка до гидрофонов. Сигналы, принимаемые гидрофонами, регистрируются двухлучевым осциллографом, что позволяет определять запаздывание во времени этих сигналов. По результатам этой регистрации строят полярную диаграмму запаздывания в зависимости от ориентации судна, которая имеет острый минимум в случае, когда линия, соединяющая гидрофоны, нормальна к направлению на поплавок. Подобные измерения повторяются при каждом изменении координат судна. Местоположение судна определяется с помощью реперного буя, координаты которого известны.

Поплавки нейтральной плавучести могут использоваться и при определении вертикальной составляющей скорости потока на глубине. Для решения этой задачи устройство представляет собой оловый шар диаметром 250 мм, в котором размещаются блок питания и генератор ультразвуковых колебаний. Кроме того, снаружи шара установлены акустический излучатель и решетка из аклонных лопастей. Вертикальный поток, действуя на аклонные лопасти, создает вращающий момент, что заставляет шар с излучателем вращаться вокруг собственной вертикальной оси со скоростью, пропорциональной скорости потока. Угловая ориентация такого поплавка передается на судно по гидроакустическому каналу каждые 2 с. Чувствительность подобного устройства составляет 0,028 см/с. Тарировка прибора осуществляется в лабораторных условиях.

Система одноразового использования «Гидробалл» — своеобразный измеритель профиля течения по глубине — состоит из зондирующего устройства сферической формы, сбрасываемого с судна, и бортового устройства гидроакустического слежения за движением зонда. Горизонтальное смещение зонда при его свободном падении зависит от профиля скорости потока воды. Бортовое устройство системы определяет расстояние от судна до зонда, глубину погружения зонда и направление смещения зонда относительно судна. Система работает до глубины 500 м при возможном расстоянии между судном и зондом до 1500 м. При скорости течения более 30 см/с погрешность измерения скорости составляет ± 4 см/с, направления $\pm 10\%$. Скорость падения зонда составляет примерно 0,36 м/с, общее время измерения до глубины 500 м — 3 мин, частота замеров — 1 с. Зонд также обеспечивает измерение и передачу данных о температуре воды в диапазоне от -3 до 7°C с погрешностью $\pm 0,25^\circ\text{C}$.

Донные поплавки Грейга и Вудхеда, обладающие небольшой отрицательной плавучестью, в океанологической практике используются для исследования придонных течений. Поплавок Грейга представляет собой квадратную пластмассовую пластинку с отверстием в центре, через которое пропущен эластичный шнур с медным грузом на конце. Касаясь грузом дна, поплавок, имеющий небольшую отрицательную плавучесть, перемещается по течению. Поплавок Вудхеда изготовлен из полиэтилена грибообразной формы и снабжен шнуром с грузом. Донные поплавки запускаются с расчетом на то, что при ловле рыбы они могут попасть в орудия лова (при измерениях в открытом море) или при

Основные технические хаpa

Изготовитель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Точность	Чувствитель- ность	Осреднение, с
Модель МО-27/2	Скорость течения, см/с Направление течения, ...	0,4—750 0—360	$\pm 0,3$ ± 5	0,3 2	
Модели А-102 и А-850 (система Ричардсона)	Скорость течения, см/с Направление течения, ...°	0,5—250 0—360	$\pm 3 \%$ ± 1	0,5	
«Гидро продукт» Модель 465 А	Скорость течения, см/с Направление течения, ...°	2,5—350 0—360	± 3 ± 5		
«Пикероцикл» Модель 135	Скорость течения, см/с Направление течения, ...° Температура, °С Давление, атм.	2,5—300 0—360 0—30 0—100	$\pm 1 \%$ ± 3 $\pm 0,1$ $\pm 5 \%$		

прибрежных наблюдениях они могут выброситься на берег. Анализ путей и времени перемещения поплавков позволяет судить о характеристиках течения. К недостаткам данного метода следует отнести наличие дрифтности поплавков, что может изменить направление его движения, и весьма небольшой процент возвращения поплавков.

Наибольшее распространение в океанологической практике нашли непосредственные измерители характеристик течений, чаще всего использующие вертушечный метод. Технические характеристики основных представителей приборов данного типа представлены в табл. 5, а отдельные устройства описаны ниже.

Таблица 5

ристки самописцев течений

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Масса в воде, кг	Источник питания	Габариты, мм	Автономность, сут
США							
Импеллер Магнитный компас	Визуальный индикатор, магнитная лента	ЧИМ-сигнал по кабелю	152	5	Аккумуляторная батарея	Длина 483, ширина 203, высота 229	
Ротор Савоннуса Флюгарка, магнитный компас	Фотопленка (А-102) Магнитная лента (А-850)	Нет	6000	70	Батареи		До 105
Ротор Савоннуса Флюгарка, магнитный компас	Диаграммная лента	Нет	12000		Батареи		До 10
Ротор Савоннуса Магнитный компас Термистор Потенциометрический	Магнитная лента	Нет	1000	18	Батареи	Корпус длина 580, Ø 152 Стабилизатор: 457×457	До 250

Изготовитель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Погрешность	Чувствитель- ность	Осреднение, с
Е. Е. Д. Модель СТ/3	Скорость течения, см/с	3—300	$\pm 1,5$	1,2	
	Направление течения, ...°	0—360	± 5	2,8	
	Температура, °С	—2...36,4	$\pm 0,15$	0,15	
«Дженерал оушеникс» Модель 2035 В	Скорость течения, см/с				
Модель 2030	Направление течения, ...°				
Модель 2031					
Крыловидный измеритель течений Нискина	Скорость течения, см/с	0—225	± 4		
Модель 6011-Т	Направление течения, ...°	0—360	± 2		
	Температура, °С	—5...36	$\pm 0,15$		
Велико					
«Того Дентан» Модель СМ-1В	Скорость течения, см/с	8—300	± 5		
Да					
«Маркдан» Миниатюрный измеритель течения модели СД-4	Скорость течения, см/с	0—800		1	60
	Направление течения, ...°	0—360	$\pm 7,5$		
Фран					
Курантограф № 1203 тип Б	Скорость течения, см/с	3—500	± 1		
	Направление течения, ...°	0—360	± 5		

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Масса в воздухе, кг	Источник питания	Габариты, мм	Автономность, сут
Электромагнитные датчики Юнипроуб. Струйный компас Термосопротивление	Дискретно на магнитную ленту	Нет	500	23	Щелочные батареи		До 200
Ротор	Цифровой счетчик	Аналоговая по кабелю	10 без ограничений	1,9 0,25	Батареи	140× ×190 Ø38	
Магнитный компас		То же		1,9 0,25	Батареи То же	Длина 210 Длина 210	
Датчик наклона, рычажный динамометр Три датчика Холла Термистор	Магнитная лента	Нет	600	9	Батареи	Ø105, длина 514	До 360

Британния

Импеллер 6-лопастной	Стрелочный индикатор	Аналоговая по кабелю	200	9,9	Мини-атюрный генератор	Ø150 Длина 430	
----------------------	----------------------	----------------------	-----	-----	------------------------	----------------------	--

ния

Ротор Савониуса Магнитный компас	Магнитная память	Нет	500	2,5	Батареи		16 измерений
--	------------------	-----	-----	-----	---------	--	--------------

ция

Лопастной винт Магнитный компас	Дискретная на фото-пленку	Нет	1000	17	Батареи	Ø320× ×760	До 20
------------------------------------	---------------------------	-----	------	----	---------	---------------	-------

Изготовитель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Погрешность	Чувствитель- ность	Осреднение, с
Я по					
Модель -1	Скорость течения, см/с	3-500	± 1		
	Направление течения, ...°	0-360	± 10		
«Шурупи Сейки» Модель МТСМ-4	Скорость течения, см/с	2-300			
	Направление течения, ...°	0-360			
	Температура, °C	-2...35			
«Огава Сейки» Модель 3216	Скорость течения, см/с	5-300	$\pm 2,5$		180
	Направление течения, ...°	0-360	± 10		
Модель 3256	Скорость течения, см/с	0-300	± 5		
	Направление течения, ...°	0-360	± 5		
	Температура, °C	-2...35	$\pm 0,1$		
Модель 3337	Скорость течения, см/с	2-500	1 %		120
	Направление течения, ...°	0-360	± 5		

Измеритель потока модели CM-1B фирмы «Того Дентан» (Великобритания) предназначен для измерения скорости потока до глубины 200 м в каналах, проливах, гаванях, реках и т. д. с непосредственным отображением результатов и состоит из заборного блока с ПИП, бортового узла индикации и кабель-троса, соединяющего их. Принцип действия заборного блока заключается в следующем. Вращение импеллера под действием набегающего потока с помощью магнитной муфты передается на миниатюрный генератор, находящийся в герметичном корпусе обтекаемой формы, с выхода которого электрический сигнал по кабелю поступает на бортовой индикатор. В конструкции корпуса предусмотрен герметичный ввод кабель-троса, устройство для под-соединения стабилизирующих рулей, рыма для подвешивания груза и специального штока, снимающего натяжение с кабель-троса в месте ввода его в корпус (рис. 16). Выходной сигнал генератора пропорционален числу оборотов лопастного винта (импеллера), которое в свою очередь прямо пропорционально скорости потока.

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Масса в воздухе, кг	Источник питания	Габариты, мм	Автономность, сут
Лопастной винт Магнитный компас	Дискретная на бумажную ленту	Нет	200	33	Батареи	Ø206××946	До 20
Лопастной винт Магнитный компас	Дискретная на бумажную ленту		5000	20	Батареи	Ø150××1100	До 60
Импеллер Магнитный компас	Бумажная лента	Нет	200	33	9 сухих батарей	Ø206××946	До 20
Ротор Савонюса Фототранзистор как магнитный компас	Дискретно-цифровая печать	Нет			16 сухих батарей ИМ-2		
Термосопротивление Импеллер Магнитный компас	Дискретно на магнитную ленту	Нет		33	Аккумулятор	Ø267××970	До 30

Бортовой индикатор представляет собой стрелочный прибор с двумя шкалами (8—150 см/с с ценой деления 5 см/с и 8—300 см/с с ценой деления 10 см/с), а также тумблер для переключения шкал. В комплект прибора входят три типа импеллера, предназначенных для различных скоростей течений.

Измеритель течений модели 3216 фирмы «Огава Сейки» (Япония) предназначен для регистрации скорости и направления течений на глубине до 200 м с автономностью до 20 сут и с дискретностью измерений 20 мин, причем время осреднения (время экспозиции) при измерениях скорости течений составляет 3 мин. Запись получаемой информации о скорости и направлении течения осуществляется на бумажной ленте внутри корпуса прибора со скоростью ее протяжки 15 мм/ч. Питание прибора производится с помощью девяти сухих батарей (одна для питания часового механизма, восемь — для измерителей и регистратора). В комплект прибора входят три типа импеллера с различным шагом для использования их при различных скоростях течений.

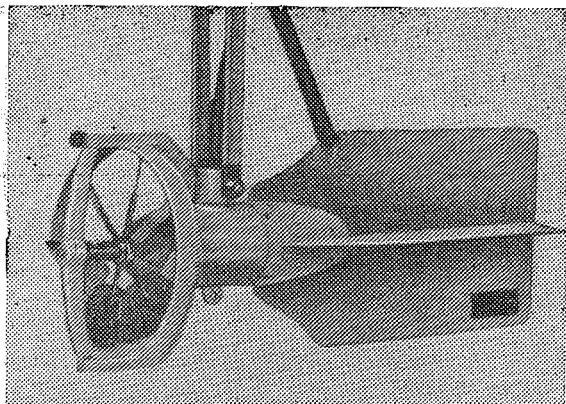


Рис. 16. Измеритель потока CM-1B

Измеритель течений модели МТСМ-4 фирмы «Цуруми Сейки» (Япония) — прибор автономного типа. Прибор оснащен встроенными магнитным микропроцессором, магнитным регистратором информации и измерителем температуры воды. Кроме того, предусмотрен ПИП удельной электропроводности и глубины. Конструкция прибора позволяет проводить измерение характеристик течений в различных модификациях на глубинах до 300, 1000 и 5000 м при 10-минутной дискретности с автономностью до 60 сут. Питание — от батарей. Окончательная обработка результатов измерений производится после подъема прибора на борт судна. Заборная часть прибора имеет возможность через специальное устройство МТПР-3 подключаться к микро-ЭВМ, магнитным регистраторам и графопостроителям.

Миниатюрный измеритель течения модель CD-4 фирмы «Маркдан» (Дания) служит для измерения скорости и направления течений на различных глубинах до 500 м; отличается небольшими размерами и массой, что позволяет использовать его даже с небольших плавсредств. Прибор состоит из электронных блоков и механической части, представляющей герметичный прозрачный цилиндрический корпус высокого давления, к которому крепятся ротор Савониуса, стабилизирующие рули (флюгер) и карданный балансир. Электронная схема, размещенная в корпусе прибора, состоит из электронных контрольных цепей, программирующегося переключателя, электронной памяти, индикатора скорости и направления течения, сенсора для вращения ротора.

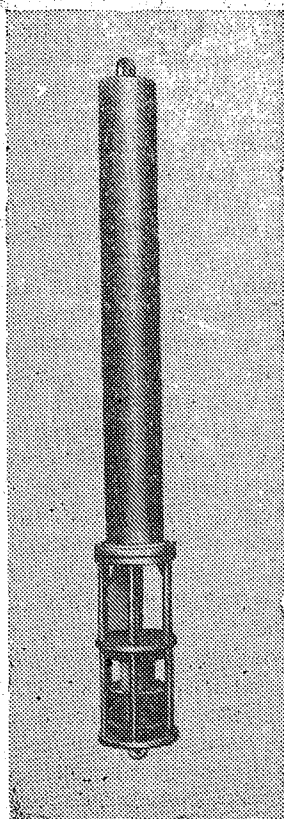
Прибор интегрирует вращение ротора и четыре раза в течение определенного, заранее заданного ($T_i = 25, 50, 100$ или 200 с), периода наблюдений замеряет направление течения. Число подобных периодов может достигать до 16. Дискретность между перио-

Рис. 17. Измеритель характеристик течения модели 3243.

дами наблюдений задается как NT_i , где $1 \text{ с} < N < 99 \text{ с}$. Запуск прибора осуществляется поднесением магнита к позиции «Старт» на внешней стороне корпуса измерителя, после чего включается программа, и прибор начинает предварительный отсчет. После окончания времени дискретности (NT_i) прибор начинает процесс измерения в течение T_i , по окончании которого информация заносится в память. Память полностью заполняется после выполнения 16 циклов наблюдений, и программа заканчивается. Подняв прибор на борт судна, поднесением магнита к позиции «READ» на внешней стороне корпуса, включают индикатор, показывающий средние скорость и направление течения за время T_i . Очередное поднесение магнита к позиции «Старт» стирает старую информацию в памяти прибора и запускает программу для нового цикла работы.

Измеритель скорости и направления течения модель 3243 фирмы «Огава Сейки» (Япония) предназначен для автономной работы на глубине до 7000 м (рис. 17). Кроме того, устройство позволяет производить измерения температуры воды в диапазоне $0-30^\circ\text{C}$ с разрешающей способностью $0,01^\circ\text{C}$ и солёности в диапазоне $10-35\text{‰}$ с разрешением $0,01\text{‰}$. Получаемая информация записывается на ферромагнитную ленту, а также по гидроакустическому каналу связи подается на буй, через который по радиоканалу может передаваться на специализированный ИСЗ или на судно-базу, где она вводится в компьютер, в цифропечать и графопостроитель. Подобная линия связи и система судовой обработки получаемой информации предусмотрена также и для измерителей данной фирмы моделей 3244 и 3245.

Крыловидный измеритель течений Нискина модель 6011-Т фирмы «Дженерал оушеникс» (США) предназначен для измерения скорости и направления течения и температуры воды. Крыловидная форма измерителя способствует его стабилизации и ориентации в потоке. Основной частью прибора являются три твердых ПИП, использующих эффект Холла. Один из датчиков ориентирован по продольной оси прибора, а остальные — располагаются



перпендикулярно друг к другу в плоскости, нормальной к продольной оси. Подобная ориентация ПИП образует прямоугольную систему координат, дает векторные компоненты магнитного поля Земли и позволяет определить относительное направление потока, в котором расположен крыловидный измеритель. Скорость потока определяет степень отклонения от вертикальной оси измерителя ПИП наклона и рычажный динамометр. Прибор может работать с предельным наклоном под действием потока до 90° в течение 12 месяцев с определенной, заранее заданной дискретностью (1,3; 2,6; 5,3 и 10,6 с) и с временной погрешностью ± 1 с/сут. Вся получаемая информация заносится на магнитную пленку в кассетах (обычно фирмы «Филлипс»). Окончательная обработка результатов наблюдений производится в бортовом блоке, в состав которого входит: интерфейс-6000; микро-ЭВМ-6900; банк программ; соединительный кабель; терминал-6950 с дисплеем и клавишной панелью.

Система измерений параметров течения модели СТ/3 фирмы Е. Е. Д. (США) включает в себя современный автономный измеритель течения в виде электромагнитных датчиков, струйного компаса и ПИП температуры; портативный блок калибровки и операционной поверки для срочного теста и эксплуатации измерителя FC/1; кассетный магнитофонный блок TR/2, обеспечивающий обработку и индикацию результатов наблюдений; жестко укрепленную электронную схему; стандартный пакет программного обеспечения, позволяющий обрабатывать получаемую информацию на промышленных компьютерах; часы на кристаллах и блок питания.

Измеритель СТ/3 — одноосевой прибор, использующий электромагнитный принцип для регистрации скорости течения. Корпус прибора имеет торпедообразную форму с хвостовым оперением и оригинальную жесткоосевую подвеску, обеспечивающую устойчивую горизонтальную ориентацию при наклонах несущего троса до 35° в любом направлении, а также быструю и легкую подвеску прибора к тросу (рис. 18). К недостаткам устройства можно отнести его относительную чувствительность к вертикальному компоненту течения, движениям несущего троса и случайным возмущениям потока. Инерция корпуса и большой вертикальный киль позволяют прибору механически суммировать высокочастотные изменения течения.

СТ/3 определяет скорость течения с помощью пары электромагнитных датчиков системы ЮНИПРОУБ, размещенных диаметрально противоположно друг другу. Каждый подобный датчик содержит электромагнит, устанавливающий в воде снаружи корпуса прибора точно сориентированное магнитное поле. Движение воды в потоке вдоль оси измерителя создает разность потенциалов, пропорциональную скорости течения. Это позволяет проводить измерения в подповерхностном слое, прибрежной зоне, а также в знакопеременных течениях, в которых наиболее широко используемые приборы вертушечного типа измерений не проводят.

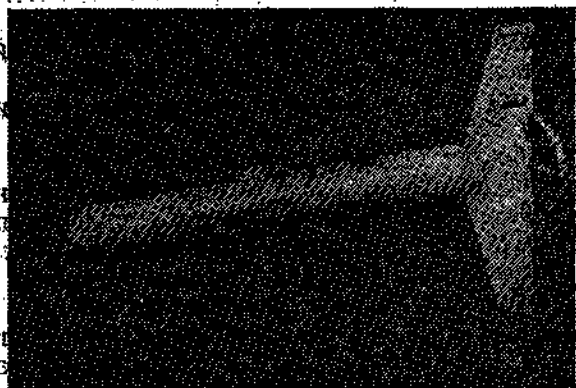


Рис. 18. Система измерений параметров течения модели СТ/3.

Направление течения определяется с помощью феррозондового струйного компаса, когда струя потока проходит внутри корпуса до специальному каналу, что обеспечивает последовательно точную регистрацию направления прибора. Он улавливает ориентацию СТ/3 по отношению к магнитному полю Земли, преобразует это магнитное направление в электрический сигнал, доступный для записи.

Первичный измерительный преобразователь температуры — термистор — контролирует внешнюю температуру воды и создает соответствующий электрический сигнал для записи параллельно другим данным. Точная временная привязка обеспечивается твердо-корпусными часами на кристаллах, которые срабатывают в начале измерительного цикла.

Время, температура и характеристики течения записываются СТ/3 в серийной форме NRZI на 2-дорожечную магнитную ленту. Дискретность измерений может задаваться заранее от практически непрерывной регистрации до 255 мин с приростом в одну минуту. Автономность работы прибора может быть от одной недели до 6—8 месяцев.

Акустический измеритель течений фирмы «Нейл Браун» (США) является автономным прибором и предназначен для измерения скорости течения в диапазоне 0—250 мм/с с погрешностью ± 1 см/с и с постоянной времени 0,2 с; направления течения от 0 до 360° с погрешностью $\pm 2^\circ$ для течений, скорость которых превышает 10 см/с, а для остальных $\pm 5^\circ$ с постоянной времени 0,2 с; температуры воды в диапазоне $-2,4$ — $35,8^\circ\text{C}$ с погрешностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и с постоянной времени 5 мин на различных глубинах до 6000 м с автономностью до 12 месяцев. Измеритель состоит из акустических датчиков течения, компаса-магнитометра, ПИП температуры, магнитного регистратора, кварцевых часов и блока пи-

тания. Потребляемая мощность устройства 0,05 Вт. В комплект прибора входит также интегрирующее устройство, позволяющее за определенный интервал времени (от 1 до 15 мин) получить осредненный вектор течения. Заборное устройство массой 43 кг на воздухе и 22 кг в воде имеет следующие габариты: диаметр 77 мм и длину 525 мм.

Прибор работает следующим образом. На вход излучающего электроакустического преобразователя *A* подается сигнал с генератора, вырабатывающего электрические колебания с несущей частотой 1,6 МГц. Электроакустический преобразователь излучает в морскую воду узкий, с угловой шириной 1° , пучок акустической энергии, подающийся на акустическое зеркало *C*. Отразившись от зеркала, пучок попадает на приемник *B*. Затем от электроакустического преобразователя *B* пучок таким же образом попадает на приемник *A*. Пучок акустической энергии при движении в ту или иную сторону, встречаясь с течением, будет изменяться по фазе, а потоки, перпендикулярные плоскости расположения электроакустических преобразователей и зеркала, не учитываются. Разница сигналов, приходящих от *A* и *B*, будет являться функцией частоты, расстояния между излучателями — приемниками, скорости звука в воде и скорости течения. Отсюда неизвестным фактором является лишь скорость течения.

Заборный блок измерителя течения имеет специальный ввод для подключения аппаратуры, обеспечивающей поверку прибора и обработку получаемой информации. Считывание данных с магнитной ленты осуществляется устройством «Мимодайн», предназначенным для преобразования данных в 8-разрядный код ИЕЕЕ-448 и устройством «Си-Дата», обеспечивающим 16- и 8-разрядные выводы информации на соответствующих кассетах. В дальнейшем эта преобразованная информация может обрабатываться с использованием вычислительных средств СТД-системы «Нейл Браун».



Глава 4. Приборы и методы наблюдений за волнением

4.1. Методы измерения характеристик волнения

Волнение поверхности моря является океанологическим параметром, который с давних пор интересует людей, связанных с морем. Воздействию ветровых волн и зыби подвергаются в первую очередь плавающие в море суда и различные сооружения, находящиеся в прибрежной черте. Кроме того, поверхностное волнение оказывает влияние на формирование квазиоднородного слоя, передачу энергии, интенсивность и глубину перемешивания, интенсивность газообмена океана с атмосферой, на проникновение загрязняющих веществ с поверхности моря в глубинные слои, на изменение отражательной способности морской поверхности, что

особенно сказывается при использовании неконтактных методов исследования океана, и т. д. Поэтому данные о ветровом волнении и зыби необходимы для многих практических целей (судостроение, гидротехническое строительство на морях, навигация, рыбный промысел, расчет гидрофизических, гидрохимических процессов в океане и т. д.). Размеры, форма волнения, скорость их передвижения, т. е. в основном все элементы волн, зависят от целого ряда внешних причин: от силы и продолжительности ветра, от формы и размеров исследуемой акватории и т. д. Исследование этих зависимостей крайне необходимо для решения основной задачи океанологии в этой области — для прогноза и расчета волнения в различных, но конкретных условиях. Решение этой задачи требует, естественно, законченной теории образования и развития волнения, для чего крайне необходимо проведение непосредственных наблюдений в море.

4.2. Инструментальные методы измерения элементов волн

Инструментальные измерения элементов морских волн выполняются с помощью специальной волноизмерительной аппаратуры, позволяющей регистрировать величины, характеризующие волновые движения, или измерять их элементы. Для статистической обработки при измерении элементов волн необходима регистрация совокупности не менее 150—200 волн, следующих друг за другом. Поэтому при среднем значении периода волн 4—8 с длительность измерений волнения в точке должна быть не менее 15—25 мин, причем необходимо учитывать, что при развитии и затухании штормового волнения измерения следует производить с дискретностью 1—3 ч.

В настоящее время существует большое количество разнообразных методов и приборов для исследования морского волнения. Остановимся на классификации методов измерения волнения, в основу которой положены характер информации о волнении («класс приборов») и способ ее получения («группа приборов»). На этой основе можно выделить четыре класса приборов:

- 1) для измерения волновых возвышений и гидростатического давления;
- 2) для измерения элементов морских волн (средних высот и периода волн, характерной высоты волн и т. д.);
- 3) для измерения дифференциальных характеристик волнения — наклонов и кривизны, орбитальных скоростей — продольной, поперечной и вертикальной составляющих;
- 4) для получения частотных и пространственных спектров волнения.

Измерение волновых возвышений и гидростатического давления

Электродные волнографы включают в себя приборы, первичными измерительными преобразователями которых являются один

или два электрода, погруженных вертикально в воду. По принципу измерения можно различить следующие типы электродных волнографов.

Струнные (резистивные) волнографы предназначены для непрерывной записи профиля волн в выбранном масштабе. Датчиком таких волнографов является неокисляемая в морской воде проволока с большим удельным сопротивлением, натянутая обычно на жесткую опору, устанавливаемую в прибрежных районах. Проволока заглубляется в воду примерно на половину своей длины. Морская вода служит проводником с малым активным сопротивлением, когда

$$\frac{\gamma}{\epsilon\omega} \gg 1, \quad (54)$$

где γ — удельная проводимость морской воды, $4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость морской воды, $7 \cdot 10^{-2} \text{ Ф/см}$; ω — угловая частота переменного тока, рад/с. Экспериментально доказано, что для питания проволочного датчика оптимальная частота тока f может колебаться в пределах $5\text{--}8 \text{ кГц}$. Для питания измерительной схемы используют ток высокой частоты, что устраняет обрастание электродов, поэтому, зная, что $\omega = 2\pi f$, и выбрав $f = 5000 \text{ Гц}$, получим $\omega = 31\,400 \text{ рад/с}$. Отсюда

$$\frac{\gamma}{\epsilon\omega} = 1,82 \cdot 10^5 \gg 1, \quad (55)$$

т. е. можно сказать, что в данном случае вода для токов звуковой частоты представляет собой короткозамкнутый провод (изменение расстояния между двумя нихромовыми проволоками в морской воде от 0 до 25 м не изменяет сопротивления между ними более чем на 0,5 Ом). Таким образом, измерение ее сопротивления соответствует профилю проходящей волны.

Использование струнных волнографов по подобной схеме позволяет выполнять измерение низкочастотной составляющей поверхностного волнения. Высокочастотная же составляющая волнения в этом случае является как бы паразитными шумами. В США для исследования уже непосредственно высокочастотной составляющей поверхностного волнения был разработан телеметрический струнный волнограф. В нем использовалось несколько струн, изготовленных из нержавеющей стали диаметром 0,38 мм, длиной около 9 м и скомпонованных по группам. Каждая группа состояла из трех штук, расположенных по прямой на расстоянии 15 см друг от друга. Причем вертикальная плоскость расположения каждой из групп составляла 90° по отношению к другим группам. Подобное расположение струн позволило проводить измерение не только амплитуды и периода волнения в диапазоне частот 0—10 Гц, но и наклон волны с точностью до 2° . Следует отметить, что для успешной эксплуатации такого прибора необ-

ходимы специальные схемные решения, тщательный расчет измерительной цепи и трудоемкая калибровка.

6. Электроконтактные волнографы являются частным случаем резистивных волнографов. Их датчиком является жесткая рейка с укрепленными на ней на определенных расстояниях контактными пластинами, причем интервал между отдельными контактами выбирается в зависимости от требуемой разрешающей способности измерений. Между контактами рейки включены постоянные сопротивления. При прохождении волны морская вода закорачивает часть контактов рейки пропорционально уровню, тем самым изменяя суммарное сопротивление цепочки последовательно соединенных резисторов. При уменьшении расстояния между контактами данный волнограф приближается по своим характеристикам к струнным волнографам, дающим непрерывную запись. С помощью кабеля рейка связана с регистратором, реагирующим на изменение сопротивления. Запись профиля волны производится в виде дискретных ступенек. Обычно рейка устанавливается так, чтобы около трети ее контактов были постоянно замкнуты при отсутствии волнения.

Миязаки (Япония) приводит описание весьма перспективного варианта электроконтактного волнографа, в котором контакты изолированы от воды. Этот датчик представляет собой элемент сопротивления, заключенный в герметичный кожух. Датчик начинает работать при сжатии гибкого внешнего кожуха с внутренним токопроводящим слоем под воздействием столба воды переменной высоты таким образом, что внутренние чувствительные элементы замыкаются на общий проводник. Точность элемента в собранном виде составляет 75—150 контактов на 1 м. Этот тип датчика уменьшает ошибку, связанную с коррозией, обрастанием, нефтяным загрязнением и опасностью механического повреждения. Все это увеличивает долговечность и надежность волнографа.

К волнографам этого типа относится и выпущенный в США небольшой серией радиоволнограф «Волновая вежа». Чувствительным элементом данного волнографа служит длинный изолированный металлический стержень с рядом контактов, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Стержень укреплен на несущей малоподвижной базе — притопленном, свободно плавающем поплавке. Поплавок состоит из нескольких секций пустотелых загерметизированных труб диаметром 150—200 мм и общей длиной 20 м. Несмотря на громоздкость механической системы передающей части, волнограф рассчитан на измерение волн высотой до 4,5 м. Это объясняется тем, что с увеличением амплитуды волн резко возрастают синхронные колебания несущего поплавка, снижающие точность измерения. Передача получаемой информации осуществляется по радиоканалу на волне 56 м, для чего на несущем буре смонтированы измерительная схема, схема вторичного преобразования и радиопередающая аппаратура.

Точность и разрешающая способность резистивных и электроконтактных волнографов зависят от стабильности и разрешающей способности источников питания, от точности регистрации напряжения и используемых регистраторов, а также от диаметра перемещающего измерительного преобразователя.

Емкостной волнограф в простейшем виде представляет собой изолированный, например, каким-либо полимером токопроводящий стержень с загерметизированным нижним концом, помещенным в морскую воду. Система морская вода — диэлектрик — проводник образует своеобразный конденсатор, емкость которого меняется от степени погруженности стержня в зависимости от прохождения профиля волны, т. е. зависит от площади обкладок и прямо пропорциональна профилю волны. Если этому конденсатору сообщен определенный известный заряд q , то с изменением емкости C изменится и напряжение

$$U = \frac{q}{C}. \quad (56)$$

Датчик емкостного волнографа может быть включен в мостовую схему, где изменение реактивного сопротивления емкости конденсатора обуславливает разбаланс моста. Но, по-видимому, наиболее перспективен метод регистрации емкости конденсатора путем определения изменения частоты генератора, в котором этот конденсатор является элементом задающего колебательного контура, собственная частота которого определяется выражением:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (57)$$

где L — индуктивность контура.

Для плоского конденсатора

$$C = 9 \cdot 10^{-5} \frac{\varepsilon S}{4\pi d}, \quad (58)$$

где C — емкость, мкФ; S — площадь одной пластины конденсатора, см²; ε — диэлектрическая проницаемость; d — расстояние между пластинами, см. Правда, для конденсатора с криволинейными обкладками, как в нашем случае, эта зависимость оказывается более сложной. Но, несмотря на это, имеется зависимость между емкостью конденсатора и размером зазора с площадью обкладки, которые в свою очередь линейно связаны с профилем волны.

Основное требование к емкостным волнографам — линейное изменение сигнала на выходе от профиля волны. Емкостной волнограф должен иметь небольшой диаметр для уменьшения погрешностей, обусловленных поверхностным натяжением воды, которое вызывает небольшую разность при измерении емкости в случае быстрого прохождения волны. Это особенно важно при измерении элементов волн в более высокочастотной части спектра. При-

мером использования емкостных первичных измерительных преобразователей в океанографической практике могут служить два разработанных в США волнографа.

Емкостной датчик для регистрации волн представляет собой стальной стержень диаметром 1,6 мм и длиной 16 см, покрытый полистиролом. При погружении его в воду образуется система — конденсатор (стержень — полистирол — морская вода), емкость которого пропорциональна длине погруженной части стержня. Этот прибор предназначен для измерения высот небольших ветровых волн. Изменение высоты волн воздействует на емкость датчика, определяющую частоту блокинг-генератора. Погрешность измерения не превышает 6 % для частот 0—28 Гц. Широкий динамический диапазон электронной аппаратуры позволяет производить измерение ряби с постоянной точностью независимо от степени волнения на море. Основным недостатком датчика является то, что он не может быть установлен на судне; для его установки необходима неподвижная опора.

Телеметрический поплавковый волнограф с емкостным датчиком позволяет производить измерения в основном капиллярных и гравитационных волн. В качестве несущего элемента буя использована труба длиной 4,8 м, неподвижно соединенная в нижней части с пластиковым баллоном, заполненным пенопластом. Баллон обеспечивает положительную плавучесть буя. Около 1,2 м трубы находится над поверхностью воды. На верхнем конце трубы закреплена перекладина длиной 107 см со смонтированным электронным оборудованием и блоком батарей питания. Между концами перекладины и опорой баллона с одной стороны натянут изолированный электрический провод, а с другой — эластичный шнур длиной 3 м каждый. Провод имеет емкость 5 пФ на каждый сантиметр длины проволоки, находящейся в воде. Измерительная проволока входит в резонансный контур генератора со средней частотой 2 мГц. Частота генератора меняется с изменением длины части проволоки, погруженной в воду. Частотно-модулированный сигнал усиливается и подается на антенну, укрепленную вертикально в середине трубы. В существующем виде может быть использован для измерения длин волн от 1—2 см до 7,5 м. При измерении более длинных волн необходимо введение поправок на явление резонанса. Частотно-модулированный сигнал принимается на судне приемником и записывается на магнитную ленту для последующей обработки.

Индукционные волнографы обычно состоят из катушки с высокой проницаемостью материала магнитопровода и малым воздушным зазором между ним и мембраной. При этих условиях индуктивность катушки оказывается обратно пропорциональной размеру зазора. При прохождении профиля волны колеблется размер зазора, т. е. меняется индуктивность первичного преобразователя, что вызывает, например, перестройку резонансной частоты контура, которая в свою очередь уже пропорциональна волно-

вому возвышению. Известен индуктивный волнограф, датчик которого представляет так называемый дифференциальный трансформатор с подвижным якорем, связанный через мембрану с небольшим поплавком, реагирующим на прохождение волны. Перемещения поплавка вызывают отклонения якоря от положения магнитного равновесия, что в свою очередь вызывает изменение электрического сигнала. Пределы измерений высоты волны данного волнографа 0,1—2,5 м с точностью не хуже 5%.

Следует отметить, что лучшие образцы электродных волнографов представляют собой эталонные приборы в волноизмерительной технике.

Поплавковые волнографы. Характеристики поверхностного волнения наиболее удобно измерять плавующим поплавком в качестве датчика. Поплавок обычно изготавливается в форме вертикального цилиндра и крепится на жестких пружинах. Переменная архимедова сила, действующая на поплавок при прохождении профиля волны, воспринимается пружинами и преобразуется в непрерывную запись колебаний волнового уровня. Правда, использование этого метода не позволяет производить измерения в высокочастотной части спектра.

В качестве примера приведем волнограф типа Вемельсфельдера с механической передачей перемещений небольшого поплавка, помещенного в перфорированную трубку, при прохождении волнового профиля на регистратор.

Волноизмерительный буй фирмы «Bass Engineering» (США) представляет собой систему измерений высоты поверхностных волн, основным элементом которой является буй, следящий за колебаниями поверхности моря. Линия, к которой подвешен буй, содержит упругий элемент, связанный с силовым датчиком. Электрический сигнал пропорционален вертикальному смещению буя. После преобразования сигнал по радиоканалу передается на береговую станцию или на борт судна-базы. Приемная часть системы, в частности, содержит цифровые и аналоговые регистрирующие устройства, а также систему дистанционного автоматического контроля.

Измерители гидростатического давления. Измерение давления осуществляется датчиками, расположенными на дне при небольших глубинах или находящимися в фиксированном положении ниже поверхности воды. Для измерения волнения используются следующие типы датчиков гидростатического давления: тензометрический и вибротонный, а также сравнительно новый тип — туннельный диод. В океанологической практике обычно по записи давления восстанавливают элементы волнения — средние высоты и период волн.

Тензометрический датчик давления представляет собой или толстый проводочный проводник, или тонкую металлическую пленку (20—50 мкм), напыляемую на непроводящую подложку, которые приклеивают к упругому элементу. Тензометр обычно жестко

связан с мембраной, используемой в качестве упругодеформирующего элемента. Мембрана расположена в устройстве таким образом, что с одной стороны на нее действует измеряемое меняющееся давление, а с другой — некоторое постоянное давление. Проходящий профиль волны на водной поверхности вызывает изменение гидростатического давления над тензометрическим датчиком, что вызывает колебание мембраны, передающееся жестко связанному с ней тензометру. Деформация тензометра проявляется изменением его длины и площади поперечного сечения, т. е. его электрического сопротивления.

В последнее время широкое применение находят полупроводниковые тензопреобразователи, чувствительность которых на два порядка выше, чем в тензометрах на металлической основе. Вместе с наклеиваемыми тензометрами используют диффузионные и этипаксиальные тензосопротивления, позволяющие уменьшить габариты приборов (собственно чувствительный элемент имеет размеры порядка сотен мкм), повысить точность измерения за счет отсутствия клеевого соединения и создать монокристаллический упругий элемент с высокими метрологическими характеристиками (стабильность свойств, отсутствие гистерезиса деформации при рабочих температурах, большой размер упругой деформации, достигающий 2,6 % и т. д.).

Тензометрические датчики давления благодаря своей простоте, надежности и высоким метрологическим данным нашли довольно широкое применение в океанологической практике. Можно привести следующие примеры использования датчиков данного типа в волнографах.

Волнограф модели Q-6 фирмы «Marine Advisers» (США) представляет собой многоцелевой несложный в эксплуатации прибор для измерения и регистрации поверхностного волнения. Волнограф состоит из подводного датчика, программного устройства, источника питания и ленточного регистратора. Питание подается с берега. В приборе использован датчик модели А-2В, состоящий из двух наполненных маслом камер, соединенных капилляром и параллельной ему более широкой трубкой; дифференциального преобразователя давления, имеющего по одному соединению с каждой камерой. При медленном изменении давления происходит взаимная компенсация, а быстрые изменения создают разность давлений, регистрируемую преобразователем давления, представляющего собой тензосопротивление в 300 Ом. Сигнал с датчика достигает ± 25 мВ. Для получения значений высот волн используется специальный график.

Регистратор длинных волн модели А-1 той же фирмы аналогичен предыдущей конструкции. Датчик представляет собой два резервуара, соединенных парой капилляров. Вся система заполнена маслом. Быстрые изменения гидростатического давления взаимно компенсируются, а медленные воздействуют на дифференциаль-

ный тензометрический датчик. Регистрируются периоды волн 2—30 мин. Прибор снабжен градуировочным графиком.

Регистратор волн модели 521 фирмы «Гидро продукт» (США) предназначен для измерения высоты и периода поверхностного волнения при температуре окружающей среды от -10 до 50°C . Волнограф является абсолютно автономной системой и включает в себя тензометрический датчик на полупроводниковых элементах, преобразователь, самописец с записью результатов измерений на ленте и блок питания. На ленте самописца воспроизводится легко воспринимаемая аналоговая запись средних характеристик высот волн 0—3 м для средних периодов волн 5—20 с. Непрерывная запись амплитуды волны осуществляется в течение 400 с каждые 1000 с. В течение этого промежутка времени определяется средний период волны по среднему времени между двумя моментами пересечения волной нулевого уровня. Точность регистрации и степень разрешения по всем измеряемым параметрам составляет $\pm 2\%$ от всей шкалы, а точность по времени в пределах $\pm 10\%$, причем данные о высоте волны автоматически корректируются установкой глубины датчика.

Измерительная схема волнографа помещена в анодированную алюминиевую сферу, состоящую из двух разделяемых полусфер с фланцевым соединением. Полусферы анодированы для предотвращения обрастания, подвергнуты термообработке и покрыты изнутри и снаружи эпоксидной смолой и краской. Диаметр сферы 273 мм, а толщина стенок 12,7 мм. В рабочем положении для удобства эксплуатации сфера помещается в стальную поддерживающую раму, снабженную приспособлением для установки сферы в необходимом положении по отношению ко дну. Высота рамы 667 мм, а длина и ширина составляет 508 мм. Автономность работы волнографа 7 сут, а в случае использования внешнего контейнера с дополнительным блоком питания автономность работы увеличивается до 30 сут. В качестве источника питания используются никель-кадмиевые батареи. Волнограф устанавливают на глубину не более 15 м. Причем его можно устанавливать на дно (рис. 19) или на АБС на большой глубине.

Более высокая точность измерения характеристик волнения (не хуже $\pm 1\%$ от всей шкалы) достигнута в аналогичной системе, выпускаемой также фирмой «Гидро продукт» (США), дистанционный анализатор волн модели 621—S.

Вибротронный датчик давления (вибротрон), или струнный преобразователь, представляет собой датчик, в котором изменение размера прогиба мембраны из-за флуктуаций гидростатического давления меняет удлинение туго натянутой струны и частоту ее собственных колебаний.

Благодаря своей простоте и надежности вибротронные датчики давления нашли использование и в океанологической практике, в частности для измерения характеристик волнения. Так, в США был разработан береговой волнограф с датчиком давле-

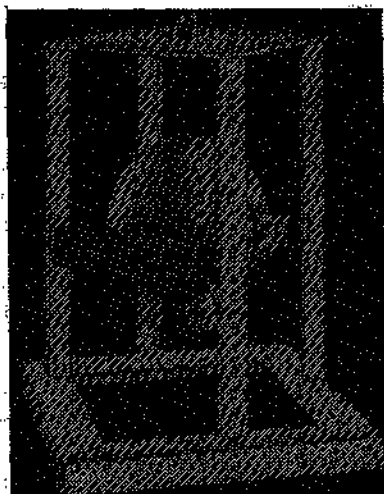
Рис. 19. Волнограф модели 521.

ния, предназначенный для регистрации длиннопериодных волн малой амплитуды. Он позволяет регистрировать колебания давления с амплитудой 1 мм водяного столба при глубине погружения датчика на несколько сотен метров в области частот 0,0002—0,1 Гц. На берегу или на борту судна определяют частоту колебаний струны вибротрона, зависящую от профиля проходящей волны, и регистрируют ее в форме, удобной для дальнейшей обработки. Для получения подобной точности чувствительный элемент требует термостатирования или термокомпенсации (различие теплового коэффициента расширения материала струны, мембраны и самого корпуса — один из существенных источников погрешности измерений) и тщательной калибровки. Цифровая регистрация и обработка данных осуществляется на ЭВМ путем подсчета числа циклов выходного напряжения вибротрона за единицу времени.

Туннельный диод является весьма перспективным прибором для измерения гидростатического давления, тем более, что это позволяет получать преобразователи очень малых размеров (линейный размер менее 1 мм) и с частотным выходом. В этом случае частота может быть линейной функцией гидростатического давления.

Буйковые волнографы. При использовании волнографов подобного типа первичные измерительные преобразователи характеристик поверхностного волнения или располагают на бую, плавающим на поверхности, или подвешивают к нему. По принципу действия выделяются следующие системы.

Буйки с подвешенным датчиком волнения используются в основном при расположении датчика гидростатического давления на глубине более половины длины волны. Это вызвано тем, что ветровое волнение на такую глубину не проникает и гидростатическое давление там постоянно. Оно не зависит от состояния водной поверхности, а датчик давления, подвешенный к бую на такой глубине, воспринимает лишь вертикальные перемещения бую как изменения глубины погружения относительно уровня моря, т. е. как изменения гидростатического давления, пропорциональные проходящему профилю волны. Передача сигнала на борт суд-



на может осуществляться или по кабелю (волнограф ГМ-16, СССР) или по радиоканалу («Метеобуй», США и волнограф ГМ-32, СССР).

«Устройство для исследования волн» (патент США № 3449950) относится к подобному типу систем. В этом устройстве на бую с большим запасом плавучести размещен радиопередатчик с преобразователем и блоком питания. Датчик гидростатического давления тензометрического типа с помощью гибкого кабеля подвешивается под буюм на определенной, заранее заданной, глубине. Получаемая информация по радиоканалу передается или на береговую базу, или на борт судна, где эта информация преобразуется в электрические величины, удобные для дальнейшей обработки и регистрации. При использовании волнографов такого типа могут возникать значительные погрешности, так как в этом случае предполагается, что система буй — кабель — датчик колеблется под воздействием волн строго в вертикальном положении. На самом деле из-за воздействия орбитального движения частиц воды и особенно в результате ударов разрушающихся гребней волн буй совершает также колебания в горизонтальной плоскости (до 15 м). Вследствие гибкости кабеля и довольно большого сопротивления его и датчика горизонтальному движению в воде система буй — кабель — датчик не будет сохранять вертикальность, и при измерении высоты волн появляется дополнительная погрешность, которую иногда называют орбитальной. Эксперименты и расчеты показывают, что эта погрешность может достигать 5—10 %. Эта величина случайная в силу случайного характера воздействия на буйковые системы.

При исследовании характеристик волнения можно также использовать волнографы, регистрирующие сами вертикальные перемещения буя. Для этой цели к бую на глубину, превышающую половину длины волны, подвешивают датчик в виде турбинки с вертикальной осью. С помощью этой турбинки и измеряют вертикальные смещения буя.

Кроме того, регистрировать вертикальные перемещения буя можно путем измерения колебания атмосферного давления с помощью барографа, установленного на этом бую. Такие приборы, представляющие в сущности разновидность барометра, недороги и сравнительно просты в эксплуатации. Еще в конце двадцатых годов В. В. Шулейкин предложил прибор, использующий указанный принцип. Но в то время он не нашел широкого применения. В настоящее время используется буй с установленным на нем микробарографом (США), позволяющим сразу измерять волновое возвышение $\eta(t)$. Микробарограф снабжен специальными испарителями для капель воды, проникших через отверстия внутри прибора, что в свою очередь вносит погрешность за счет избыточного давления паров воды и колебания температуры воздуха вблизи мембраны.

Волнографы, регистрирующие ускорение волнового движения, включают в себя буй с установленными на нем стабилизированными по вертикали датчиками вертикального ускорения (с пределами измерения $\pm 2g$) — акселерометрами. После двойного интегрирования по времени сигнал с акселерометра позволяет судить о высоте поверхностных волн. Акселерометры устанавливаются на бую, так как предполагается, что движения бую в точности следуют волновым движениям. Надежность работы измерительной схемы этого типа приборов достигается еще и тем, что вся аппаратура помещается внутри бую и изолирована от контакта с внешней средой. Такие буи обладают автономностью работы вплоть до года, автоматически передавая с заданной дискретностью по времени сведения о волновых колебаниях водной поверхности. В океанологической практике подобные акселерометрические буи используются в различных видах — дрейфующие, теряемые, привязные (к судну или несущему бую), заякоренные, с кабельной и радиосвязью. К волнографам данного типа можно отнести следующие.

Буйковый волнограф с телеметрической передачей информации разового действия «Splashnik» относится к первым волнографам такой системы и является небольшим легким и недорогим буйковым волнографом, обеспечивающим приемлемую точность. Буй изготовлен в виде плота из пенопласта, покрытого фибerglassовой пленкой, пропитанной эпоксидной смолой. В центре плота размером 1×1 м и толщиной 76 см сделан квадратный вырез размером $0,3 \times 0,3$ м. В вырез помещается деревянный водонепроницаемый ящик с аппаратурой. На крышке ящика монтируется мачта с передающей антенной на конце. Вертикально расположенный акселерометр представляет собой консольный рычаг, демпфируемый магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом. Конец консольного рычага находится непосредственно вблизи от резонансного контура генератора со средней частотой 69 МГц и выполняет роль подстроечной емкости этого контура. Ускорению, равному $1/2$ силы тяжести, соответствует изменение частоты на 50 кГц, а с помощью схемы, собранной на одной миниатюрной радиолампе, частота сигнала увеличивается до 138 МГц. Затем сигнал усиливается и по коаксиальному кабелю подается на антенну. Питание схемы осуществляется одной 3-вольтовой батареей накала и шестью 45-вольтовыми батареями, обеспечивающими анодное и экранное напряжение в течение 8 ч работы, после чего их необходимо заменить.

Приемная антенна и приемник частотно-модулируемых сигналов располагается на борту судна, где частотно-модулируемый сигнал преобразуется в постоянное напряжение, пропорциональное ускорению, действовавшему на акселерометр. Сигнал, принятый на судне, содержит высокочастотную составляющую, обусловленную воздействием на плот короткопериодных волн, практически не сказывающихся на качке судна. Поэтому на выходе

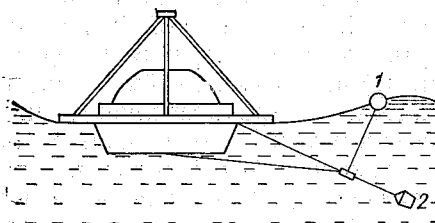


Рис. 20. Буйковый автономный волнограф.

1 — поддерживающий буй, 2 — плавучий якорь.

приемника ставится фильтр низких частот с верхним пределом полосы пропускания 0,3 Гц, устраняющий нежелательные высокочастотные составляющие сигнала и тем самым позволяющий регистрировать необходимую информацию. Данные измерений записываются на магнитную ленту.

Волнограф рассматриваемого типа, находясь на склоне волны, измеряет результирующее ускорение, являющееся суммой ускорения свободного падения и ускорения, вызванного движением плота, имеющего горизонтальную составляющую. Таким образом, измеряемое ускорение перпендикулярно плоскости плота, что при волнении 6 баллов вызывает среднеквадратическую ошибку измерений высоты волны примерно 4 %. Результаты измерений также содержат ошибку, вызываемую дрейфом буя. Но обычно дрейф бывает достаточно медленным, и эта ошибка пренебрежимо мала.

Кроме того, к дефектам волнографа можно отнести уход частоты передатчика, что требует периодической подстройки приемника. А различные механические неполадки требуют регулярных осмотров и наладок. Но все эти недостатки искупаются простотой и невысокой стоимостью оборудования.

Буйковый автономный волнограф фирмы «Environmental Devices Corp.» (США) позволяет выполнять регистрацию волн в одной более или менее фиксированной точке в течение значительного времени. Корпус буя волнографа выполнен из литого алюминия с максимальным диаметром 1,8 м и высотой 0,3 м. В него помещаются блок питания, вертикальный акселерометр, гироскопы для измерения бортовой и килевой качки, микробарограф, электрическая схема, многоканальный самописец с фоторегистрацией и программный часовой механизм. Буй устанавливается против ветра с помощью небольшого плавучего якоря (рис. 20). Подобная схема постановки дает удовлетворительные результаты при ветре до 7 баллов. Акселерометр, помещенный в водонепроницаемом корпусе, аналогичен акселерометру, используемому в судовом волнографе Таккера (смотри ниже). Прежде чем поступить на один из входов 12-канального самописца, выходное напряжение дважды интегрируется. Каждый из гироскопов снабжен маятниковой коррекцией с постоянной времени, равной примерно 6 мин. Для регистрации атмосферного давления непосредственно под крышкой буя помещен чувствительный микробарограф конденсаторного типа вместе с соответствующей электронной аппа-

ратурой. Для сообщения микробарографа с атмосферой в крышке буя сделано 12 отверстий диаметром 1 мм. Для предотвращения заливания эти отверстия подняты над поверхностью буя на 6 см, а для испарения влаги, попавшей в отверстия, установлен испаритель мощностью 5 Вт.

Фаза и амплитуда микробарографа и сигнала на выходе интегрирующих цепей зависят от частоты. Сам буй, ввиду его конечных размеров, вносит искажения при высокочастотном волнении. Амплитудная характеристика буя близка к линейной для частот менее 0,55 Гц. Главными недостатками данного волнографа являются трудность его эксплуатации из-за больших размеров и массы, а также недостатки, присущие всем автономным системам, — никогда нельзя исключить возможность неисправности какого-либо отдельного узла.

Буйковый волнограф с телеметрической передачей информации (США) дает возможность непрерывно контролировать его работу по каналу телеметрии, большинство неполадок может быть обнаружено в момент их возникновения, что позволяет свести к минимуму вероятность недостоверности или потери информации. Буй волнографа представляет собой алюминиевый плот размером $1,8 \times 2,7$ м. Акселерометр, гироскоп, передатчик и блок питания, помещенные в водонепроницаемый корпус, с помощью стальной рамы закреплены в центре плота. На этом корпусе установлена съемная мачта высотой 4,8 м с укрепленной на ее конце передающей антенной. Для понижения положения центра тяжести и для обеспечения достаточного демпфирования на плоту установлена стальная плита массой 90 кг. Собственная частота плота с установленным на нем оборудованием составляет около 0,5 Гц. Акселерометр представляет собой груз, подвешенный на пружине. Затухание системы близко к критическому, собственная частота равна 150 Гц. Так как частотный спектр измеряемых ускорений лежит ниже 15 Гц, используется статическая калибровка акселерометра. Ускорение, воздействующее на акселерометр, изменяет емкость динамического конденсатора, включенного в резонансный контур генератора со средней частотой 8 мГц. Частотно-модулированный сигнал удваивается по частоте, усиливается и подается на антенну.

Так как высота волны определяется двойным интегрированием показаний вертикального акселерометра, возникает ошибка при отклонении оси акселерометра от вертикали, которая может быть вычислена. Для измерения угла отклонения буя от горизонтали при бортовой и килевой качке используется гироскоп. Ось гироскопа удерживается в вертикальном положении с помощью корректирующих моторов с большой постоянной времени, управляемых ртутными выключателями. Потенциометры бортовой и килевой качки гироскопа модулируют частоту двух генераторов со средними частотами 1300 и 2300 Гц. Индуктивность резонансной цепи генератора, равная 80 мГц, представляет собой ферритовый

модулятор, на обмотку которого подано выходное напряжение генераторов 1300 и 2300 Гц. Таким образом, несущая частота модулируется акселерометром и поднесущими частотами 1300 и 2300 Гц, контролируемые гироскопом и акселерометром.

На борту судна сигнал принимается широкополосным приемником частотно-модулируемых сигналов. Выходное напряжение приемника состоит из сигнала, контролируемого акселерометром, и сигналов, содержащих информацию об углах бортовой и килевой качки. Эти три сигнала разделяются фильтрами, а сигнал акселерометра модулирует поднесущую частоту 13 500 Гц. Каждая из трех поднесущих частот затем регистрируется на одном из каналов четырехканального магнитного регистратора, а на четвертом канале записывается контрольный сигнал частотой 10 кГц, служащий для получения отметок времени. Так как данные регистрируются в форме частотно-модулированного сигнала, то с помощью счетчиков и схем стробирования они могут быть легко преобразованы в цифровую или аналоговую форму. Волнограф позволяет измерять высоты волн до 20 м с погрешностью, не превышающей 4 %.

Волномерный буй для работ на больших глубинах фирмы «Datawell» (Нидерланды). Корпус выполнен в виде полый стальной сферы диаметром 70 см и массой 90 кг. Внутри корпуса установлен высокочувствительный акселерометр на демпфированном маятнике, что позволяет уменьшить его чувствительность к горизонтальным ускорениям. Передатчик мощностью 0,17 Вт, установленный на бую, обеспечивает устойчивый прием информации в радиусе до 50 км. Антенной передатчика служит 11-метровый штырь, установленный на пружинящей опоре. Ошибка интегрирующих цепей составляет 3 % на частоте волнового спектра 0,06 Гц и 30 % на частоте 0,03 Гц. Благодаря размерам и массе корпуса высокочастотное волнение срезается начиная с 0,8 Гц. К бую подвешивается балласт, масса которого зависит от скорости ветра, вместо балласта может подвешиваться термисторная цепь.

Прием информации с буя на борту судна или на береговой базе производится на приемник с кварцевой стабилизацией частоты. При автоматической обработке результатов измерений на пункте приема рассчитывается средний период за 10 мин, фиксируются экстремальные и средние значения высоты волн, а также степень нерегулярности волнения.

36 **Альтиметры** объединяют всю волноизмерительную аппаратуру, с помощью которой неконтактным способом можно определить расстояние от какого-то фиксированного уровня до взволнованной водной поверхности. Расстояние определяется с помощью либо импульсной техники (сигнал излучается импульсами, и определяется сдвиг во времени между излученным и принятым импульсами), либо модуляционной техники (сигнал несущей частоты модулируется по амплитуде или по частоте, и также опреде-

ляется сдвиг во времени). Альтиметры разделяются на системы, работающие в надир (надводные) и в зенит (подводные). Но в обоих случаях носитель может быть неподвижным (надводная или подводная платформа, дно моря) или движущимся (самолет, ИСЗ, подводная лодка). В последнем случае обязательно учитываются вертикальные колебания носителя, направление его движения относительно генерального направления волн и угловое распределение энергии в спектре. Точность измерения волновых возвышений определяется диаметром пятна облучения и пространственным спектром поверхности. К приборам, работающим в надир, относятся радары, лазеры, инфракрасные альтиметры и сонары (ультразвуковые эхолоты), к приборам, работающим в зенит, — сонары. К альтиметрам относят также доплеровский и радиоизотопный альтиметры, а также регистратор жесткости космических лучей. Остановимся на приборах, работающих в зенит, так как описание приборов, работающих в надир, приведено в разделе III. Из этих приборов в океанологической практике наибольшее применение нашли гидроакустические устройства для измерения характеристик волнения.

Гидроакустические устройства позволяют измерять высоту волн на водной поверхности посредством непрерывных или импульсных ультразвуковых колебаний. Схема устройства содержит стационарные пересекающиеся под прямым углом антенные элементы, располагающиеся на дне. Каждый из них имеет нацеленную к водной поверхности веерообразную диаграмму направленности. Для передачи зондирующих сигналов и приема отраженных используются две расположенные под прямым углом и пересекающиеся диаграммы направленности, оси симметрии которых совпадают. При этом на участке пересечения происходит перемножение этих диаграмм направленности, что дает возможность сформировать острую, высокоэффективную диаграмму направленности зондирующего луча.

Подобное устройство, обеспечивающее необходимую точность измерений при использовании на больших глубинах, но требующее точной установки параллельно водной поверхности, было предложено в Японии (патент № 50—15371). На этом же принципе работает выпускаемый серийно в Японии прибор USW 132, обеспечивающий точность измерений $\pm 1\%$ и работающий на частоте 200 кГц.

Акустический измеритель волнения модель 480 фирмы «Ocean Research Equipment» работает по принципу обратного эхозондирования. Подводный блок состоит из устанавливаемой на дне на глубинах до 600 м конструкции, в которой на кардановом подвесе смонтирован гидроакустический излучатель, направленный к поверхности моря, с очень узким лучом (ширина луча $\pm 1^\circ$) и с рабочей частотой 200 кГц, а также контейнер с электроники. Ультразвуковые импульсы, излучаемые генератором, достигают до водной поверхности и, отражаясь от границы раздела во-

да — воздух, возвращаются назад на вход приемника акустического волномера. Время между излучением и приемом импульса служит мерой расстояния между акустическим волномером и поверхностью моря. Профиль волны, перемещаясь по водной поверхности, изменяет расстояние, проходимое ультразвуковым импульсом, что и фиксируется прибором, разрешающая способность которого 2,5 см, а точность измерений до 5 % от высоты волны. Кроме ветрового волнения система может регистрировать и другие колебания уровня: приливы, зыбь, цунами.

Устройство связано кабелем (длиной до 10 000 м) с измерительным пультом, который может находиться на берегу, на борту судна или на платформе. Пульт работает от напряжения 115 В и мощностью 100 Вт переменного тока, преобразует его в постоянный и передает для питания подводного блока. Получаемая информация непрерывно регистрируется на ленточном самописце с шириной ленты 15 см и скоростью протяжки от 2,5 до 20 см/с.

Оптические приборы. В прибрежной зоне при съёмке волномерных реек или вех используется главным образом киноаппаратура. При проведении наблюдений на больших акваториях для получения комплексных характеристик волнения используется стереофотосъёмка волнения. При стереоскопическом рассматривании полученной пары снимков (стереопары) возникает оптическая трехмерная модель морского волнения, а в результате обработки этой стереопары получают поле волновых возвышений и строят план взволнованной поверхности в изогипсах. Основным недостатком оптических методов заключается в том, что они требуют достаточной освещенности моря, за исключением измерения высоты волн с помощью лазера, но этот метод обладает рядом других существенных недостатков.

⑫ **Судовые волнографы.** В настоящее время существует необходимость в волнографе, размещаемом непосредственно на борту судна и используемом как для исследования возникновения, развития и затухания ветрового волнения, так и для изучения поведения судна при различном волнении. Измерение характеристик волнения с борта судна можно производить с помощью альтиметров, электронных волнографов, стереофотоаппаратуры и т. д., но в любом случае требуется введение поправок на качку судна. Большое распространение в океанологической практике в качестве судового волнографа получил прибор, предложенный М. И. Такером.

Волнограф Такера позволяет измерять гидростатическое давление в фиксированной точке на небольшой глубине датчиками давления, встроенными в обшивку судна в плоскости его центра тяжести, и вертикальное перемещение этой точки путем двойного интегрирования выходного напряжения вертикального акселерометра.

Прибор монтируется посередине корпуса судна примерно на 3 м ниже ватерлинии. Гидростатическое давление воздействует на дат-

чик через отверстие в корпусе судна, который преобразует гидростатическое давление в электрический сигнал. Интенсивность сигнала пропорциональна расстоянию между отверстием в корпусе судна и уровнем воды над ним. Это расстояние зависит от высоты волны и мгновенного положения судна относительно его положения покоя. Для исключения этой последней переменной рядом с датчиком гидростатического давления в кардановом подвесе помещают тщательно установленный вертикальный акселерометр. С помощью RC-фильтров и других электрических цепей осуществляется двойное интегрирование выходного напряжения датчика акселерометра. В результате на выходе акселерометра получают сигнал, определяющий мгновенную высоту датчика давления. Таким образом, влияние вертикальных перемещений судна исключается из показаний датчика гидростатического давления. При нахождении датчика на наветренном борту судна вследствие эффекта отражения волны может регистрироваться завышенная высота волн, при нахождении на подветренном борту — заниженная. Для исключения подобного эффекта первичные измерительные преобразователи размещают на каждом борту судна, при этом регистрируется среднее арифметическое из показаний двух приборов.

Приборы требуют специальной калибровки в лабораторных условиях. Погрешность показаний прибора после года эксплуатации составляет 6 %. Неучет гидродинамических эффектов и неточность прибора вызывают суммарную ошибку 10 % для волн с периодом 8—20 с.

Глава 5. Автоматические информационно-измерительные системы различных стран и фирм для океанологических исследований

5.1. Развитие методов измерений океанологических характеристик

В настоящее время уже сложились определенные представления о характере изменчивости океанологических процессов, что позволяет сформулировать необходимые требования к измерительной океанографической аппаратуре и методике производства наблюдений, касающиеся точности, чувствительности, продолжительности и пространственно-временной дискретности измерений, их репрезентативности, выбора аппаратуры с оптимальной информационностью. Экспериментальные исследования существующей изменчивости вод Мирового океана во всем ее диапазоне могут обеспечить зондирующие, буксируемые, автономные и специальные информационно-измерительные системы. При этом, конечно же, возможно создание одинаковых измерителей с различными метрологическими характеристиками и методами их использования.

ния для каждого из масштабов изменчивости, если соответственно откорректировать некоторые характеристики первичных измерительных преобразователей (ПИП), дискретность измерений, ряд наблюдений и вид первичной обработки.

Результаты океанологических исследований, позволившие выявить сложную картину процессов, протекающих в Мировом океане (сложная система течений, синоптических вихрей, тонкой термохалинной структуры и т. п.), усложнили задачу создания общей оптимальной теоретической модели динамики океана. Создание подобной модели, ее апробирование в натурных условиях требует огромного экспериментального материала о пространственно-временной изменчивости гидрометеорологических характеристик. Поэтому в настоящее время перед практической океанологией во всем мире стоит задача создания автоматизированных, малогабаритных, высокоинформативных, простых по конструкции и надежных при эксплуатации в морских экспедиционных условиях информационно-измерительных систем массового сбора и обработки океанологической информации. Основой этих систем является измерительная аппаратура, предназначенная для непосредственного определения различных гидрометеорологических характеристик. Все это объясняет появление во всем мире универсальных измерительных устройств, которые могут быть использованы как в различных комбинациях, так и в виде зондирующих, буксируемых и автономных измерительных устройств, в которых состав аппаратурного комплекса может меняться в зависимости от поставленной практической задачи.

Кроме своего эксплуатационного назначения все измерительные устройства могут классифицироваться по составу и конструктивным особенностям. Как правило, потребителям поставляются изделия, которые можно разделить на следующие виды: детали, сборочные единицы и комплексы. В практике приборостроения сборочные единицы, предназначенные для выполнения определенных самостоятельных функций, обычно называют «прибор» или «система». К «приборам измерительным» относят средства измерений и предназначенные для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Они являются как бы совокупностью изделий (деталей или сборочных единиц), имеющих общее функциональное назначение, предназначенных для производства какого-либо вида измерений. Например, неконтактный измеритель течений типа OSK 3216 (Япония).

Под термином «система» понимается совокупность изделий, приборов, не скомпанованных фирмой-изготовителем в одно целое, но предназначенных для выполнения одной и той же функции. Так, например, «система передачи информации» может состоять из нескольких приборов: для кодирования информации, ее передачи, приемника, дешифратора. Все эти приборы не связаны сборочными операциями и могут быть поставлены раздельно; но они

что такое система и комплекс

взаимосвязаны в процессе эксплуатации и предназначены для выполнения одной общей функции — передачи информации на какое-то расстояние. Обычно термин «система» используется для определения совокупности средств измерений (измерительных приборов, преобразователей и вспомогательных устройств, объединенных между собой каналами связи), предназначенной для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи или использования в автоматических системах управления. Иногда изделия, именуемые системами, могут быть отнесены к классу комплексов.

К комплексам относят два или более изделий, не соединенных фирмой-изготовителем, предназначенных для выполнения различных, но взаимосвязанных эксплуатационных функций. Каждое изделие, входящее в комплекс, служит для выполнения одной или нескольких основных функций и может действовать независимо от других. Например, в океанологическом мини STD-зонде фирмы «Интероушн» (США) установлен океанологический комплекс для измерения температуры, электропроводности, гидростатического давления, содержания растворенного кислорода и pH, снабженный системой передачи информации на борт судна и автоматической записи информации.

В последнее время при разработке и создании измерительных комплексов широко используется модульный подход. Сконструированные типовые размеры ПИП, электронных схем вторичного преобразования, блоков передачи информации и средств регистрации позволяют применять элементную и системную базу практически для любых измерительных устройств и комплексов. Кроме того, созданы ПИП, позволяющие выполнить одновременные измерения различных океанологических характеристик, что в значительной мере упрощает конструкцию аппаратуры. Так, например, в измерителях с двухплёночным ПИП (см. раздел II, глава 3) одну из плёнок можно подключать в канал измерения пульсаций температуры, а другую — пульсаций скорости потока. Трёхэлементный ПИП, имеющий центральный точечный электрод и два плёночных электрода, позволяет производить одновременные измерения трёхпульсационных характеристик в одной точке: электропроводность конвективным способом с помощью центрального электрода; температуру и скорость течения с помощью плёночных электродов. По-видимому, подобная технология создания комплексных ПИП довольно перспективна.

Так как проблема определения солёности морской воды в данной работе не обсуждалась, нам представляется целесообразным остановиться здесь на вопросе о возможности автоматизации измерений солёности. Как известно, диапазон возможных изменений солёности вод Мирового океана находится в пределах 0—40 ‰, при среднем значении 35 ‰. Учитывая сравнительно большое постоянство солевого состава морской воды, в 1902 г. Международная океанографическая комиссия предложила способ измерения

солености по хлору лабораторным, аналитическим методом титрования, точность которого составляет 0,02 ‰. Для автоматизации процесса измерения солености морской воды в настоящее время известно несколько методов: по плотности морской воды, по коэффициенту преломления света, по скорости звука, электропроводности и осмотическому давлению. В любом случае при определении солености *in situ* необходимо параллельное измерение температуры и гидростатического давления на тех же горизонтах. В табл. 6 сведены погрешности измерения исходных характеристик для всех вышеперечисленных методов, позволяющие определить соленость с погрешностью не более 0,05 ‰ в диапазоне солености 27—38 ‰, температуры —2...35 °С, давления 0—600 атм.

Анализ данных табл. 6 позволяет сделать вывод о наибольшей эффективности определения солености по удельной электропроводности морской воды, что подчеркивается и довольно большим диапазоном изменения электропроводности морской воды (0—64 мсм/см) при изменении солености от 0 до 39 ‰ при температуре от 0 до 30 °С. Измерение электропроводности морской воды производится кондуктометрическим, емкостным и индуктивным методами.

Кондуктометрический метод основан на измерении сопротивления воды в объеме между двумя электродами. Нестабильность показаний прибора данного типа вызывается разрушением контактной поверхности электродов, их поляризации и биологическим обрастанием в процессе эксплуатации. Емкостной метод измерений электропроводности морской воды основан на функциональной зависимости тангенса угла потерь конденсатора, образованного электродами и морской водой, и электропроводностью. Метод эффективен только для воды с низкой соленостью и поэтому

Таблица 6

Допустимые погрешности измерения солености различными методами

Метод	Допустимые погрешности					
	$T^{\circ}\text{C}$	Давление 600 атм, %	Коэффициент пре- ломления	Удельная электро- провод- ность, %	Ско- рость звука, %	Осмо- тичес- кое давле- ние
По коэффициенту преломления	0,056	—	$0,635 \cdot 10^{-5}$	—	—	—
По удельной электропроводности	0,017	0,36	—	$3 \cdot 10^{-2}$	—	—
По скорости звука	0,0075	0,04	—	—	$2 \cdot 10^{-2}$	—
По осмотическому давлению (этот метод мало изучен)	2,5	—	—	—	—	0,12

не нашел широкого применения. В океанологической практике широкое распространение получил индуктивный метод определения электропроводности морской воды, сущность которого заключается в измерении ЭДС взаимной индукции в обмотке одного из тороидальных трансформаторов, установленных коаксиально друг к другу в результате индуктивной связи между ними через «виток», образуемый морской водой с изменяющейся проводимостью. Индуктивный метод позволяет получить чувствительность при определении солёности до $0,003\%$ с введением поправок на изменение температуры и гидростатического давления. Индуктивные ПИП практически безынерционны, но измерения производят в большем объеме воды по сравнению, например, с кондуктометрическим методом, что, правда, не является существенным при измерении средних значений солёности.

Одной из проблем современной океанологии является исследование тонкой структуры вод океана, а также мелкомасштабной турбулентности. В первом случае необходимо измерять электропроводность с погрешностью $5 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-4}$ См/м, что соответствует толщине слоев от нескольких сантиметров до нескольких метров, а во втором случае погрешность регистрации электропроводности должна составлять $10^{-5} - 10^{-4}$ См/м, что соответствует пространственным масштабам от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров (В. С. Ястребов). В настоящее время для измерения пульсаций электропроводности используются в основном ПИП кондуктометрического типа, аналогичные датчикам пульсаций скорости течений, и тот же объем воды в районе электродов ПИП со средним эквивалентным сопротивлением на частоте 5 МГц в пределах 100—200 Ом в зависимости от температуры и солёности воды. Измерители пульсаций электропроводности используют рабочую полосу частот от 1 до 1000 Гц со средним уровнем собственных шумов, приведенных к единице измерения электропроводности, около $3 \cdot 10^{-3}$ См/м. Чувствительность подобных ПИП при измерении осредненных значений электропроводности составляет $8,3 \cdot 10^{-3}$ В·м/См, а при измерении пульсации — $16,6 \cdot 10^{-2}$ В·м/См.

Измерения пульсаций электропроводности морской воды осуществляются в основном различными модификациями кондуктометрических ПИП: в частности, капиллярно-контактным и капиллярно-трансформаторным. Первый состоит из двух платиновых электродов, линии тока между которыми замыкаются через капиллярный канал, что обеспечивает максимальную плотность тока в капилляре и повышает чувствительность ПИП, а масштаб осреднения подобных ПИП определяется размерами капилляра. Второй тип состоит из блока измерительных трансформаторов, помещенных в корпусе преобразователя, а жидкостный виток замыкается через капилляр, размещенный в диэлектрическом обтекателе корпуса. Подобная конструкция измерителя позволяет довести диапазон измерения средних квадратических значений пуль-

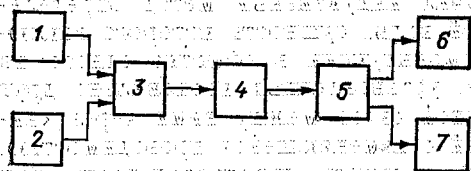


Рис. 21. Блок-схема измерителя пульсаций электропроводности. 1 — измерительный генератор, 2 — ПИП электропроводности, 3 — мостовая измерительная схема, 4 — детектор, 5 — усилитель, 6 — регистратор осредненного значения электропроводности, 7 — регистратор пульсационной составляющей электропроводности.

саций электропроводности до 10^{-2} — 10^{-4} См/м с довольно высокой точностью.

Схемное решение измерителей пульсаций электропроводности (рис. 21) заключается в том, что ПИП включен в мостовую измерительную схему, питание которой поступает от измерительного генератора. Сигнал разбаланса моста подается на детектор. Часть сигнала, соответствующая осредненному значению электропроводности, после отсеечения постоянной составляющей также подается на регистратор.

Следует подчеркнуть, что в последнее время наблюдается тенденция создания зондирующей, буксируемой и автономной аппаратуры с одновременным измерением как осредненных значений гидрометеорологических параметров, так и их пульсаций. Подобные измерительные комплексы могут использоваться в различных сочетаниях ПИП.

В последнее время в Японии разработана оптическая зондирующая система для исследования вертикального распределения температуры воды, гидростатического давления, концентраций солей и мутности воды. Система основана на использовании свето-волоконного кабеля. Данные о температуре воды и гидростатическом давлении получают с помощью двух датчиков, принцип действия которых основан на явлении фотоупругости. Концентрацию солей и мутности воды находят путем регистрации изменения оптических характеристик световода, являющихся функцией физических параметров окружающей водной среды.

18

5.2. Зондирующие гидрологические комплексы

Приборы и устройства, предназначенные для исследования распределения по глубине одного или нескольких гидрофизических и гидрохимических параметров морской воды обычно называют *гидрологическими зондирующими комплексами*. Все эти комплексы можно разделить по способу использования, а также по принципу построения измерительных схем и способу представления информации.

По способу использования, т. е. по возможности получения вертикальной стратификации гидрологических характеристик, эти комплексы подразделяются на гидрозонды свободного падения, одноразового действия (образцом может являться батитермограф

разового действия T-4 фирмы «Сиппикан» (США) или теряемый батитермограф типа OSK 3260 (Япония); гидрозонды свободного падения и всплытия многократного действия (образцы: модель 7065 фирмы «Биссет Берман» (США); модель САМО фирмы «Казакрус» (Франция)); гидрозонды, связанные с бортом носителя (судно, летательный аппарат, платформа) кабельной линией связи (образцы: модель 20 фирмы «Казакрус» (Франция); модель MARK III фирмы «Нейл Браун» (США); модель 8701 фирмы «Гуилдлайн» (Канада); модель OSK 3254 фирмы «Огава Сейки» (Япония); модель 9040 фирмы «Биссет Берман» (США)).

По второму типу классификации комплексы разделяются на аналоговые и цифровые. В аналоговых измерительных комплексах сигнал на выходе блока вторичного преобразования, представленный в виде напряжения, силы или частоты колебаний электрического тока, непрерывно передается на борт носителя по линиям связи или регистрируется в самом измерителе (образцы: модель 8701 фирмы «Гуилдлайн» (Канада); модель 550 фирмы «Интероушн» (США); частотные приборы фирм «Биссет Берман», NUS (США); «Ховальд Верке» (ФРГ). В цифровых измерительных комплексах исследуемый параметр преобразуется в погружаемом блоке в цифровой вид и передается с определенной, заранее заданной дискретностью по линии связи в виде последовательных двоичных или двоично-десятичных кодов в бортовой блок зонда. Подобные измерители позволяют производить квантование измеряемых характеристик по уровню и во времени (образцы: модель САМО фирмы «Казакрус» (Франция); модель MARK III фирмы «Нейл Браун» (США); мини STD-зонд фирмы «Интероушн» (США); модель OSK—3247 фирмы «Огава Сейки» (Япония)).

При использовании зондирующей (а также буксируемой) аппаратуры в океанологической практике для достижения определенной погрешности измерений необходимо согласовывать скорость зондирования (буксировки) с постоянной времени ПИП и вертикальными (горизонтальными) градиентами измеряемых характеристик. Как показывает практика океанографических работ, истинное значение постоянной времени измерительных приборов при наблюдениях *in situ* обычно превышает значение, записанное в паспорте прибора для ПИП, потому что инерционность всего прибора включает в себя постоянную времени ПИП, инерционность регистрирующего механизма, инерцию, связанную с захватом воды оправой ПИП и с влиянием массы прибора. Так, постоянная времени ПИП температуры модели 9006 фирмы «Биссет Берман» рекламируется как 0,35 с, а ее фактическое значение оказывается даже более 1 с. Проходя, например, через слой с резкими градиентами измеряемой характеристики измерительное устройство зарегистрирует ее, как принято считать, через промежуток времени, равный 3τ . За это время измерительное устройство пройдет расстояние $L=3v\tau$ (где v — скорость зондирования, τ — постоян-

ная времени ПИП), которое является как бы разрешающей способностью данного прибора по расстоянию. Так, батитермограф ХВТ (США) на испытаниях при скорости зондирования 6 м/с показал разрешающую способность по вертикали 60 см, а при использовании тормозящего устройства — 20 см. М. Н. Унгерман предложил таблицу (табл. 7) разрешающей способности измерительных устройств при зондировании в зависимости от постоянной времени ПИП и скорости зондирования.

Кроме того, необходимо учитывать, что в настоящее время постоянная времени большинства современных ПИП имеет порядок 0,1 с, а разрешающая способность по расстоянию — 0,1 м. В этом случае значительное влияние начинают оказывать размеры ПИП. Особенно это сказывается на ПИП электропроводности, являющихся практически безынерционными, так как их размеры больше размеров термодатчиков. Поэтому разрешение по расстоянию ПИП электропроводности определяется в основном их размерами.

Развитие океанологических исследований позволило выявить сложность процессов, протекающих в Мировом океане, что в свою очередь потребовало создания высокочувствительной и точной аппаратуры с полной автоматизацией измерений и обработки данных, с возможностью получения почти непрерывных вертикальных профилей распределения океанологических характеристик. Образцами такой аппаратуры стали СТД (или STD)-системы, предназначенные для измерения электропроводности, температуры и давления. Еще более 30 лет назад начались работы по созданию аппаратуры, измеряющей *in situ* океанологические параметры. Одним из родоначальников этого направления в океанологическом приборостроении можно назвать Н. Л. Брауна, который уже в

Таблица 7

Разрешающая способность (м) по вертикали
при зондировании в зависимости от постоянной времени ПИП
и скорости зондирования

τ с	v м/с						
	0,1	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
0,01	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<1	<1
0,05	<0,1	<0,1	<1	<1	<1	<1	<1
0,1	<0,1	<1	<1	<1	<1	<1,2	<1,5
0,3	<0,1	<1	<1	1,8	2,7	3,6	4,5
0,5	<1	<1	1,5	3	4,5	6	7,5
1,0	<1	1,5	3	6	9	12	15
1,5	<1	2,2	4,5	9	13,5	18	22,5
2,0	<1	3	6	12	18	24	30
3,0	<1	4,5	9	18	27	36	45
5,0	<1,5	7,5	15	30	45	60	75
10,0	3	15	30	60	90	120	150

1962 г. опубликовал результаты своих исследований по созданию индуктивного преобразователя для измерения солености морской воды *in situ*, а позднее разработки по созданию платинового термометра сопротивления, двойного моста, предназначенного для компенсации влияния температуры, и т. п.

Одной из первых в мире автоматических систем, позволяющих выполнять измерения *in situ* температуры, солености, гидростатического давления и скорости звука, можно назвать систему ASWEPS, разработанную в США в 1963 г. И уже за следующие 20 лет только в США было разработано более 1000 подобных приборов. Использование в океанологической практике первых появившихся STD-систем дало возможность исследовать тонкую термохалинную структуру и сложную слоистую структуру вод Мирового океана. Дальнейшее развитие океанологических исследований потребовало проведения комплексных методов подробного изучения гидрофизических и гидрохимических полей океана. Поэтому в последнее время появились приборы, способные регистрировать и другие океанологические параметры (характеристики течений, гидрохимические характеристики, скорость распространения звука, пульсационные характеристики и т. п.); но по традиции за ними все равно остается общепринятое название STD-системы. В последнее время в океанологической практике стали широко использоваться теряемые и возвращаемые зондирующие устройства, позволяющие проводить измерения на ходу судна. Поскольку кабельная связь с судном в любом случае создает определенные погрешности в измерениях, весьма вероятно, что в ближайшем будущем подобные измерительные устройства с передачей получаемой информации по гидроакустическому или радиоканалу (через радиобуй или после всплытия на поверхность) на судно найдут более широкое применение в исследованиях океана.

Рассмотрим более подробно некоторые, наиболее широко используемые STD-системы. Технические характеристики более широкого круга подобных систем приведены в табл. 8.

STD-зонд, содержащий X-Y регистратор, типа OSK 3254 фирмы «Огава Сейки» (Япония) (рис. 22), предназначен для измерений температуры, солености и глубины погружения как в зондирующем, так и в автономном режиме. Питания системы, осуществляемого

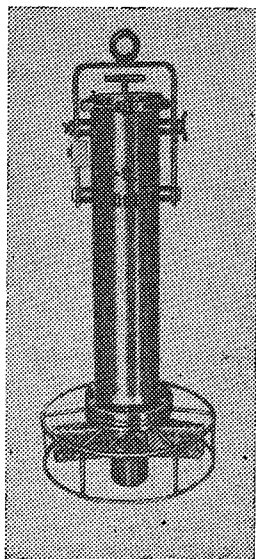


Рис. 22. STD-зонд типа OSK 3254.

Основные технические ха

Изготови- тель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Погрешность	Чувстви- тельность	Постоянная времени
„Бекман“ Модель RS5-3	Температура, °C	0—40	±0,5		
	Электропро- водность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(0—60) · 10 ⁻³			
	Соленость, ‰	0—40	±0,3 · 10 ⁻³	±0,05	
	Давление, атм.	0—13			
Модель RS6-CTS	Температура, °C	0—30	±0,2		
	Электропро- водность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(0—60) · 10 ⁻³	±0,3 · 10 ⁻³	±0,05 · 10 ⁻³	
	Давление, атм.	0—15			
„Биссет Берман“ Модель 6007	Температура, °C	—2...35	±0,01 при компенсации		0,35
	Соленость, ‰	30—40	±0,03	±0,01	0,35
	Давление, атм.	0—600			0,2
Модель 9006	Температура, °C	—2...35	±0,02	±0,01	0,35
	Соленость, ‰	30—40	±0,03	±0,01	0,35
	Давление, атм.	0—60	±0,5 %		
		(9 диапазонов)			
Модель 9040	Температура, °C	—2...36	±0,15	±0,02	0,35
	Электропро- водность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(10—60) · 10 ⁻³	±0,03 · 10 ⁻³	0,02 · 10 ⁻³	0,1
	Давление, атм.	0—60			
		(3 диапазона)			
Модель 9060	Температура, °C	—2...35	±0,1	0,05	0,35
	Соленость, ‰	30—40	±0,05	0,02	0,35
	Давление, атм.	0—800			
		(5 диапазонов)			

Таблица 3

характеристики СТД-зондов

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Источник питания	Масса (в воздухе), кг	Габариты, мм
США						
	Цифровая регистрация	Кабель	130	Батареи		
	Цифровая регистрация	Кабель	150	Сеть 115 В		
Платиновый термометр сопротивления Индукционный Платиновый тензометр	Аналоговая	ЧМ-сигнал по кабелю-тросу	6000	Сеть постоянного тока, 27 В	20	Длина 510, Ø 125
Платиновый термометр сопротивления Индукционный Платиновый тензометр	Аналоговая	ЧМ-сигнал по кабелю-тросу	6000	Борт-сеть	85	Длина 1325, Ø 400
Платиновый термометр сопротивления Индукционный	Аналоговая, магнитная запись	ЧМ-сигнал по кабелю-тросу	6000	Борт-сеть постоянного тока, 27 В	50	Длина 1000, Ø 150
Платиновый тензометр Платиновый термометр сопротивления Индукционный Платиновый тензометр	Автономная на бумажную ленту;	Нет. Автономность 8 ч	8000	Батареи	78	Длина 800, Ø 150 (с ограждением Ø 500)

Изготовитель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Погрешность	Чувствительность	Постоянная времени
„Нейл Браун“ Модель MARK III B	Температура, °C	-3...32	±0,005	0,0005	30 мс
	Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(1-65) · 10 ⁻³	±0,005 · 10 ⁻³	0,001 · 10 ⁻³	250 мс
	Давление, атм.	0-620 (5 диапазонов)	0,1 % от максимальной шкалы ±0,003 0,2	0,0015 % от шкалы	30 мс
	Соленость, ‰	1-40		0,05	3 с
	Содержание кислорода, мл/л	0-20			
„Интер-буш“ Модель 550	Температура, °C	-5...45	±0,02		60 мс
	Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(0-65) · 10 ⁻³	±0,002 · 10 ⁻³		
	Соленость, ‰	0-40	±0,02		
	Давление, атм.	0-600 (7 диапазонов)	±0,25 % от полной шкалы ±1 %		
	Содержание кислорода, мл/л	0-20			
„Мартек ин-струмент“ Модель MARK I	Завихренность	0-200	1 %		
	Температура, °C	-2...30	±0,1		
	Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(0,1-65) · 10 ⁻³	±0,1 · 10 ⁻³		
	Давление, атм.	0-10	±1 % шкалы		
	Температура, °C	-2...35	±0,01		
„Сейсат профилер“ Тип BE9/11 СВЕ-16 „Сейсат“	Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	1,0-7,0	±0,001		0,07
	Давление, атм.	0-80	0,2 %		

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Источник питания	Масса (в воздухе), кг	Габариты, мм
Термистор Платиновое термосопр. 4-электродная (платина) ячейка Тензометрический преобразователь с термоком- пенсацией Цифровой компьютер, таблицы ЮНЕСКО-80 ПИП Бекман (p/N 147737) Термосопрот- ивление Индукционный	Магнитная лента; дисплей	ЧМ-сигнал по кабель- тросу	6000	Борт- сеть. Мощ- ность 500 Вт	35	Длина 686, Ø178 (с ограж- дением Ø 508)
Полярографи- ческая ячейка	Графическая запись 2 любых параметров как функция от глубины внутри прибора	Авто- номный	6000	Батарей	45	Длина 1200, Ø480 с ограж- дением
Модель TMS	Цифровая	Автоном- ный	100	Батарей или бортсеть 108—125 В		
Модель CMS	аналоговая регистрация					
Модель DMS						
Термистор SBE-3 Датчик УЭП SBE-4			800			
Датчик SBE-12						

Изготовитель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Погрешность	Чувствительность	Постоянная времени
„Литтон-Амikon“ Модель 1001	Температура, °C	-2...38	±0,01	0,01	0,35
	Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(25—65) · 10 ⁻³	±0,025 · 10 ⁻³		0,35
	Давление, атм.	0—250	0,2 % шкалы		
„Плесси“ Модель 3050	Температура, °C	-2...35	±0,02	0,001	350 мс
	Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(0—60) · 10 ⁻³	±0,002	0,001	15 мс
	Давление, атм.	0—650	0,1 % шкалы	0,01 % шкалы	20 мс
	Соленость, ‰	30—40	±0,02		
Япо					
„Цуруми Сейки“ Модель 1	Температура, °C (10 диапазонов)	-2...35	±0,05	0,03	0,5
	Соленость, ‰	30—40	±0,04	0,01	0,5
Модель 2	Давление, атм. (4 диапазона)	0—100	±0,5	0,3	0,02
	Температура, °C (4 диапазона)	0—37	±0,1	0,05	0,5
Модель 3	Хлорность, ‰	4—20	0,3—0,1		0,02
	Давление, атм.	0—10	±0,05	0,03	
	Температура, °C (4 диапазона)	-2...34	±0,1...±0,23		
	Соленость, ‰	30—40	±0,1		
		32—36	±0,04		
	Давление, атм.	0—50	±0,4		
		0—100	±0,8		

Продолжение табл. 8:

Тип ТИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Источник питания	Масса (в воздухе), кг	Габариты, мм
Платиновый термометр сопротивления Индукционный	Цифровая, магнитная или аналоговая	В двоичном коде по кабель-тросу	2500	Борт-сеть		
Платиновый тензометр						
Платиновый резистор Индукционный			6500			
Платиновый тензометр Аналоговый процессор Таблицы Кокса						
ния						
Платиновый термометр сопротивления Индукционный	Визуальный отсчет	В аналоговой форме по кабель-тросу	1000	Борт-сеть	30	Длина 900, Ø130
Платиновый тензометр						
Платиновый термометр сопротивления	Запись на бумажную ленту		100	100 В переменного тока	16	Длина 900, Ø140
	Пульт регистрации и запись на магнитную ленту		500 1000		55	532× 285×

Изготовитель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Погрешность	Чувствительность	Постоянная времени
Модель 317 А-1	Температура, °C	-2...40	±0,03	0,01	0,35
	Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(0—60) · 10 ⁻³	±0,03	0,001	0,35
	Соленость, ‰	30—40	±0,03		
„Огава Сейки“ Модель 3247	Температура, °C	-2...38	±0,05	0,005	
	Соленость, ‰	31—36	±0,04	0,01	
	Давление, атм.	0—100	±0,3 % шкалы	0,1	
Модель 3249	Температура, °C	0—34	±0,1		
	Соленость, ‰	25—35	±0,05		
	Давление, атм.	0—30			
Модель 3254	Температура, °C	-2...35	±0,1	0,05	0,3
	Соленость, ‰	31—36	±0,05	0,02	
	Давление, атм.	0—100	±0,5	0,3	
Кап					
„Гуилдайн“ Модель 8101	Температура, °C	-2...30	±0,02	0,003	
	Соленость, ‰ (2 диапазона)	28—40 0,05—40	±0,04	0,01	
	Давление, атм.	0—250	±0,0002... ±0,06 ±0,2 %	0,0001...0,02 0,05 %	
Модель 8701	Температура, °C	-2...30	±0,01	0,003	50 мс
	Соленость, ‰	28—40	±0,01	0,005	50 мс
	Давление, атм.	0—250	±0,2 %	0,05 %	50 мс
„Ховалд Берке“ Батизонд Т87/2	Температура, °C	2—...35	±0,02	0,01	0,35
	Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹	(20—60) · 10 ⁻³	±0,015 · 10 ⁻³	0,010 · 10 ⁻³	
	Давление, атм.	0—600	±0,7 %	0,15 %	

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Источник питания	Масса (в воздухе), кг	Габариты, мм
Платиновый термометр сопротивления Индукционный						
Аналоговый процессор						
Платиновый резистор Индукционный	Аналоговая и цифровая форма	ЧМ—сигнал по кабель-тросу	1000			
Термистор Индукционный	Визуальный отсчет	Кабель-трос	300	Батареи (АС 100 В)	5	Длина 550, Ø 140
Платиновый резистор	Аналоговая цифровая форма	ЧМ—сигнал по кабель-тросу	1000 (можно до 6000)	Батареи	35	Длина 1050, Ø 450
а д а						
Медный термометр сопротивления Кондуктометрическая ячейка Тензодатчик Термосопротивление 4-электродная кондуктометрическая ячейка Тензометр	Потенциометрический самописец. Магнитный накопитель	Кабель-трос	2500 2500		12	Длина 750, Ø 300 с ограждением
Ф Р Г						
Термосопротивление Кондуктометрическая ячейка	Аналоговая и цифровая форма	Кабель-трос	6000			
Трубка Бурдона с индукционным датчиком						

Изготовитель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Погрешность	Чувствительность	Постоянная времени
Ф р а н					
„Казакрус“ Модель CAMO	Температура, °C Давление, атм.	-2...35 0—500	$\pm 0,1$ $\pm 1\%$		
Модель CAPSO	Скорость звука, м/с Температура, °C Давление, атм. Скорость звука, м/с	1440—1660 0—30 0—70 1400—1600	$\pm 1\%$ $\pm 0,1$ $\pm 0,5\%$ 0,2	10^{-3} от диапазона 0,01 0,1 % 0,1	
Малогобаритные гид					
„Интер-оушн“ (США) Мини СТД-зонд	Температура, °C Электропроводность, (Ом/см) · 10 ⁻¹ Давление, атм. Содержание кислорода, мл/л	-5...45 (5—60) · 10 ⁻² 0—100 0—20	$\pm 0,02$ $\pm 0,05$ $\pm 0,15\%$ ± 1		1,4 1,4 60 мс 10
„Мартек инструмент“ (США) Модель „MARK XV“	Температура, °C Электропроводность, мСм/см Содержание кислорода, мл/л рН, ед рН Давление, атм.	-5...50 0—9,999 0—99,99 0—20 0—14 0—10	$\pm 0,1$ $\pm 0,005$ $\pm 0,005$ $\pm 0,1$ $\pm 0,1$ $\pm 0,3$		

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Источник питания	Масса (в воздухе), кг	Габариты, мм
---------	------------	-------------	-----------------------	------------------	-----------------------	--------------

для

Магнетрический потенциометр Целериметр	Цифровая	Автономный	5000	Батарея 12 В	40	Длина 2500, Ø 300
	Магнитная запись	Автономный	700	Батарея 4, 5 В		Длина 1120, Ø 27

рологические зонды

Термосопротивление Индукционный	ЧМ-сигнал по кабелю-тросу	Цифровая форма	1000	Батарея	9	Длина 288, Ø 254, с. ограждением
Полярографическая ячейка						
Модель TMS Модель CMS		Аналоговая и цифровая форма	100	Аккумулятор 12 В		
Полярографическая ячейка						
Ионоселективный электрод Модель DMS						

Изготовитель, тип прибора	Измеряемые величины	Диапазон измерений	Погрешность	Чувствительность	Постоянная времени
„Мерестех- ник электро- ник“ (ФРГ) СТД-зонд	Температура, °C	—2...32	±0,02		1
	Электропроводность, мСм/см	0—55	±0,02		50 мс
	Кислород, %	0—150	±0,1		300 с
	pH, ед. pH	4—10	±0,1		
	Давление, атм.	0—20	±0,001		
„Автлаб“ (Австралия)					
Портатив- ный СТД-зонд М-602	Температура, °C	1—35	±0,1		
	Соленость, ‰	0—32	±0,1		
		32—42	±0,03		
	Глубина, м	0—100			

набором батарей, хватает на 10 ч непрерывной работы. Запись результатов измерений выполняется на диаграммной бумаге размером 200×200 мм. Сам регистратор помещен в прочный корпус, который позволяет производить измерения до глубины 1000 м. Имеются модификации данного прибора, предназначенные для работ на глубинах до 2000 и 6000 м. Диаметр корпуса 450 мм, длина 1050 мм и масса 25 кг. Соленость морской воды измеряется *in situ* индуктивным измерителем электропроводности. Температурная компенсация измерений электропроводности осуществляется платиновым резистором с постоянной времени около 0,3 с, являющимся одновременно и ПИП температуры. Измеритель давления легко регистрирует на диаграммной ленте оценку давления. В приборе предусмотрена возможность заранее задавать максимальную глубину погружения, при достижении которой электрическая схема измерителя автоматически отключается. Технические характеристики всей системы представлены в табл. 8.

Автономный графический регистратор профиля, модель 550 фирмы «Интероушн» (США) — СТД-система со встроенным графопостроителем распределения измеряемых параметров по глубине. Кроме температуры и солености (как функции электропроводности) система позволяет измерять содержание растворенного

Тип ПИП	Тип записи	Канал связи	Глубина погружения, м	Источник питания	Масса (в воздухе), кг	Габариты, мм
Полярографическая ячейка Ионоселективный электрод	ЧМ-сигнал по кабель-тросу	Аналоговая и цифровая форма	200	Батарей		
Термистор Платиновые электроды Марки на кабеле	Кабель	Аналоговая	100	Батарей 9 В	18	

кислорода в диапазоне 0—200 млн⁻¹ с погрешностью $\pm 1\%$, рН в пределах 2—12 рН с погрешностью $\pm 1\%$ и характеристики за-
вихренности в диапазоне 0—200 ITU с погрешностью 1%, с пере-
дачей 0—100 % при погрешности 1%. Корпус прибора, изготов-
ленный из нержавеющей стали, позволяет производить измерения
на глубинах до 6000 м. Одновременно могут регистрироваться
только два любых параметра как функция глубины. Причем мак-
симальная глубина погружения прибора может задаваться заре-
нее на борту судна. По достижении этой глубины прибор может
автоматически отключаться совсем или, также автоматически,
включаться при достижении этой же глубины в процессе подъема,
причем в этом случае он может регистрировать те же два пара-
метра, что и при спуске, или два любых других. Регистрация про-
изводится на диаграммной ленте размером 165×500 мм. Питание
системы осуществляется набором батарей, помещенных в корпусе
прибора. Максимальные размеры корпуса: диаметр 480 мм, высо-
та 1200 мм.

Автономный измерительный океанографический зонд САМО
фирмы «Казакрус» (Франция) предназначен для измерения рас-
пределения температуры воды и скорости звука в воде до глубины
5000 м. Кроме того, это зондирующее устройство может быть

оснащено приборами для регистрации электропроводности, концентрации растворенного кислорода, рН и т. п. Для эксплуатации зонда лебедки не требуются. Его просто выбрасывают за борт, и за счет собственной массы он опускается до заданной глубины, где сбрасывает груз и после этого всплывает на поверхность. В процессе спуска и подъема со скоростью около 2 м/с зонд осуществляет измерения океанологических характеристик в виде цифровых данных параллельно с контрольным сигналом. Обнаружить зонд после всплытия помогают радиосигналы, передаваемые прибором в течение 7 ч, проблесковый огонь в темное время суток, а также наличие уголкового отражателя.

ПИП температуры прибора расположен вне корпуса, а регистратор оснащен излучателем с частотой 4—8000 Гц, оттарированным пропорционально температуре от -2 до $+35^{\circ}\text{C}$ с точностью до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Питание схемы канала температуры осуществляется от батарей напряжением ± 15 В. В качестве ПИП давления в устройстве используется манометрический потенциометр, позволяющий производить измерения в диапазоне 0—500 бар (0—5000 м) с точностью $\pm 1\%$, имеющий выходную частоту 4—8000 Гц и рабочий диапазон температур от -2 до 35°C . Напряжение питания датчика $+15$ В. Измерение скорости звука в воде производится в диапазоне 1440—1660 м/с с выходной частотой 7—8000 Гц и точностью $\pm 1\%$. Напряжение питания ± 15 В. Цифровое регистрирующее устройство позволяет выполнить 4000 измерений с частотой 1,25 с и с автономностью — 90 мин. Длина корпуса зонда составляет 2500 мм и диаметр 300 мм, масса 40 кг.

24 Информационно-измерительная система фирмы «Нейл Браун» (США) предназначена для измерения распределения по глубине температуры и удельной электропроводности морской воды, содержания растворенного кислорода, относительного содержания хлорофилла и отбора проб воды на заданных горизонтах. В систему «Нейл Браун» входят следующие элементы:

- погружаемое устройство, на раме которого смонтирован STD-зонд MARK IIB, кассета батометров «Розетт», флуориметр «Акватрака» для измерения относительного содержания хлорофилла и датчик касания дна;

- гидравлическая кабельная лебедка модели 2047 с одножильным кабель-тросом «Рочестер» типа I-N-255 и кранбалки для вывода погружаемого устройства за борт;

- бортовая стойка ($570 \times 750 \times 1750$ мм) для размещения блока питания и стабилизатора, терминала с цифровой регистрацией исследуемых параметров, блока управления кассетой батометров, магнитофона для первичной записи информации, процессора для расчета солености и управления печатью, цифропечатающего устройства, двухточечного двухкоординатного самописца, приемника датчика касания дна с индикатором тока в кабель-тросе;

- вычислительный комплекс на базе персонального компьютера фирмы «Хьюлетт Паккард» с оперативной памятью 512 кбайт,

снабженного графическим принтером и четырехцветным плоттером.

СТД-зонд MARK IIIВ (рис. 23) был разработан Брауном в Вудсхолском океанографическом институте (США). Со времени своего первого экспедиционного использования зонд заслужил международное признание за надежность и точность. Эта система используется и в зондирующем (как правило) и в буксируемом режимах. Высокие точность и разрешение системы стали возможны благодаря использованию усилителей обратного питания и аналого-цифровых преобразователей переменного тока, специально созданных для данного прибора. Обеспечение необходимых качества и количества измерений достигается здесь благодаря высокому коэффициенту усиления, точности и стабильности преобразователей и большому быстродействию. Использование обратного питания усилителей переменного тока уменьшает дрейф ноля и сильно уменьшает собственные шумы электрической цепи.

Прочный корпус погружаемого устройства из нержавеющей стали, снабженный датчиком касания дна, позволяет производить измерения температуры и удельной электропроводности воды, гидростатического давления содержания растворенного кислорода до глубин 6500 м. Кроме того, в корпусе имеются дополнительные входы для подключения ПИП гидрооптических характеристик, правда, для этого требуется подсоединение в погружаемом блоке соответствующих интерфейсов, а в бортовом — дисплеев. Кроме того, в погружаемом корпусе помещены предварительные усилители сигналов, аналого-цифровой преобразователь и блок передачи данных.

ПИП температуры системы представляет собой комбинацию миниатюрного термистора ($\tau=30$ мс) и платинового термометра сопротивления ($\tau=250$ мс). Подобная комбинация позволяет достичь точности измерений платинового термометра сопротивления и быстродействия термистора. ПИП удельной электропроводности — 4-электродная миниатюрная ячейка (8×30 мм) из высокопрочного керамического алюминия с платиновыми электродами. ПИП гидростатического давления — тензометрический преобразователь с термокомпенсацией и

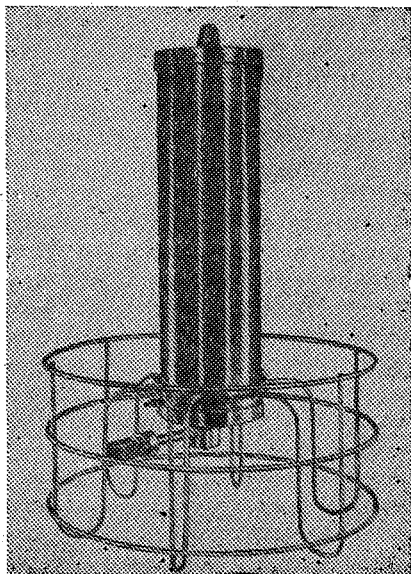


Рис. 23. СТД-зонд MARK IIIВ.

минимальным гистерезисом. ПИП содержания растворенного кислорода — полярографическая ячейка типа «Векман» (P/N 14737) — представляет собой электрохимическую ячейку с золотым катодом и хлорсеребряным анодом, помещенными в гелевый раствор KCl и отделенными от исследуемой среды тефлоновой мембраной толщиной 12,7 мкм. Для питания ячейки подается постоянное напряжение 0,86 В.

Все остальные ПИП системы питаются током 10 кГц. Три соответствующие схемы обеспечивают идентичные диапазоны выходных напряжений на аналого-цифровой преобразователь, выдающий информацию в 16-разрядном коде. Результаты измерений всех исследуемых характеристик последовательно проходят через аналого-цифровой преобразователь и перед передачей на бор судна откладываются в памяти. Получаемая в цифровом виде информация об исследуемых параметрах передается в телетайпном формате посредством частотно-импульсно-кодовой модуляции, рассчитанной на передачу 127 байтов за один цикл опроса, 8 байтов информации включают в себя результаты измерений об электропроводности, температуре и давлении. Остальные 119 байтов остаются для системной информации.

Для отбора проб воды на STD-зонде MARK IIB устанавливаются кассетные батометры «Розетт» обычно фирмы «Дженерал оушеникс» (США) модели 1015, изготавливаемой двух типов: 1015-12 и 1015-24, отличающихся лишь числом батометров (12 или 24). «Розетт» могут использоваться как составная часть различных STD-зондов, кроме системы фирмы «Нейл Браун», в зондах фирм «Плесси» (США), «Гуилдлайн» (Канада) и др. Срабатывание кассеты батометров может осуществляться как по сигналу с бортового комплекса, так и по заранее заданной программе в зависимости от глубины или изменения каких-либо гидрофизических параметров. В системе «Розетт» модели 1015 используются пластиковые батометры ГО-ФЛО типа 1010, 1080 емкостью 1,2; 1,7; 2,5; 5; 8; 10; 12; 20; 30; 40 л. Батометры опускаются в воду с закрытыми клапанами для предохранения их внутренней поверхности от загрязнения при прохождении поверхностного слоя, открываются на глубине около 10 м, а затем герметично закрываются на определенной глубине. Батометры типа 1010 изготавливаются из поликарбоната с внутренним тефлоновым покрытием, отличаются простотой конструкции, надежностью, небольшой массой, что и позволило им найти широкое применение в океанологической практике. Достоинством системы «Розетт» является также возможность использования ее и в автономном режиме.

На базе STD-комплекса фирмы «Нейл Браун», кассетных батометров «Розетт» и вычислительной техники японского производства в последнее десятилетие японские фирмы «Морикава», «Прогресс Трейдинг» и др. выпустили на международный рынок систему сбора, обработки и накопления океанологической информации.

Получаемая на погружаемом блоке STD-зонда информация передается в систему бортовой аппаратуры по кабель-тросу, по которому осуществляется также посылка команд на срабатывание кассетных батометров и сигналов, подтверждающих исполнение этих команд.

Смонтированный в приборной стойке минимально необходимый комплект бортовой аппаратуры включает в себя: блок управления системой кассетных батометров «Розетт»; кассетного стереофонического двухскоростного магнитного регистратора сигналов С-2Х, передаваемых с STD-зонда; бортового устройства STD-зонда MARK IIIВ (ТЕРМИНАЛ-1150), где выполняется преобразование поступающей с зонда информации для осуществления ее регистрации и дальнейшей необходимой обработки; аналогового регистратора типа ВХ4203Л ($X-U_1U_2$); процессора 110С для пересчета удельной электропроводности в соленость; принтера ДР-310 для регистрации в цифровом виде получаемой информации; блоков питания.

Вся эта аппаратура сопряжена с микро-ЭВМ массой 41 кг и размерами 355×595×655 мм фирмы «Кокусон Коеки» — ККС-26, представляющей собой настольную универсальную ЭВМ, в которой использованы большие интегральные схемы (БИСы), позволившие конструктивно выполнить электронно-логическую схему на одной плате, что повысило надежность и обеспечило простоту обслуживания. Емкость памяти ПЗ4—4 кбайта, а в ОЗУ—64 кбайта, с возможностью увеличения емкости до 1 Мбайта. В качестве накопителя в данной системе используются 8-дюймовые двухсторонние гибкие диски (2 шт.) с емкостью по 1,15 байта. Индикация получаемых данных выполняется на 12-дюймовом дисплее. Программное обеспечение включает трансляторы (фортран, кобол и т. д.), вспомогательные программы (редактор, связь, отладка), диагностическая программа ККС-26 позволяет проводить также разнообразные научные расчеты. Результаты расчетов регистрируются на плоттере ПЛ-2000-3 и принтере МП-8011. Кроме того, микро-ЭВМ может быть доукомплектована накопителями типа «винчестер», дисплеями модели КДЕ 810А, построочно-печатающим устройством «Джуки 5240», устройством для считывания с перфокарт «Джуки 2700» и модемами.

Данная информационно-измерительная система, как с микро-ЭВМ ККС-26, и без нее, может быть подключена в общесудовую систему сбора и обработки информации с использованием центральной судовой ЭВМ.

Гидрозонд *свободного падения модернизированной конструкции модели 1075* начал выпускать в 1989 г. фирма ENDEGO (США). STD-зонд предназначен для определения профиля характеристик океана до глубины 6500 м. Зонд опускается на глубину со скоростью 7,7 м/с и возвращается на поверхность со скоростью 2 м/с. Длина зонда 2,06 м, диаметр 0,25 м. Для взятия проб воды на максимальной глубине зондирования используется емкость из

стекла пирекс объемом 250 мм. ПИП обеспечивают возможность измерения температуры воды в интервале $-2...35^{\circ}\text{C}$, электропроводности воды в диапазоне 0,5—6 См/м и гидростатического давления до 700 атм. Предусмотрена возможность дополнительного использования измерителей концентрации растворенного кислорода, pH и мутности. Электронная аппаратура на борту судна производит обработку информации.

Глубоководный эпизонд для исследования профиля микроструктуры океана (США) многократного действия предназначен для исследования вертикальной гидрологической микроструктуры, характеристик турбулентности, изменчивости скорости течений. Длина зонда 2,4 м, диаметр 0,14 м, отрицательная плавучесть 0,5—0,8 кг. Скорость зондирования 0,5—1,0 м/с. Профиль температуры фиксируют термистором, гидростатическое давление — тензометром. Микроструктуру температурного поля определяют миниатюрным термистором и пленочным платиновым термометром сопротивления с постоянной времени соответственно 7 и 2 мс при шумах схемы, эквивалентных 5 и 50 мкК в диапазоне 1—10 Гц. Пульсации скорости течений регистрируют с помощью электромагнитного датчика, установленного на заторможенной флюгарке. Сигналы ПИП передаются на судно по многожильному кабелю. Каждую секунду передается 1792 показаний ПИП зонда. Обработку данных производит микро-ЭВМ.

Малогабаритные гидрологические зонды. В настоящее время в океанологической практике значительное внимание уделяется малогабаритной аппаратуре, для установки которой не требуется специальных судовых помещений и которую можно легко использовать на малотоннажных судах. Подобную аппаратуру можно разделить на две категории: автоматизированные устройства, выполненные на базе микропроцессорной техники, и приборы с ручным управлением процессов измерений и регистрации получаемой информации. Рассмотрим устройство некоторых типов малогабаритных СТД-зондов.

СТД-зонд фирмы «Мерестехник электроник» (ФРГ) предназначен для исследования распределения температуры и удельной электропроводности морской воды и содержания растворенного кислорода по глубине до 100 м. Также имеется возможность подключения ПИП pH и некоторых других. Система состоит из бортового зондирующего устройства и бортового блока, соединенных между собой 300-метровым одножильным кабелем. Информация с ПИП бортового устройства преобразуется в цифровую форму и передается по кабелю частотно-модуляционными сигналами, чем обеспечивается необходимая помехозащищенность. Соленость морской воды по измеряемым значениям удельной электропроводности, температуры и гидростатического давления вычисляется встроенным микропроцессором по специальной программе.

Бортовой блок управляется микропроцессором, имеет аналоговые каналы и интерфейс РС-232. Поступающая информация с ПИП зонда в бортовой блок корректируется, систематизируется и нормируется микро-компьютером, который также по специальным программам калибрует измерительные каналы. После этого информация отображается в реальных физических величинах на дисплеях и может быть записана на простой кассетный магнитофон, поэтому бортовое устройство может служить как считывающее устройство. С аналоговых каналов информация может быть подана на графопостроители. Батарейное питание системы обеспечивает автономность ее работы до 24 ч. В случае использования в системе только ПИП температуры, электропроводности и гидростатического давления STD-зонд можно использовать на глубине 200 м и более.

STD-зонд MARK XV фирмы «Мартек инструмент» (США) предназначен для исследования вертикального распределения температуры и удельной электропроводности морской воды, содержания растворенного кислорода и pH до глубины 100 м. Система включает в себя заборное зондирующее устройство со встроенными ПИП (индекс фирмы 175—10); приемно-управляющий блок (175—10); кабель с соединениями; аналоговый регистратор и внешнее печатающее устройство (175 P); алфавитно-цифровой принтер с батарейным питанием (451); регистратор данных модели ДРС (421); компьютерный интерфейс (421—13); блок питания (компактный аккумулятор с рабочим напряжением 12 В) позволяет проводить измерения в течение 25—40 ч без подзарядки.

ПИП заборного устройства обладают высоким быстродействием и чувствительностью, корректировкой по температуре и автоматической компенсацией изменения во времени параметров ПИП удельной электропроводности под влиянием окружающей среды. Получаемая информация подвергается аналого-цифровому преобразованию, что позволяет, передав ее по кабелю, представить ее на цифровом дисплее или зарегистрировать на цифровом печатном устройстве четырьмя десятичными разрядами. Операционный интерфейс, входящий в бортовой блок, включает в себя 16 клавиш и жидкокристаллический дисплей на 32 символа (2 строки по 16 символов), последовательно отображающий результаты измерений. Клавиатура используется также для ввода информации при процессе калибровки ПИП, которым управляет микропроцессор, одновременно управляющий и процессом измерений.

20

5.3. Буксируемые гидрологические комплексы

При исследовании Мирового океана большое значение имеет информация о пространственном распределении океанологических характеристик на поверхности и нижележащих горизонтах. В этом

случае использование только зондирующих комплексов не может дать полной картины. Кроме того, всегда желательно получать информацию с борта движущегося судна без лишних затрат времени, необходимых, в частности, при выполнении зондирования с остановкой судна. Тем более что для получения удовлетворительной информации о вертикальном и горизонтальном распределении исследуемых параметров подобные остановки судна приходится делать довольно часто. Эффективным способом оперативного получения данной информации является использование различных измерительных устройств, буксируемых за непрерывно движущимся судном.

По способу буксировки и конструкции буксируемые измерительные системы можно разделить на следующие типы: 1) системы, представляющие собой гирлянду закрепленных на тросе или кабель-тросе ПИП, которую буксируют за судном при заданном заглублении; 2) ПИП располагаются на буксируемом неуправляемом носителе; 3) ПИП располагаются на буксируемом управляемом носителе, глубина хода которого может быть постоянной или меняться во времени. Информация с буксируемых измерителей обычно передается на борт судна по кабелю или гидроакустическому каналу, а в некоторых случаях накапливается и на самих носителях.

Использование в океанологической практике гирлянд ПИП позволяет измерять в основном температуру воды в верхнем слое до глубины 300—400 м. Использование буксируемых неуправляемых носителей позволяет удалить ПИП от судна и в какой-то мере заглубить их во избежание влияния физических полей судна и волнения. Глубина заглубления подобной системы в известной степени зависит от скорости буксировки и длины вытравленного троса (кабель-троса). Использование буксируемых управляемых носителей позволяет проводить измерения по заранее заданной или корректируемой наблюдателем траектории движения устройства примерно до глубины 300 м и при скорости буксировки 13 узлов и более.

Особенные требования в буксируемых системах предъявляются к носителям аппаратуры, к системам заглубления и удержания устройств на заданном горизонте, спуско-подъемным палубным механизмам. В настоящее время в океанологической практике при использовании буксируемых систем применяются два принципиально различных типа носителей: кабель с присоединенными к нему ПИП и контейнер с измерительной аппаратурой.

Для обеспечения заданного горизонта наблюдений или перемещения устройства по заданной траектории в буксируемых контейнерах углубителем чаще всего является сам носитель, корпус которого снабжается управляемыми или неуправляемыми стабилизирующими рулями, а на конце буксирной линии подвешивают специальный углубитель, например в виде груза, углубляющей решетки или «планера».

При использовании буксирной линии особое внимание следует обращать на процесс травления, выборки и намотки на барабан лебедки, когда возможно повреждение корпусов ПИП. Буксируемые контейнеры предназначены для размещения в них комплекса ПИП и других узлов измерительной аппаратуры. Они, как правило, буксируются на значительной скорости, что вызывает необходимость использования формы самих контейнеров с минимально возможным лобовым гидродинамическим сопротивлением для устранения влияния гидродинамических помех на показания датчиков. Это условие особенно важно при исследовании тонкой структуры гидрофизических параметров. Примером подобных контейнеров с практически ламинарным обтеканием может служить экспериментальная конструкция Лаборатории ВМС США и сходный с ней по форме контейнер гидроакустического датчика (патент США № 3144848); имеющих форму падающей капли, снабженных удлиненным трубчатым хвостовиком и стабилизаторами.

Измерительная аппаратура буксируемых систем в значительной степени подобна аппаратуре, используемой в зондирующих СТД-системах, т. е. она состоит из ПИП, телеметрической связи и блока регистрации данных. Правда, при использовании буксируемых гирлянд, когда измерения производятся одновременно 20—30 ПИП, возникают определенные трудности в разработке систем опроса ПИП и одновременной регистрации получаемой информации.

Измерение гидрофизических параметров и их передача могут выполняться непрерывно или дискретно. При дискретных наблюдениях интервалы между измерениями или частота опроса выбираются с учетом пространственно-временной изменчивости исследуемых характеристик. И при дискретных, и при непрерывных измерениях возможны значительные ошибки за счет постоянной времени прибора. Эта ошибка dt прямо пропорциональна пространственному градиенту измеряемого параметра, скорости судна и постоянной времени прибора:

$$dt = - \frac{dt}{dl} v_c \tau_0, \quad (59)$$

где dt/dl — пространственный градиент измеряемого параметра.

При использовании для измерения температуры двух ПИП с различными dt приближенно восстановить истинное значение измеряемой величины можно с помощью выражения

$$t_{\text{ис}} = \frac{t_2 \tau_{01} - t_1 \tau_{02}}{\tau_{01} - \tau_{02}}, \quad (60)$$

где $t_{\text{ис}}$ — истинное значение; t_1 — показания прибора с постоянной времени τ_{01} ; t_2 — показания прибора с постоянной времени τ_{02} . При выполнении практических расчетов с помощью данного выражения необходимо также учитывать факторы, связанные с кон-

структивными особенностями ПИП. Погрешности, вызванные дискретизацией, постоянной времени, ошибками определения координат судна, зависят от используемой аппаратуры и методики измерений. Они могут быть сведены к минимуму или учтены при обработке результатов наблюдений.

В настоящее время в океанологической практике используется много разновидностей буксируемых систем, начиная от простейших измерителей ТПМ на ходу судна и кончая сложнейшими комплексами аппаратуры, которые не только выполняют измерения океанологических параметров в процессе движения судна, но и одновременно, отбирая пробы воды, подают их по специальным трубчатым кабель-буксирам на борт судна для производства гидрохимического анализа. Рассмотрим наиболее характерные из этих устройств

Несколько принципиально сходных буксируемых устройств типа гирианд были предложены в США и использовались при исследовании термической структуры океана. Общим для подобных устройств является носитель датчиков в виде прочной металлической цепи с обтекаемыми звеньями, сквозь которую проходит многожильный кабель с подключенными к нему термисторами. На конце цепи крепится обтекаемый груз и ПИП давления для регистрации заглубления конца цепи. Подъемно-спусковое устройство — специальная мощная и громоздкая лебедка.

Термисторная цепь Ричардсона и Хаббарта является наиболее «старой» конструкцией, послужившей основой для последующих модификаций. Изготовлена она фирмой «Commercial Engineering Company» (Хьюстон, Техас, США). Здесь ПИП температуры в виде 23 термисторов, размещенных через 7,5 м, с постоянной времени 20 с и чувствительностью $0,01^{\circ}\text{C}$, позволяющие измерять температуру воды в диапазоне $-2...32^{\circ}\text{C}$, вмонтированы в кабель в резиновом шланге. При длине цепи 180 м и скорости буксировки 18 узлов измерения осуществляются до глубины 120 м, при длине 300 м и скорости 10 узлов — до 240 м. На конце цепи размещен ПИП давления и гидродинамический углубитель массой 800—1500 кг. Сигналы с ПИП последовательно поступают в бортовое регистрирующее устройство, в котором происходит линейная интерполяция результатов измерений. На ленте самописца вычерчиваются изотермы через 0,1 и $0,05^{\circ}\text{C}$, а при необходимости и через 1°C . Предусмотрена также регистрация данных на перфолене в цифровом двоичном коде.

Буксируемое устройство Лаборатории радиоэлектроники ВМС США является усовершенствованной моделью термисторной цепи. Оно было установлено на судне «Мэрисвилл» и используется для получения температурных профилей верхнего слоя моря (250—270 м на малом ходу и 170 м при скорости 13 узлов). Измерения производятся 34 термисторами, расположенными через 8,23 м по всей длине кабеля. Сигналы с ПИП последовательно поступают в бортовое регистрирующее устройство, в котором происходит

линейная интерполяция измеряемых температур до изотерм целых градусов. На ленте самописца производится запись изотермических профилей через 1°C с указанием глубины и времени (или пройденного расстояния). Кроме того, в нижней части ленты записываются контрольные линии глубины и температуры поверхности. Время полного цикла переключения датчиков 12 с. Рабочий диапазон температур $-2...32^{\circ}\text{C}$.

К преимуществам термогирлянд можно отнести высокую прочность, надежность и возможность их использования при большой скорости буксировки. А к недостаткам — необходимость использования специальных, обычно тяжелых и громоздких, лебедок и ферм.

Буксируемая система Вудсхолского океанографического института (США) предназначена для измерения температуры и солености воды на определенном горизонте. Блок-схема системы представлена на рис. 24. В качестве измерительной аппаратуры используется СТД-зонд фирмы «Биссет Берман» модели 9006 (в случае использования системы на глубине 570—670 м и при скорости буксировки 4—5 узлов — модель 9007) и измеритель скорости звука TR-4 фирмы NUS. Все ПИП смонтированы в алюминиевом корпусе с пластиковым покрытием длиной 500 мм и диаметром 130 мм. Корпус носителя снабжен вертикальным крыловидным стабилизатором для ориентации блока ПИП при буксировке. Блок вертикально вмонтирован в коаксиальный кабель с закрепленным на конце для обеспечения натяжения кабеля при буксировке рыбовидным грузом массой 900 кг. Кабель местами оснащен S-образными алюминиевыми обтекателями. Система эксплуатируется на глубинах до 500 м со скоростью буксировки 4—7 узлов, а рабочий горизонт выдерживается с точностью 5 м. ПИП опрашиваются с интервалом 0,5 с, что обусловлено их постоянной времени ($\sim 0,33$ с). Получаемая информация передается по кабель-тросу в бортовое устройство, где записывается на магнитную ленту для дальнейшей обработки на ЭВМ и воспроизводится на двухкоординатном графопостроителе и телетайпе.

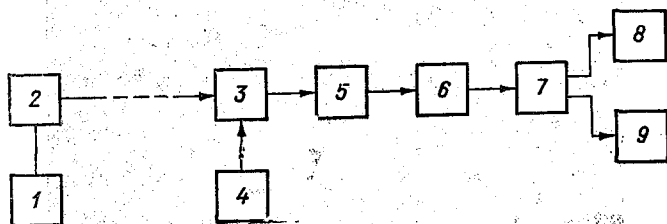


Рис. 24. Блок-схема буксируемой системы Вудсхолского океанографического института.

1 — СТД-зонд модели 9006, 2 — измеритель скорости звука TR-4, 3 — приемное устройство, 4 — блок питания, 5 — усилитель, 6 — детектор, 7 — блок магнитной памяти, 8 — графопостроитель, 9 — телетайп.

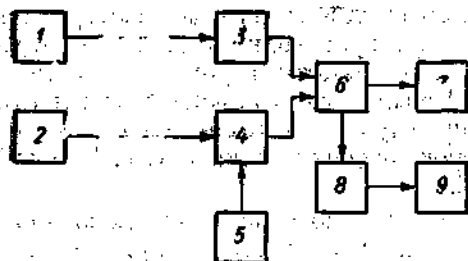


Рис. 25. Блок-схема буксируемой системы ВМС США.
1 — STD-зонд модели 9040, 2 — ПИП растворенного кислорода, 3 и 4 — усилители, 5 — блок питания канала растворенного кислорода, 6 — регистратор, 7 — блок магнитной памяти, 8 — графопостроитель, 9 — телетайп.

Буксируемая система центра разработки подводных систем ВМС США предназначена для производства наблюдений на определенном горизонте со скоростью буксировки на стандартном кабель-буксире до 6 узлов. В качестве измерительной аппаратуры используется STD-зонд модели 9040 фирмы «Биссет Берман», а также ПИП растворенного кислорода фирмы Beckman Instrer. Блок-схема системы представлена на рис. 25. Носитель изготовлен из стандартной трубы длиной 2500 мм и диаметром 76,2 мм и снабжен четырьмя хвостовыми ортогональными стабилизирующими плоскостями. Кроме того, носитель сбалансирован и утяжелен свинцом. Снизу к носителю стальными скобами крепится измерительный зонд. ПИП зонда опрашиваются с дискретностью от 0,1 до 1 с, т. е. при буксировке с постоянной скоростью 4 узла опрос производится примерно каждые 2 м пути.

Буксируемая система с программным обеспечением «Batfish, серия 8801» разработана в Институте океанографии Бедфорда (Канада) и изготавливается фирмой «Гуилдлайн» (рис. 26). «Batfish» — многофункциональная система, предназначенная для быстрого сбора океанологической информации, буксируется на 7-жильном кабель-тросе диаметром 7,6 мм с прочностью на разрыв 3 т. Система снабжена гидравлическими рулями глубины,



Рис. 26. Буксируемая система «Batfish».

управляемыми в ручном или автоматическом режиме с буксируемого судна, что обеспечивает перемещение носителя во время буксировки по пилообразной кривой в вертикальной плоскости или придерживаться постоянной глубины. Корпус носителя длиной 1360 мм, высотой 940 мм, шириной, включая рули глубины, 900 мм и массой на воздухе 69 кг изготовлен из стекловолокна, нержавеющей стали и алюминия. Максимальная глубина погружения носителя при скорости 14 узлов — 400 м, для чего необходимо использовать всего 600 м облегченного кабеля. При использовании устройства в мелководных районах оно снабжено системой глубинного контроля, электрическая цепь которого связана с эхолотом буксирующего судна.

В нижней части носителя в прямоугольном канале прямоугольного сечения размещается СТД-зонд модели 8100 фирмы «Гуилдлайн» (Канада). ПИП температуры зонда — медный проволоочный термометр сопротивления, работающий в диапазоне $-2...35^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $\pm 0,02^{\circ}\text{C}$, стабильность ПИП $\pm 0,01^{\circ}\text{C}/\text{год}$, линейность $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ в пределах измеряемых температур $0-20^{\circ}\text{C}$. ПИП электропроводности — четыре электрода в виде колец из нержавеющей стали на трубке из пирекса длиной 200 мм. Точность показаний ПИП $\pm 0,04\%$. ПИП давления — мембранный тензодатчик типа Viatron PTV 207 C I с точностью $\pm 0,2\%$ по шкале. Кроме того, в носителе установлены флуориметр для исследований цвета и измерители прозрачности и количества хлорофилла. Электропитание системы осуществляется от судовой сети 110 В, 60 Гц, потребляемая мощность 1 кВт. Информация с ПИП в аналоговой или дискретной форме со скоростью пять измерений в секунду по трем параметрам передается в бортовое вычислительное устройство РДР-8, записывается на магнитную ленту ДЕС-таре и воспроизводится на дисплее. Экспериментальная буксировка системы со скоростью 13 узлов показала, что среднеквадратическая ошибка по температуре составила $0,01^{\circ}\text{C}$, по солености — $0,014\%$, по плотности — $0,011\text{ кг/м}^3$.

Буксируемая система фирмы «Фатом оушнолоджи лимитед» (Канада) предназначена для проведения измерений гидрофизических параметров и отбора проб воды в толще воды на ходу судна. В последнее время в океанологическую практику все больше начинают входить системы сбора и обработки данных для непрерывного взятия проб воды с целью постоянного определения ее гидрохимических характеристик. Пробы воды отбираются с заранее заданных горизонтов или в специальные контейнеры, или непосредственно подаются на борт судна. Подобная технология забора воды на ходу судна создает условия квазисинхронности наблюдений при анализе и записи практически любой требуемой комбинации параметров среды.

Данная система состоит из подводного носителя аппаратуры, кабель-буксира с обтекателями, специального грузоподъемного механизма и бортового комплекса аппаратуры.

Буксируемый носитель аппаратуры с небольшим лобовым гидродинамическим сопротивлением и рулями глубины вмещает в себя измерительный комплекс, например STD-зонд MARK IIIВ фирмы «Нейл Браун» (США), кабельный ограничитель и помпу для закачки проб воды на борт судна с производительностью до 40 л/мин. Настоящий комплекс позволяет производить измерения и водозабор проб на ходу судна при скорости до 12 узлов. Увеличение скорости ограничивается динамическими характеристиками STD-зонда и производительностью помпы, на которую оказывает влияние и гидродинамическое сопротивление шлангового канала, предназначенного для подачи проб воды на борт судна.

Кабель-буксир с токопроводящими жилами для подачи по ним команд на буксируемый носитель и передачи от него измерительной информации имеет внутри себя шланговый канал, изготовленный из тефлоновой трубки, с внутренним диаметром 8 мм. Грузоподъемное устройство представляет из себя кабельную лебедку, позволяющую наматывать на нее кабель-буксир вместе с надетыми на него обтекателями.

Бортовой комплекс аппаратуры состоит из устройств, обеспечивающих представление в необходимом виде измерительной информации, получаемой с STD-зонда; блока управления помпой и подачей проб воды с заданного горизонта на борт судна и пульта управления лебедкой и режимом управления носителем. В состав бортовой аппаратуры могут быть включены средства вычислительной техники, позволяющие выполнять графические работы по данным поступающей информации. Буксируемую систему фирмы «Фатом оушнолоджи лимитед» могут поставлять и японские посреднические фирмы «Морикава» и «Прогресс трейдинг».

Буксируемая система фирмы «Плесси» (Великобритания) представляет собой носитель конусно-эллиптической формы с подвижными рулевыми плоскостями; с пропеллером в кожухе, установленном в задней части; с вертикальным стабилизатором снизу и двумя неподвижными горизонтальными плоскостями с боков. Внутри корпуса носителя установлены ПИП температуры, измеряющий в диапазоне 5—35°C с погрешностью 0,1°C; солености (10—36‰, 0,1‰); глубины (0—100 м, 0,3 %); освещенности; мутности; содержания хлорофилла; устройство для непрерывного сбора планктона системы Харди; узлы измерительной аппаратуры и блок автономной регистрации в двоично-десятичном коде на магнитную ленту с накопительной способностью 55 200 измерений.

Система может буксироваться со скоростью 8—16 узлов, перемещаясь при этом по глубине от 8 до 100 м. Кривая всплытия и погружения носителя имеет пилообразную форму с заранее заданным шагом от 5,6 до 37,1 км. В схеме предусмотрен специальный блок, который при любой аварии механизма всплытия и погружения приводит в действие электросистему, обеспечивающую всплытие носителя на глубину до 6 м от поверхности моря.

Основные технические характеристики системы

Длина носителя, мм	1270
Диаметр, мм	600
Масса, кг	65
Диаметр буксировочного троса, мм	7,6
Разрывная прочность троса, кг	400
Расстояние, которое может быть исследовано без замены магнитной ленты, мили	200—300

Буксируемая система океанографической аппаратуры «Дельфин» фирмы «Дорньер систем» (ФРГ) представляет собой носитель, изготовленный из армированного стекловолокна, длиной 1400 мм, максимальной шириной 600 мм, массой около 38 кг и с рабочим диапазоном глубин 0—100 м. Частота погружения и всплытия может регулироваться автоматически или вручную с борта судна. В корпусе носителя установлены ПИП температуры, регистрирующий с точностью $\pm 0,05^\circ\text{C}$; электропроводности, имеющий точность по солености $\pm 0,3\%$; гидростатического давления с точностью $\pm 0,5$ м; скорости звука. Кроме того, там же установлена система предупреждения о приближении носителя ко дну или препятствию, по сигналу которого носитель автоматически всплывает к поверхности, где для облегчения его поиска подает световые и радиосигналы. Информация с ПИП по кабель-тросу в аналоговой форме поступает на бортовое измерительное устройство и регистрируется аналоговым многоканальным самописцем и в двоичном коде на магнитной ленте или подается на перфоратор.

Большое количество разновидностей буксируемых комплексов подчеркивает как возрастающую потребность в них, так и большие сложности их конструирования, которые вызваны нерепрезентативностью динамических погрешностей измерений в зависимости от глубины производства измерений и скорости буксировки. Устранение подобных недостатков связано со сложностями, зачастую в значительной мере сводящими на нет преимущества буксируемых комплексов. Все это и объясняет то обстоятельство, что большая часть буксируемых комплексов, особенно буксируемые устройства типа гирлянд, предназначены для измерения только температуры воды.

ТЕХНИКА НЕКОНТАКТНЫХ МЕТОДОВ ПРОВЕДЕНИЯ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Глава 1. Задачи неконтактных методов исследования океана

Несмотря на все возрастающую интенсивность изучения океана, уровень сегодняшних знаний о закономерностях протекающих в нём процессов далеко не соответствует практическим потребностям людей. В первую очередь это относится к важнейшим проблемам океанологии, таким, как обеспечение безопасности мореплавания, создание надежных моделей краткосрочных и долгосрочных прогнозов погоды, прогнозирование и обнаружение зон повышенной биологической продуктивности в океане и контроль загрязнения окружающей среды. Имеющиеся сведения об океане позволили установить его существенную изменчивость с масштабами от миллиметров до сотен километров и от долей секунд до многих месяцев и даже лет. Это требует систематического и достаточно оперативного измерения соответствующих характеристик по всей акватории Мирового океана, т. е. необходим глобальный охват наблюдениями с периодичностью обновления информации, не меньшей характерного временного масштаба измеряемых процессов.

Решить подобные задачи традиционными методами океанологии невозможно, для этой цели необходимо привлечение неконтактных (дистанционных) методов, в частности космических методов исследования океана, которые в последнее время достигли определенных успехов практически по всем направлениям: в разработках физических основ методов и технических средств активного и пассивного зондирования океана, аппаратурно-программных средств и методов обработки получаемой информации.

Известно, что каждый объект при температуре выше абсолютного нуля поглощает, излучает и отражает электромагнитную энергию индивидуальным, присущим только ему образом и на специфических, характерных только для него длинах волн. Если отбор, сравнение и анализ спектральных и энергетических характеристик, полученных на носителе приемной аппаратуры, выполнить с учетом того, что полезная информация содержится в интенсивности излучения, форме сигнала, степени рассеянности сигнала неоднородностями атмосферы и поверхности океана и другим характеристикам, то можно различать объекты и получать данные об их размере, форме, плотности, температуре и других свойствах. Однако использование дистанционных методов ставит ряд проблем, так как в этом случае измеряются косвенные характеристики океанологических параметров, т. е. решаются «обратные»

задачи, под которыми понимается определение различных свойств исследуемого объекта по зафиксированным приемной аппаратурой собственному отражению поверхности океана, рассеянному и отраженному солнечному свету (пассивные методы) или с помощью активных методов дистанционного зондирования, из которых в настоящее время наиболее изученной является активная радиолокация.

Дистанционные методы зондирования океана классифицируются по признакам, характеризующим принципы построения измерительной аппаратуры, особенности ее функционирования и способы использования для получения океанологических характеристик. Методы и бортовая аппаратура ИСЗ разделяются по способу обзора поверхности океана на сканирующую и кадровую (многоканальную) аппаратуру; по принципу действия — на активную, излучающую сигнал и принимающую рассеянное или отраженное поверхностью океана излучение, и пассивную, основанную на измерении естественного излучения океана в широком диапазоне спектра электромагнитных волн; по использованию для проведения измерений различных участков электромагнитного спектра — на оптическую, инфракрасную и радиофизическую.

Космические методы исследований позволяют получать данные во всех областях спектра электромагнитных колебаний, однако следует отметить, что в настоящее время не существует прибора, позволяющего выполнять регистрацию во всем диапазоне волн. Использование ИСЗ как носителей аппаратуры дистанционного зондирования океана позволяет проводить синхронные измерения на значительных площадях океана и обеспечивает высокую периодичность обновления информации. Но в формировании принимаемого сигнала участвуют процессы различных пространственно-временных масштабов, и определенной трудностью обработки получаемой информации является отсутствие надежных теоретических и эмпирических связей между характеристиками исследуемого объекта и выходным сигналом прибора. Дополнительные сложности создает трансформация сигнала в атмосфере и ее собственное излучение. Развитие дистанционных методов зондирования океана вызвало поступление сверхбольших объемов информации, что обусловило проблему обработки спутниковых изображений океана, так как постепенно нарастает разрыв между объемами получаемой и обрабатываемой информации.

Средства (аппаратура) дистанционного зондирования океана. К ним относятся приборы и системы, обеспечивающие формирование для передачи на Землю картины распределения интенсивностей отраженного и собственного излучения поверхности океана. Системы этого типа теоретически могут быть реализованы для любого спектрального диапазона электромагнитных волн, совпадающего с окнами прозрачности земной атмосферы, при этом используется естественный или искусственный источник подсветки. Естественным источником подсветки для пассивных систем яв-

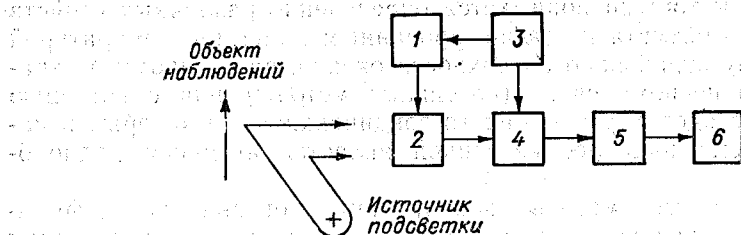


Рис. 27. Общая структурная схема средств дистанционного зондирования океана.

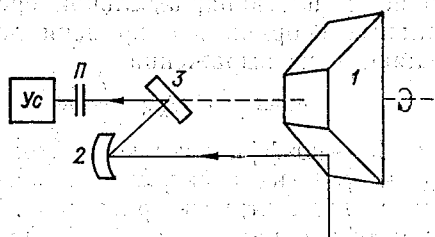
1 — система сканирования, 2 — приемная оптическая или антенная система, 3 — блок управления и синхронизации, 4 — блок преобразования, 5 — накопитель информации, 6 — блок преобразования информации.

ляется Солнце и, как следствие солнечной активности, радио- и тепловое излучение океана и атмосферы. Источниками искусственной подсветки служат лазеры, мазеры и антенные излучатели. Но следует отметить, что в настоящее время не существует прибора, позволяющего выполнять регистрацию во всем спектре электромагнитных волн.

Системы, используемые в различных диапазонах электромагнитных волн, существенно отличаются друг от друга в практической реализации, но имеют идентичные структурные схемы (рис. 27) и могут характеризоваться сходными параметрами: угловым разрешением, углом поля зрения, точностью измерения излучений и др. Вместе с тем использование того или иного спектрального диапазона в системе получения информации дает качественно отличные характеристики природных образований: видимый и ближний ИК-диапазон (0,35—3,5 мкм) при интегральных измерениях характеризует отражательную способность образований по отношению к солнечному излучению, при селективных измерениях позволяет судить о «цветности» объекта в пределах и за пределами спектральной чувствительности человеческого глаза; диапазон теплового ИК-диапазона (3,5—40 мкм) позволяет судить о различных тепловых излучениях, вызванных солнечной активностью и гидротермальными явлениями; различные участки радиодиапазона (1 мм—1 м) позволяют измерять температуру поверхности моря (микроволновая радиометрия), характеристики приводного ветра (скаттерометрический режим), пространственную структуру поверхностного волнения (радиолокатор бокового обзора) и расстояние (альтиметр).

Принцип действия сканирующей аппаратуры состоит в том, что лучистый поток от элементов осматриваемой поверхности последовательно превращается в электрические сигналы, принимаемые на наземный пункт приема информации, где в той же последовательности производится обратное преобразование сигналов в средние яркости элементов изображения. В сканирующей аппаратуре для получения изображения обычно используется обзор исследуе-

Рис. 28. Схема сканирующей аппаратуры.



мой площади узким (иглообразным) лучом с прямолинейной построчной разверткой, которая осуществляется, например, с помощью вращения зеркального призматического барабана 1 (рис. 28), имеющего n граней. После отражения от одной из граней пучок лучей, уходящих от водной поверхности, фокусируется параболическим зеркалом 2 и с помощью плоского зеркала 3 направляется на приемник (детектор) П. При прохождении каждой грани в поле зрения зеркала 2 на водной поверхности просматривается строка разложения. В последнее время за счет внедрения новых технологических идей в области дистанционного приборостроения удалось создать целый ряд принципиально новых приборов. Так, например, в оптическом диапазоне принципиально новым моментом явился переход от способа сканирования по строке к способу матричного сканирования, т. е. речь идет о создании приборов с линейной решеткой датчиков. В качестве примера реализации подобного метода можно привести модульный оптико-электронный сканер MOMS. Мозаичная аппаратура включает в себя достаточно большое число чувствительных элементов. Каждый из этих элементов осматривает соответствующий элемент на поверхности моря. При этом сканирование осуществляется путем использования электронного коммутатора.

Пассивное дистанционное зондирование океана, как уже указывалось, основано на регистрации уходящего от водной поверхности излучения, содержащего собственное излучение океана, а также рассеянный и отраженный солнечный свет. Причем при проходе через атмосферу за счет поглощения и рассеяния этот сигнал трансформируется. Все эти процессы можно описать следующим уравнением переноса излучения:

$$\cos \theta \frac{dI_{\lambda}(z, \theta, \psi)}{\psi(z) dz} = \alpha_{\lambda}(z) [B_{\lambda}(z) - I_{\lambda}(z, \theta, \psi)] +$$

$$+ \sigma_{\lambda}(z) \left[\int_0^{2\pi} d\psi \int_0^{\pi} \gamma_{\lambda}(z, \theta, \psi, \theta', \psi') I_{\lambda}(z, \theta', \psi') \sin \theta' d\theta' \psi' - I_{\lambda}(z, \theta, \psi) \right],$$

(61)

где z — высота; θ и ψ — соответственно зенитный угол и азимут; I_{λ} — спектральная интенсивность излучения; λ — длина волны излучения; α_{λ} и σ_{λ} — соответственно спектральные коэффициенты поглощения и рассеяния на единице массы среды; γ_{λ} — спектральная индикатрисса рассеяния; B_{λ} — отношение спектральных коэффициентов излучения и поглощения. Если принять, что атмосфера

является плоскопараллельной средой, то I_λ зависит от горизонтальных координат и времени параметрически; α_λ , σ_λ и γ_λ определяются из выражений

$$\alpha_\lambda = \sum C_k \alpha_{\lambda k}; \quad \sigma_\lambda = \sum C_k \sigma_{\lambda k}; \quad \sigma_\lambda \gamma_\lambda = \sum C_k \sigma_{\lambda k} \gamma_{\lambda k}, \quad (62)$$

где C_k — коэффициент концентрации поглощающих веществ; $\alpha_{\lambda k}$, $\sigma_{\lambda k}$ и $\gamma_{\lambda k}$ — их спектральные коэффициенты поглощения, рассеяния и индикатриссы рассеяния. Функция B_λ задается законом Кирхгофа и находится по формуле Планка

$$B_\lambda = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{2k^2 - 1}\right)}, \quad (63)$$

где c — скорость света ($2,99792 \cdot 10^8$ м/с); h — постоянная Планка ($6,62618 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); k — постоянная Больцмана ($1,38066 \times 10^{-23}$ Дж/К).

Найдя экстремум функции (61), получим выражение для закона смещения Вина

$$\lambda_{\max} = a/T, \quad (64)$$

где $\lambda_{\max}$ — длина волны, соответствующая максимальному излучению абсолютно черного тела с температурой T ; a — постоянная Вина. Проинтегрировав уравнение (61), получим выражение для расчета общей энергии излучения черного тела с температурой T — закон Стефана — Больцмана:

$$E = \sigma T^4, \quad (65)$$

где σ — постоянная Стефана — Больцмана. Известно, что 99,9 % энергии излучения Солнца заключено в спектральном интервале 0,2—4—5 мкм (рис. 29, здесь I_λ — интенсивность лучистой энергии Солнца). Из-за поглощения и рассеяния до водной поверхности Земли излучения отражается от ее поверхности, что и позволяет наблюдать ее из космоса.

Таким образом, граничные условия для выражения (61) формируются на верхней границе атмосферы и на границе раздела

океан — атмосфера, а характеристики океана оказывают влияние на интенсивность излучения, принимаемого на ИСЗ, а зависимость α_λ , σ_λ и γ_λ от состояния атмосферы может многократно искажать принимаемый на ИСЗ сигнал. Все это вызывает необходимость использовать при исследо-

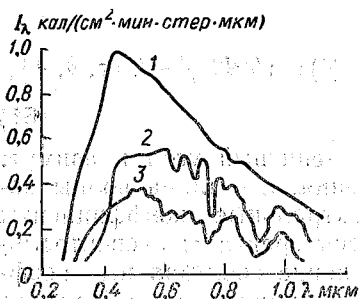


Рис. 29. Интенсивность энергии Солнца в оптическом диапазоне.

зани океана участки электромагнитного спектра с минимальным воздействием атмосферы. А проведение измерений в нескольких диапазонах длин волн дает возможность учитывать влияние атмосферы при совместной обработке сигналов.

Дистанционные методы в исследовании океана используют видимую, инфракрасную и микроволновую части спектра. Использование видимого и ближнего ИК-диапазонов (0,35—1,5 мкм) позволяет определить зависимость коэффициента диффузного отражения от концентрации хлорофилла и других веществ в морской воде, а также от шероховатости поверхности моря, т. е. характеризовать цвет моря. Трансформация сигнала в этой части спектра при прохождении атмосферы осуществляется в основном рассеянием на молекулах воздуха и аэрозолях. Этот процесс описывается последними слагаемыми уравнения (61). Облачность является непроницаемой для световых лучей, и наблюдения при ее наличии невозможны. В случае разряженной облачности попадание облака в поле зрения прибора значительно искажает сигнал.

Как известно, в ИК-диапазоне в области длин волн 1,0—10 мкм можно выполнять измерения собственного теплового излучения океана, причем наиболее эффективны так называемые окна прозрачности атмосферы (рис. 30). На рисунке представлены полосы поглощения ИК-излучения различными газами и атмосферой. При почти полном пропускании — окна прозрачности атмосферы; наоборот — полосы поглощения. Окна прозрачности атмо-

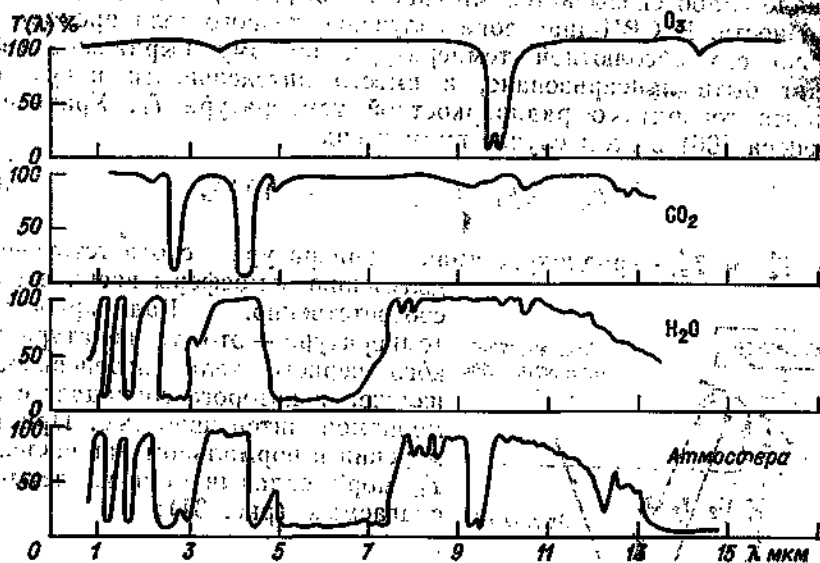


Рис. 30. Полосы поглощения ИК-излучения.

сферы наблюдаются в интервалах: 1,2—1,3, 1,5—1,8, 3,3—4,2, 4,5—5,1, 8,0—13,0 мкм. Правда, и здесь даже при безоблачной погоде сказывается влияние атмосферы, вызванное эффектами поглощения молекулами водяного пара, углекислого газа, озона и т.п.; рассеянием и поглощением аэрозолями, тепловым излучением собственно атмосферы. В этом случае, пренебрегая эффектами рассеивания, выражение (61) после интегрирования будет иметь вид

$$I_{\lambda}(H) = \epsilon_{\lambda} \beta B_{\lambda}(T_0) + I_{0\lambda}^1 + (1 - \epsilon_{\lambda}) \beta I_{0\lambda}^2, \quad (66)$$

где первое слагаемое правой части уравнения — собственное излучение океана; T_0 — температура; ϵ_{λ} — излучательная способность поверхности океана; β — функция пропускания атмосферы; $I_{0\lambda}^1$ и $I_{0\lambda}^2$ — собственное излучение океана вверх и вниз соответственно; $I_{\lambda}(H)$ — интенсивность излучения, принимаемого на ИСЗ. ϵ_{λ} мало отличается от единицы, поэтому влияние атмосферы в основном сказывается через ее передаточную функцию и ее собственное излучение вверх. На функции поглощения в окнах прозрачности атмосферы в основном сказывается влияние водяного пара.

Микроволновый диапазон (1 мм — 1 м) электромагнитного спектра зачастую называют радиофизическим, или СВЧ-диапазоном. Измерения в микроволновом диапазоне особенно важны, так как они являются практически всепогодными, — на принимаемом сигнале слабо сказывается влияние атмосферы даже при наличии облачности. В СВЧ-диапазоне излучение черного тела пропорционально его абсолютной температуре, поэтому выражение (63) может быть линеаризовано, а вместо интенсивности излучения принято говорить о радиояркости температуры $T_{я}$. Уравнение переноса (66) в этом случае примет вид

$$T_{я\lambda} = \epsilon_{\lambda} \beta T_0 + T_{я\lambda}^1 + (1 - \epsilon_{\lambda}) \beta T_{я\lambda}^2, \quad (67)$$

где $T_{я\lambda}^1$ и $T_{я\lambda}^2$ — радиояркость температуры, соответствующая излучению атмосферы вверх и вниз соответственно. Радиояркость температуры — это температура того черного тела, интенсивность излучения которого совпадает с измеряемой интенсивностью. При измерении в нормальном направлении $T_{я}$ моря складывается из четырех слагаемых (рис. 31):

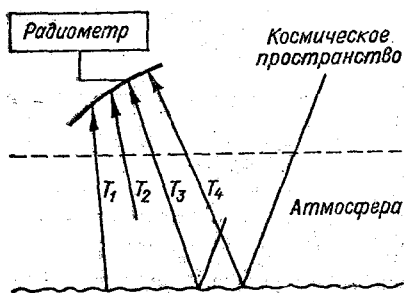


Рис. 31. Слагающие радиояркости температуры.

$$\begin{aligned}
 T &= T_1 + T_2 + T_3 + T_4, \\
 T_1 &= T_m \epsilon_\lambda \exp(-\tau), \\
 T_2 &= T_a [1 - \exp(-\tau)], \\
 T_3 &= T_2 (\epsilon_\lambda + 1) \exp(-\tau) = T_a [1 - \exp(-\tau)] (1 + \epsilon_\lambda) \exp(-\tau).
 \end{aligned}
 \tag{68}$$

Здесь T_m — обычная термодинамическая температура морской поверхности; $\tau = \int_0^\infty \gamma(h) dh$ — оптическая толщина атмосферы; T_a — эффективная температура атмосферы; T_1 — излучение моря, ослабленное прохождением через атмосферу; T_2 — излучение атмосферы как однородного слоя с температурой T_a ; T_3 — излучение атмосферы, отраженное морем и ослабленное прохождением через атмосферу; T_4 — космический компонент, отраженный водной поверхностью и возвращенный к приемнику, при этом учитывается, что космическое пространство имеет яркостную температуру около 3 К. В СВЧ-диапазоне при умеренной облачности и отсутствии осадков на длине волн более 3 см оптическая толщина атмосферы, т. е. влияние атмосферы на радиотепловое излучение, пренебрежимо мала и слагаемые T_2 и T_3 заметно меньше собственного излучения моря T_1 . На длине волн около 1,35 см находится резонансная линия поглощения водяного пара, а при длинах волн менее 2 см на радиояркостной температуре сказывается заметное влияние облачности. В радиофизическом диапазоне радиояркостная температура является функцией не только температуры, но и изменений состояния водной поверхности, обусловленных воздействием ветра. Все это вызывает необходимость отказа от простых одноканальных измерений, внесения поправок по результатам измерений в диапазонах, где не проявляется мешающее влияние атмосферы, и требует проведения комплексных измерений излучения различных поляризаций на нескольких длинах волн, что позволяет одновременно определять температуру поверхности океана (ТПО), характеристики приводного ветра, влагосодержание атмосферы и влажность облаков.

Активные дистанционные зондирующие методы основаны на использовании аппаратуры, излучающей электромагнитные волны, и устройства для приема отраженного или рассеянного поверхностью океана излучения. В ИК- и видимом диапазоне в качестве средства, генерирующего первичное излучение, используются оптические квантовые генераторы или лазеры. Существующие лазеры подразделяются на газовые, твердотельные, жидкостные и полупроводниковые. По режиму генерации лазеры делятся на импульсные и непрерывного излучения. Наибольшее распространение получили твердотельные лазеры, работающие в импульсном режиме, и газовые, генерирующие непрерывное излучение.

Лазерное излучение является полностью поляризованным, что позволяет уменьшить влияние помех от естественных источников

излучения, испускающих неполяризованный свет, и увеличить дальность приема лазерных световых сигналов. Угол расходимости лазерного излучения составляет обычно несколько угловых минут, т. е. можно получить практически параллельный пучок света. Лазерное излучение характеризуется большой интенсивностью (мощностью). В непрерывном режиме максимальная мощность излучения может достигать нескольких десятков киловатт (газовый лазер на CO_2). В импульсном режиме мощность твердотельных лазеров может достигать миллионов киловатт при длительности импульса 10 нс. Лазеры работают в пределах 0,3—11 мкм. Возможность подбора лазеров по длинам волн излучения позволяет выбрать окна прозрачности атмосферы. Монохроматичность и когерентность излучения в совокупности с возможностью изменения длительности импульса создают условия для выбора таких характеристик первичного излучения, которые обладают наибольшей информативностью при зондировании.

Лазерное излучение, распространяясь от источника, достигает поверхности океана и отражается или рассеивается ею, в результате чего формируется отраженный сигнал (или эхосигнал), имеющий уже измененные энергетические, поляризационные характеристики или форму, что зависит от степени шероховатости и электрофизических характеристик водной поверхности. Уходящий от поверхности моря отраженный или рассеянный эхосигнал попадает затем в приемное устройство и регистрируется. Анализ отличия характеристик эхосигнала от первичного лазерного излучения позволяет получить информацию о сущности причин, вызвавших эти отличия, т. е. о физической природе океанологических объектов. Устройства для лазерного зондирования называются лазерными локаторами или лидарами. При импульсном лидаре используются совмещенные передающая и приемная антенны (обычно системы зеркал), а при непрерывном режиме — отдельные антенные устройства (рис. 32). В качестве приемника в лидарах обыч-

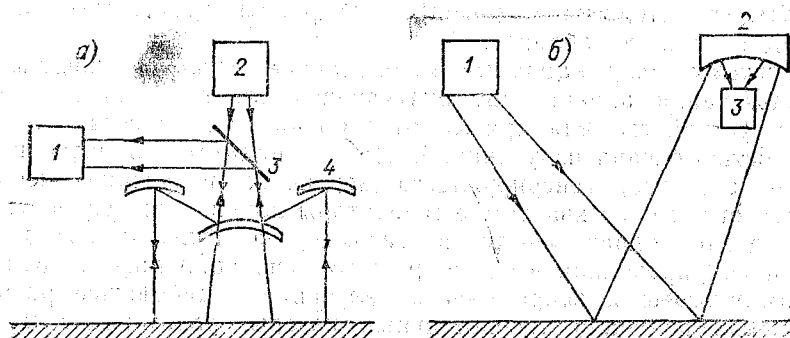


Рис. 32. Устройства для лазерного зондирования.

а — импульсный режим: 1 — приемник отраженного излучения (ФЭУ), 2 — импульсный лазер, 3 — затвор, 4 — система зеркал; б — непрерывный режим: 1 — лазер, 2 — приемное зеркало, 3 — ФЭУ.

но, применяют фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Интересные результаты были получены при использовании лидаров для исследования поверхностного волнения и обнаружения загрязнения поверхности океана.

В микроволновом диапазоне эффективным всепогодным измерительным средством исследования океана является активная радиолокация, одно из направлений которой основано на приеме рассеянного поверхностью океана сигнала с учетом избирательности рассеяния. С ИСЗ могут применяться радиолокационные скаттерометры, радиовысотометры (альтиметры) и радиолокаторы бокового обзора. К преимуществам методов радиолокации относится возможность производить исследования морской поверхности сквозь облака и непосредственно измерять волновые характеристики с помощью спектральной символики, без экстенсивной обработки большого объема данных изображений, поскольку механизм радиолокационного рассеяния включает в себя процесс резонансного взаимодействия, позволяющий анализировать поверхность моря с использованием метода Фурье.

Применение радиолокационных скаттерометров, т. е. радиолокаторов, способных измерить мощность отраженного от поверхности моря импульса $P_{пр}$:

$$P_{пр} = \frac{10^8 P_n \lambda^2 \cos \psi}{16 \pi^2 F^2 \theta_r \theta_v} \sigma_0, \quad (69)$$

где P_n — импульсная мощность передатчика радиолокатора; θ_r , θ_v — угловые размеры диаграммы направленности антенны (...°) по половинной мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно; ψ — угол визирования, отсчитываемый от надира; σ_0 — удельная эффективная отражающая площадь поверхности океана. И, следовательно, значение σ_0 при различных углах визирования

$$\sigma_0 = \rho \sec^2 \psi \bar{\alpha}^2 \exp \left(- \frac{\tan^2 \beta}{\bar{\alpha}^2} \right), \quad (70)$$

где ρ — коэффициент отражения Френеля (по мощности); $\bar{\alpha}^2$ — среднее квадратическое значение уклонов капиллярных волн (по ансамблю); β — угол наклона волнового профиля.

Скаттерометрический метод основан на том, что статистические свойства отраженного сигнала зависят от статистических свойств отражающей поверхности. При облучении взволнованной поверхности особенно интенсивно будут отражаться электромагнитные волны, для которых будет соблюдаться условие резонансного рассеяния Брэгга. Вследствие быстрого перемещения ИСЗ по орбите принимаемый скаттерометром сигнал будет иметь доплеровский сдвиг, зависящий от угла излучения по отношению к направлению полета. Это необходимо учитывать при широкой диаграмме направленности приемопередающей антенны. Несмотря на сравнительно простую физическую основу измерений скат-

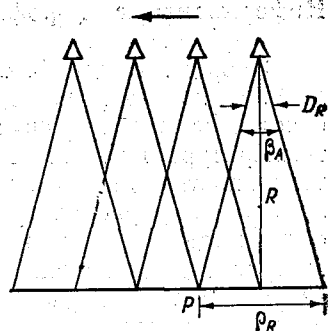
терометром, дело осложняется тем, что при локации водной поверхности с ИСЗ можно использовать лишь сантиметровые волны, резонансное обратное рассеяние которых происходит на капиллярных волнах. Но в океане рябь и капиллярные волны существенно зависят от локальной скорости ветра и, кроме того, развиваются на фоне крупномасштабных волновых колебаний. Поэтому интенсивность принятого скаттерометром сигнала можно непосредственно связать со скоростью приводного ветра, а анизотропия обратного рассеяния радиоволн позволит определить и его направление. Влияние крупных волн проявляется и в амплитудной модуляции радиосигнала, рассеянного мелкими неровностями, и в расширении его частотного спектра.

Радиолокатор бокового обзора (РЛ БО) имеет то принципиальное преимущество, что может давать детальную пространственную картину поверхности океана, позволяющую определить характеристики поверхностного волнения. Высокой разрешающей способности подобных систем (не зависящей от высоты полета) добиваются с помощью лоатора с синтезированной апертурой (условие синтезирования — сохранение в течение процесса синтеза измеряемого поля «замороженным») и когерентного сигнала. Апертура здесь — площадь раскрытия антенны. Для получения принципа синтезирования апертуры используется доплеровский сдвиг частоты, возникающий из-за движения ИСЗ, для выделения в принимаемом сигнале вкладов различных точек водной поверхности.

Что собой представляет РЛ БО с синтезированной апертурой? Движущийся объект оборудуется радиолокатором, излучающим серию когерентных импульсов. Отраженные сигналы запоминаются по мере их приема с сохранением всех когерентных фазовых соотношений. В последствии они когерентно интегрируются для формирования ответного сигнала, имеющего при приеме множество элементов одновременно с переданным импульсом. Каждый элемент этого синтезированного множества может быть в одной из точек в пространстве, занимаемой антенной во время передачи реальных импульсов. Механизмом, реализующим эту возможность, является относительное движение радиолокатора и рассеивающих точек в пределах облучаемой области, т. е. в принимаемом сигнале доплеровский сдвиг выделяет вклад различных точек подстилающей поверхности.

На рис. 33 рассеиватель в точке P будет вводить доплеровский сдвиг в отраженный сигнал, имеющий максимальное положительное значение при входе в реальный пучок. Доплеровский сдвиг, обусловленный этой точкой, будет постоянно уменьшаться по мере перемещения элемента P через реальный пучок вплоть до нуля, когда P находится на линии, перпендикулярной линии полета. Затем возникает отрицательный сдвиг, возрастающий до ухода P из реального пучка. Характер изменения доплеровского сдвига для любой точки полосы будет одинаковым во времени. Допле-

Рис. 33. Принцип действия РЛС БО с синтезированной апертурой.



ровский процесс линейно модулирует частоту отраженного сигнала, по форме совпадающего с сигналом, принимаемым вслед за передачей импульса с линейной частотной модуляцией. Этот сигнал необходим для выделения принимаемого сигнала и для достижения требуемой разрешающей способности по дальности.

Когерентная интеграция, называемая азимутальным сжатием, может достигаться корреляцией отраженного сигнала с подходящей эталонной функцией, которая является модулированным сигналом, принимаемым от отдельной точечной мишени на неотражающей основе с необходимостью определения для каждой точки изображаемой полосы. Из рис. 33 также видно, что максимальная длина синтезированной апертуры является расстоянием, которое проходит ИСЗ и на котором каждая отдельная точка остается в пределах обзора реального пучка. Это идентично с разрешением по азимуту реального пучка. Предельная разрешающая способность равна половине азимутального размера используемой реальной антенны, может быть доведена до нескольких метров и не зависит от дальности и рабочей частоты, ибо информацию относительно отдельного рассеивателя можно получить, пока мишень остается в реальном пучке. Это время даже увеличивается с увеличением дальности.

Другим направлением использования активных методов в дистанционном зондировании океана в микроволновом диапазоне является применение радиолокаторов (радиовысотометров — альтиметров) для измерения высоты полета ИСЗ. Поскольку возможна точная географическая привязка, эти измерения дают возможность определить топографию морской поверхности. Подобные измерения позволяют решать некоторые океанологические задачи. Так, например, выделив результаты измерений уровенной поверхности, связанные с океанической динамикой, можно рассчитать скорость поверхностных геострофических течений, а по трансформации формы принимаемого сигнала можно определить высоту волн и скорость приводного ветра.

Одним из направлений развития океанологических исследований с применением ИСЗ является система сбора гидрометеорологических данных на базе спутников с последующей передачей этой информации в наземные центры данных. Результаты наблюдений можно получать с различного типа судов, предварительно оборудовав их сравнительно простой измерительной аппаратурой; путем опроса океанографических буев, выставленных в Мировом океане или свободно дрейфующих буев (дрифтеров) с координатами, фиксируемыми на ИСЗ.

Информативные гидрофизические параметры и требования к ним

Основными гидрофизическими параметрами, возможность определения которых дистанционными методами зондирования океана сочетается с необходимым уровнем информативности, являются: температура поверхности моря (ТПМ), глубина залегания и интенсивность слоя скачка, высота уровня океана, высота волн и направление их распространения, температура и влажность воздуха, облачность, скорость и направление ветра, поток лучистой энергии, цвет вод океана, характеристики ледяного покрова, степень загрязненности водной поверхности. К измеряемым параметрам должны предъявляться требования по точности измерений, пространственному разрешению и широте распространения исследуемого явления, частоте поступления информации, временного осреднения измеряемых параметров. При определении этих требований следует представлять себе, что в каждом случае все оценки будут зависеть от специфики решения конкретных океанологических задач. И поэтому в каждом отдельном случае требования к информативным параметрам и даже к одному и тому же параметру будут различными, но строго определенными. Для постановки этих требований рассмотрим ряд океанологических задач.

Глобальный мониторинг климата океана включает в себя контроль положения и интенсивности основных океанических круговоротов, радиационного баланса океанов, термических аномалий, границ ледяных образований.

Контроль положения и интенсивности основных океанических круговоротов может осуществляться либо на основе измерений ТПО, либо на основе измерений высот уровня. В любом случае задача заключается в картировании положения основных фронтальных зон Мирового океана и определении их интенсивности. Характерный горизонтальный масштаб изучаемого явления составляет 200—500 км, временной масштаб 2—10 лет, диапазон изменений температуры 2—30 °С, уровня ± 1 м. По всей вероятности, оптимальное горизонтальное разрешение при измерениях полей ТПО составляет 50 км с желаемой точностью 1 °С. Для измерения уровня горизонтальное разрешение также составляет 50 км, приемлемая точность измерений ± 5 см и лучше, частота поступающей информации — 1 месяц.

При исследовании радиационного режима Мирового океана оптимальное горизонтальное разрешение связано с шагом современных схем гидропрогнозов — 500 км. Приемлемая точность определения радиационного баланса поверхности океана не может быть менее 25 Вт/м², а желаемая 10 Вт/м². Поступающая информация должна обновляться не менее одного раза в месяц. Точность определения солнечной постоянной должна быть не хуже 1,5 Вт/м².

В Мировом океане различают гигантские температурные аномалии открытых частей океанов и температурные аномалии, переносимые океанскими течениями. Температурные аномалии открытого океана прослеживаются на климатическом фоне в виде образований с типичными пространственными масштабами 500—2000 км, характерным временем жизни 6—15 месяцев, мощностью по глубине 50—100 м и характерной скоростью перемещения 5—50 см/с (нижний предел — скорость бароклинных волн Россби, верхний — скорость переноса интенсивными течениями). Амплитуда, т. е. экстремальное отклонение от климатической нормы, таких образований составляет 2—3 °С. Для выделения температурных аномалий по данным измерений ТПО необходимо учитывать, что при этом могут возникать погрешности за счет явлений синоптического масштаба, амплитуды которых могут значительно превышать амплитуду температурных аномалий, а временные и пространственные масштабы, хотя и в меньшей степени, но частично совпадают с диапазоном масштабов температурных аномалий. При выборе соответствующей процедуры временного и пространственного осреднения измеренного поля можно избежать подобного влияния. При выделении температурных аномалий важна абсолютная точность измерений температуры, так как сами аномалии определяются как отклонения от климатического фона. Допустимая точность измерений температуры при этом должна составлять 1 °С, а желаемая 0,5 °С. Пространственное разрешение должно быть 25—50 км, временной интервал обновления информации 30—50 сут, а для выделения температурных аномалий необходимо иметь минимальный ряд наблюдений 2—3 года.

Синоптическая изменчивость океана, задачами изучения которой являются обнаружение и прослеживание синоптических вихревых образований, получение статистики вихрей. Это позволит узнать районы их зарождения, периодичность их образований, направления преимущественного распространения, особенности эволюции и трансформации вихревых образований. В полях гидрофизических параметров синоптические вихри могут быть прослежены по характерным изменениям уровня, ТПО, цвета воды, аномалиям солёности, распределению скорости течений, характеру мелкомасштабного волнения, структуре и характеру дрейфа льда. По физической природе и интенсивности различают следующие синоптические вихревые образования: ринги Гольфстрима с горизонтальными размерами 100—300 км, «сильные» вихри — 200—500 км, «средние» вихри — 60—300 км, «краевые» вихри — 60—200 км. Временной масштаб этих образований — от нескольких суток до нескольких месяцев (десятков месяцев).

В температурном поле поверхности океана ринги Гольфстрима и интенсивные синоптические вихри могут быть обнаружены по резкой фронтальной зоне, отделяющей воды пониженной (долойшенной) температуры в центре этих образований от окружающих вод. Перепад температур во фронтальной зоне рингов составляет

2—6 °C при ширине фронтальной зоны 5—25 км. Вода в центре рингов диаметром 30—60 км практически горизонтально однородна. В интенсивных синоптических вихрях открытого океана перепад температур во фронтальной зоне составляет 0,5—2,0 °C при ширине фронтальной зоны 2—30 км. Характерная скорость перемещения этих образований 2—7 км/сут.

«Средние» по интенсивности синоптические вихри не переносят массу, как ринги Гольфстрима и интенсивные вихри, а лишь перестраивают поле ТПО в соответствии с характером вращения в глубинных слоях океана. При этом наблюдается наличие меридионального градиента температуры и вихрь может быть «опознан» по характерному S-образному изгибу изотерм в зоне вихря и по температурному фронту на его периферии. Характерный перепад температур на фронте зависит от интенсивности вихря, его размеров и меридионального градиента. В среднем при меридиональном градиенте 0,1—0,5 °C/км перепад температур во фронтальной зоне составляет 0,5—1,0 °C на 30—50 км. Характерное время для вихрей такого типа, т. е. время подстройки температурного поля к полю скорости в основном термоклине, составляет 8—15 сут. Основные требования к пространственному разрешению и точности измерений ТПО для целей распознавания синоптических вихрей сведены в табл. 9.

Характерные изменения уровня при определении синоптических вихрей составляют ± 50 см, а оптимальное пространственное разрешение будет 10 км при точности измерений ± 10 см. Характеристики течения в рингах Гольфстрима и интенсивных синоптических вихрях можно исследовать с помощью дрейфтеров, помещенных в их центральную часть, с определением координат этих буев с точностью ± 1 км не реже 1—2 раза в сутки, что позволяет определять положение вихревых образований, скорости орбитальных движений в них и скорости переноса самих образований.

«Краевые» вихри, возникающие вследствие неустойчивости вдольбереговых течений, взаимодействия течений с островами, банками и другими особенностями морфометрии, прослеживаются по характерным цветовым контрастам на поверхности океана в

Таблица 9

Пространственное разрешение и точность измерений ТПО
для целей распознавания синоптических вихрей

Тип вихрей	Разрешение, км	Точность измерений ТПО, °C		Допустимый интервал осреднения, сут	Частота обновления информации, сут
		требуемая	достигнутая		
Ринги	1—5	1	0,6	3—5	10
«Сильные»	3—10	0,3—0,5	0,6	8—10	7
«Средние»	3—5	0,2—0,3	0,6	1	3—5

видимом диапазоне или (в полярных областях) по характерной спиралеобразной картине дрейфа льда в зоне вихря. Горизонтальное разрешение, необходимое для таких измерений, составляет 0,1—1 км, число градаций цветового контраста не менее шести.

Географическое положение основных фронтальных зон и интенсивных течений в Мировом океане известно, поэтому главной задачей является изучение изменчивости положения оси течений и фронтов, их интенсивности, исследование их меандрирования и устойчивости, взаимодействия течений с синоптическими вихревыми образованиями и т. п. Основными признаками распознавания океанских фронтов и границ интенсивных течений в полях ТПО, уровня, цветности являются резкие горизонтальные градиенты этих параметров.

Интенсивные течения имеют следующие средние характеристики: пространственный масштаб (ширина) 100—200 км, скорость течения порядка 1 м/с, временной масштаб около недели, резкий температурный (и цветовой) контраст на своих границах с градиентом до 0,2—1 °С/км и более и перепадом 2—10 °С на базе примерно 10 км. Из-за относительной узкости этих течений положение их оси устанавливается с достаточной точностью по положению сопутствующему им температурному фронту. При этом допустимое разрешение 10 км с желаемой точностью 1—2 км при относительной точности определения температуры $\pm 1^\circ\text{C}$ (допустимо $\pm 2^\circ\text{C}$), а желаемая точность при этом составляет 0,5 °С с оптимальным периодом обновления информации — 1 неделя. При определении высот уровня в зависимости от ширины и интенсивности течений оптимальная точность составляет $\pm 5, \dots \pm 10$ см при горизонтальном разрешении 10 км. Если поле ТПО позволяет следить лишь за положением оси и меандрированием течений, то измерение высот уровня позволяет получить также информацию об интенсивности течений и ее колебаниях на основе расчета геострофической составляющей скорости. Исследование меандрирования и устойчивости интенсивных течений требует повышения горизонтального разрешения до 3—5 км с желаемой точностью 1—2 км, а при определении температурного контраста точность составляет 0,5—1 °С с периодичностью обновления информации не более недели.

Если под состоянием океана понимать совокупность свойств, обуславливающих форму водной поверхности (волнение), излучательную и отражательную способность, обусловленную наличием загрязняющих и поверхностно-активных веществ, то при описании этого состояния основной задачей является получение оценок высот и длин волн, направления распространения волновых цугов, степени изотропии волнения, спектральных характеристик волнения, степени загрязненности поверхности моря. Различие в форме волнения (капиллярные волны, рябь, трехмерное волнение, зыбь) определяется различием в высотах и длинах волн и особенно различием в статистическом распределении наклонов различных

элементов взволнованной поверхности. На характеристики поверхностного волнения оказывают влияние и внутренние гравитационные волны, поэтому в принципе возможны и оценки параметров внутренних волн, проведение их районирования и т. п. по данным дистанционного зондирования океана. Характерные горизонтальные масштабы исследуемых явлений колеблются от сантиметров (капиллярные волны, рябь) до нескольких сотен метров (зыбь), высоты волн — от нескольких сантиметров до примерно 20 м.

Таким образом, данные пространственно-временных масштабов изменчивости динамики океана и отличительные особенности водной поверхности, сопутствующие этим явлениям и позволяющие исследовать их дистанционными методами зондирования океана, можно представить в виде табл. 10.

Таблица 10

Данные дистанционного зондирования океана

Процесс, явление	Поверхностное смещение, м	Горизонтальный масштаб скорости, м/с	Горизонтальный масштаб длины, км	Масштаб времени	Отличительные особенности поверхности
Экваториальные течения	0,3	0,01	5000	Месяцы и годы	Наклон
Крупномасштабные круговороты	0,5	0,01	3000	От одного до нескольких лет	Наклон, цвет
Западные пограничные течения	1,5	1,0	100	От дней до нескольких лет	Наклон, цвет, ТПО, шероховатость
Восточные пограничные течения	0,3	0,1	100	То же	ТПО, цвет, наклон
Ринги	1,0	0,5	100	От недель до нескольких лет	ТПО, цвет, наклон
Мезомасштабные вихри	0,25	0,1	100	100 дней	ТПО, цвет, наклон
Фронты	0,05	0,1	10	10 дней	ТПО, цвет, наклон, шероховатость
Океанские приливы	1,0	0,1	1000	12 ч	Наклон, высота волн
Штормовые нагоны	1,0	1,0	100	Часы, дни	Наклон
Внутренние волны	0,01	0,1	0,1—100	Секунды—часы	Шероховатость, цвет

Глава 2. Средства дистанционного зондирования

Запуск первых океанологических ИСЗ открыл новый этап исследования океана с помощью дистанционных методов зондирования. Эти эксперименты позволили отработать методику комп-

тексных синхронных измерений гидрофизических параметров океана как из космоса, так и на специальных контрольно-калибровочных морских и океанских полигонах и идентифицировать полученные данные с физическими процессами, протекающими в океане. Постепенное усложнение и расширение круга решаемых задач, переход от построения карт диагностических параметров к прогностическим позволяет приступить к решению крупных фундаментальных проблем физики океана и прикладных задач океанологии.

Для достижения поставленной цели в конце 70-х начале 80-х годов в США, Японии, ряде стран Западной Европы начали разрабатываться и активно использоваться океанографические и метеорологические спутники нового поколения. Характеристики основных типов подобных ИСЗ с их бортовой аппаратурой, а также задач исследований сведены в табл. 11—16, заимствованные у Г. А. Гришина, Ю. В. Кихая.

Анализ данных, представленных в табл. 11—14, позволяет сделать вывод, что требования к орбитам существующих метеорологических и океанологических спутников весьма разнообразны. Как известно, в зависимости от параметров орбиты ИСЗ значительно различаются между собой. Существует несколько признаков, по которым орбиты разделяются на характерные типы.

В зависимости от наклонения (i) орбиты спутники делятся на экваториальные ($i=0$), полярные ($i=90$) и наклонные ($0^\circ < i < 90^\circ$). Экваториальный спутник будет всегда пролетать над экватором. Проекция полярной орбиты на поверхность Земли при каждом новом обороте будет смещаться к западу вследствие суточного вращения Земли, также будут смещаться ИСЗ с наклонными орбитами. Такое смещение в градусах по долготе называется инкрементом долготы и определяется в основном периодом обращения спутника. Наклонные орбиты проектируются на поверхности Земли только в пределах широт $\Delta\varphi = \pm i$. Наклонные орбиты разделяются на прямые и обратные. Наклонение для прямых орбит лежит в пределах от 0 до 90° , и они движутся в направлении вращения Земли с запада на восток, что облегчает запуск ИСЗ на орбиту из-за добавления к скорости ракеты линейной скорости вращения Земли. Обратные орбиты, двигаясь с востока на запад, имеют наклонение в пределах от 90 до 180° . Среди обратных орбит наибольший интерес представляет орбита с наклонением, определяемым выражением

$$i \approx \arccos \left[-0,0986 \left(1 + \frac{H_a + H_n}{r_s} \right)^{-3,5} \right], \quad (71)$$

где H_a , H_n — высота апогея и перигея соответственно; r_s — экваториальный радиус. Спутники, находящиеся на таких орбитах, называются солнечно-синхронными, так как плоскость их орбиты поворачивается синхронно с обращением Земли вокруг Солнца

Полярно-орбитальные ИСЗ для океанографических исследований

ИСЗ	Время работы	Аппаратура	Основные задачи
СИСАТ	26.VI—10.X.1978	ALT, SMMR, SAR, SASS, VIRR	Топография поверхности, ТПМ. Скорость приводного ветра, спектр поверхностных волн, идентификация внутренних волн, картирование течений, вихрей, метеословия
«Гайрос» НУОА-10	13.X.1978—17.II.1982 27.VI.1979 — по настоящее время 17.IX.1986 — по настоящее время	AVHRR/AVHRR-2, HIRS, DSC	ТПМ, картирование морского льда, картирование течений, вихрей, метео- и погодные операции
ЛАНДСАТ-4	16.VII.1982 — по настоящее время	MSS, TM	Картирование шельфовых явлений
ЛАНДСАТ-5	1.III.1984 — по настоящее время	MSS, TM	Батиметрия мелководий
СПОТ	21.II.1986 — по настоящее время	HRV (ALT, CZCS, DCP)	Фотосъемка акваторий, топография поверхности, концентрация хлорофилла, сбор данных с платформ
МОС-1	1987 — по настоящее время	MESSR	Наблюдение океана
ЕРС-1	1989	SAR, SCATT	Мониторинг океана и льда
NROSS	1989	SSM/I, SCATT, LFMR	Измерение характеристик поверхности океана
ТОРЕХ/Poseidon	1991	RA	Топография океана

Геостационарные ИСЗ для океанографических исследований

ИСЗ	Время запуска	Географическая долгота	Прибор	Основные задачи
ГОЕС-4	09 IX 1980	127° з. д.	VISSR	Получение изображений видимого диска Земли
ГОЕС-5	22 V 1981	75° з. д.	VAS	Ретрансляция данных с платформ DCP DSC
ГОЕС-6		135° з. д.		Ретрансляция обработанных изображений, скорость и направление ветра
МЕТЕОСАТ-1	22 XI 1977	0°	VIRR	Облачность
МЕТЕОСАТ-2	1987	0°	VIRR	ТПМ
GMS-2	11 VIII 1981	140° в. д.	VIS	Профиль температуры изображений
GMS-3	VIII 1984	140° в. д.	VIS	Водяной пар в атмосфере

т. е. солнечно-синхронный спутник находится над каждой точкой земной поверхности в одно и то же местное время, значение которого зависит от времени запуска ИСЗ).

Искусственные спутники Земли разделяются также на периодические и непериодические. Период вращения первых кратен периоду обращений Земли, поэтому положение спутника относительно поверхности Земли каждые сутки повторяется. Непериодические спутники этим свойством не обладают.

По высоте орбиты спутники разделяются на три группы: низкоорбитальные (высота полета 200—500 км), среднеорбитальные (высота полета от 500 до нескольких тысяч км) и высокоорбитальные (высота полета десятки тысяч км). К низкоорбитальным ИСЗ относятся советские спутники серии «Космос», космические илотируемые корабли, орбитальные станции и другие летательные аппараты. К среднеорбитальным относятся в основном метеорологические и океанографические ИСЗ. Высокоорбитальные спутники обычно используются для целей связи, а также метеорологического прослеживания облачности и подстилающей поверхности с больших высот в глобальном масштабе (например, спутник ТС США).

При высоте орбиты экваториального спутника 36 000 км период его обращения равен периоду обращения Земли. Спутник и Земля вращаются с одинаковой угловой скоростью, т. е. спутник находится над одним и тем же наземным пунктом. Такой ИСЗ называется стационарным, или геостационарным. Он позволяет вести постоянное наблюдение за одним и тем же районом Мирового

Испытания аппаратура для дистанционного зондирования океана

ИСЗ	Прибор	Название прибора	Диапазон измерений
ЛАНДСАТ-4, -5 «Тайрос-Н» НУОА-6, -10 «Нимбус-7» МЕТЕОСАТ МОС-1	MSS TM AVHRR/AVHRR-2 CZCS VIRR MESSR	Многоспектральный сканер Тематический картограф Усовершенствованный радиометр сверхвысокого разрешения Сканер цвета инфракрасной зоны Радиометр с вращающимся сканированием Многоспектральный электронный самосканерирующий радиометр	Видимый Ближний, тепловой ИК Видимый, Ближний, тепловой ИК Видимый, Тепловой ИК Видимый Видимый, Тепловой ИК
ГОЕС-4, -5 ГОЕС-6 СИСАТ ЕРС-1 СИСАТ, ЕРС-1 СИСАТ, ГОЕС-1 СИСАТ «Нимбус-7» ЕРС-1 NROSS	VISSR VAS SAR SAR SASS ALT SMMR SCATT SSMI LFMR RA	Атмосферный зондирующий с вращающимся сканированием Атмосферный зондирующий с вращающимся сканированием Радар с синтетизированной апертурой Радар с синтетизированной апертурой Скаттерометр Радиолокационный альтиметр Сканирующий многоканальный микроволновый радиометр Скаттерометр Специальный микроволновый датчик излучения Низкочастотный микроволновый радиометр Альтиметр	Средний ИК Тепловой ИК Средний ИК Тепловой ИК СВЧ СВЧ СВЧ СВЧ СВЧ СВЧ СВЧ СВЧ
ТОРЕХ/Poseidon			СВЧ СВЧ

Таблица 14

Характеристики аппаратуры видимого и ближнего ИК-диапазонов

Прибор	Спектральный диапазон, мкм	Ширина полосы обзора, км	Разрешение в надире
MSS	0,50—0,60; 0,60—0,70; 0,70—0,80; 0,80—1,10	185	80×80 м
TM	0,45—0,52; 0,52—0,60; 0,63—0,69; 0,70—0,90	1,5	30×30 м
AVHRR-2	0,58—0,68 0,72—1,10	2580 (4000)	1,1×1,1 км (4,4×4,4 км)
CZCS	0,43—0,45; 0,51—0,53; 0,54—0,56; 0,66—0,68; 0,70—0,80; 1,05—1,25	1636	825×825 м
VIRR	0,4—1,1	Диск Земли	2,5×2,5 км
VISSR	0,5—0,70	" "	14×14 км
VIS	0,65—0,70	" "	14×14 км
HRV	0,5—0,53; 0,61—0,68; 0,79—0,89; 0,51—0,73	60	20 (10) м

океана. Дистанционным исследованиям с помощью геостационарных систем придается большое значение, несмотря на то, что аппаратура этого типа ИСЗ обладает более низким пространственным разрешением, чем подобная аппаратура спутников с полярными орбитами. Но ее достоинствами являются высокое временное разрешение и возможность исследований заранее заданной акватории в течение длительного времени.

При аппаратурном обеспечении дистанционных методов зондирования океана во всех странах мира не делается упора на преимущественное использование какого-либо одного спектрального диапазона. Каждая конкретная, заранее заданная, практическая задача и определяет выбор метода, т. е. тип аппаратуры, работающий в видимом ИК- или СВЧ-диапазонах. А дело создания новых приборов, совершенствование аппаратурных разработок направлено на непрерывное увеличение числа спектральных каналов зондирования, повышения пространственного разрешения, сужения спектральных полос пропускания излучения. Прогресс науки и техники во всем мире, внедрение новых технологических идей в деле дистанционного приборостроения позволило в последнее время разработать, создать и провести летные испытания, особенно по программе «Спейс Шаттл», целый ряд принципиально новых приборов в оптическом и микроволновом диапазонах. Примером подобных разработок является принципиально новый метод перехода в оптическом диапазоне от способа сканирования по строке к способу матричного сканирования, т. е. созданы приборы с линейной решеткой датчиков. По этому принципу создан, например, модульный оптико-электронный сканер типа MOMS. Его испытания с регистрацией данных на борту ИСЗ проводились

Таблица 15

Характеристика аппаратуры теплового ИК-диапазона

Прибор	Спектральный диапазон, мкм	Разрешение в назидре	Ширина полосы обзора, км	Чувствительность, К
VIRR	5,7—7,1; 10,5—12,5	5×5 км	Диск Земли	
VISSR	10,36—12,5; 12,5—12,82; 13,12—13,48; 13,79—14,18; 14,06—14,39; 14,29—14,62; 14,60—14,81	16×16 км	То же	
VIS	10,5—12,5	—		
VAS	9,9; 11; 12,6	14×14 км		
AVHRR-2	3,53—3,93; 10,3—11,3; 11,5—12,5	1,1×1,1 км (4,4×4,4 км)	2580 (4000)	0,12
HIRS/MSU	2,7—15 (20 ИК-каналов) 50,3—58 ГГц (4 СВЧ-канала)	17,4×17,4	2200	
CZCS	10,5—12,5	825×825 м	1636	0,5
TM	10,4—12,5	120×120 м	185	0,1
ATSR	3,7; 11; 12	1×1 км	500	

Характеристики аппаратуры СВЧ-диапазона для дистанционного зондирования океана

Таблица 16

ИСЗ (год запуска)	Прибор	Частота, ГГц	Разрешение	Ширина полос обзора, км	Угол наблюдения, °	Основные задачи
Радиолокаторы						
SICAT (1978)	SAR	1,275	25 м	100	20	Изображение поверхности океана
«Спейс Шаттл» (1981)	SIR A	23	40 м	50	48	Обработка метода
(1984)	SIR B	23	20 м	50	15-60	То же
(1988)	SIR C	с. х.	20 м	50	15-60 с шагом 1°	»
ERS (1988)	SAR	5,3	30 м (100 м)	80	—	Изучение поверхности океана и морских льдов
РАДАРСАТ (1990)	SAR	5,3	25 м	200	—	»
Радиометры						
«Нимбус-7» (1981)	SMMR	6,6; 10,7; 18; 21; 37	150×150 км	800	40	Скорость ветра, атмосферный водяной пар, ТПМ
МОС-1 (1986)	MSR	23,8; 31,4	32×32; 23×23 км	—	—	Атмосферный водяной пар ТПМ
NROSS (1989)	LPMR	5,2; 10,4	8×13 км	—	50	»
Скаттерометры						
SICAT (1978)	SASS	14,599	50 км	750	2	Скорость ветра
ERS-1 (1989)	SCAT	5,1	50 км	500	—	То же
NROSS (1989)	NSCAT	13,995	25 км	600	—	»
Альтиметры						
SICAT (1978)	ALT	13,5	10 см	—	—	Определение формы геоида
ERS-1 (1989)	ALT	13,7	5 см	—	—	Определение высоты волн
TOPEX/Poseidon (1991)	ALT	2-частотный	1-2 см	—	—	Картирование течений, вихрей

Примечание: с. х. — сканирующий ход.

в 1983 г. За 30 мин записи получено около 200 кадров с площадью обзора 140×140 км каждый и с разрешением 20×20 м при высоте орбиты 300 км.

В подобном же положении находится и проблема спектрометрирования водной поверхности с помощью видеоспектрометров (телефотометров), действующих в оптическом диапазоне длин волн. Следует отметить, что не получили дальнейшего распространения в силу их известных ограничений модели трассового типа. Однако разрабатывается аппаратура с регистрацией интенсивности излучения в нескольких сотнях соприкасающихся спектральных каналах (видеоспектрометр AVIRIS содержит 224 канала), а также аппаратура, основанная на принципе сканирования по площадям. Таким образом осуществляется высказанная еще в 60-х годах идея идентификации природных объектов по совокупности спектральных признаков. Так же совершенствуется дистанционная аппаратура и в СВЧ-диапазоне. Так, например, в конце 80-х годов было проведено испытание радиолокационной станции бокового обзора с синтетизированной апертурой (SIR-C), позволяющей производить дистанционное зондирование поверхности океана на разных длинах волн, поляризациях и в различных направлениях от надира.

Глава 3. Анализ основных методов и результатов измерений с ИСЗ

Вскоре после запуска в октябре 1957 г. первого советского ИСЗ обнаружилась тенденция к специализации космических средств. В 60-х годах появились геодезические, навигационные, метеорологические, спутники связи. Иногда их называют «прикладными» спутниками. Выяснилось, что использование прикладных спутников значительно повышает возможности как средств связи и навигации, так и комплексного исследования земных покровов. Применение дистанционного зондирования Земли со спутников значительно расширило возможности глобального наблюдения за состоянием океана и атмосферы. Если в начальный период основное внимание уделялось исследованию атмосферы, определению метеорологических параметров, то в последнее время наблюдается тенденция к использованию ИСЗ для измерения океанологических характеристик.

Опыт эксплуатации метеорологических спутников показал, что получение информации в глобальных масштабах об облачном покрове планеты и потоках радиации на верхней границе атмосферы хотя и помогает, но не решает в полной мере ни одну из основных практических проблем океанологии. Для этого необходимо создание специализированных океанографических спутников, оснащенных соответствующей аппаратурой. Эта тенденция

наблюдается в настоящее время во всем мире. Так, например, в США начиная с 1960 г. на орбиту было выведено более 50 океанографических и метеорологических спутников, условно разделяемых на три поколения. Первое поколение (время запуска 1960—1969 гг.) отличается наличием на борту аппаратуры, выполняющей съемку в видимом диапазоне спектра («Тайрос-1—10», «Нимбус-1—3», ESA-1—9, ATS-1—5). Второе поколение (1975—1980 гг.) характеризуется более разнообразным составом аппаратуры за счет использования радиолокаторов бокового обзора, многоспектральных сканеров, инфракрасных и микроволновых радиометров и радиолокационных альтиметров («Нимбус-4—6», НУОА-1—5, ЛАНДСАТ-1—3, ГОЕС и др.). Спутники третьего поколения (с 1978 г. по настоящее время) дополнительно оборудуются аппаратурой зондирования атмосферы, системами сбора и ретрансляции спутниковых данных (СИСАТ, «Тайрос-Н», DMSP, «Нимбус-7», ЛАНДСАТ-4, -5, НУОА-6—10). Следует отметить резкое увеличение в конце 80-х годов числа океанографических спутников во всем мире. При этом оборудование спутников съемочной и измерительной аппаратурой позволяет решать многие глобальные и региональные задачи океанографии.

Таким образом, современные системы дистанционного зондирования океана характеризуются разнообразием спектральных диапазонов измерения, пространственных разрешений, углов визирования и т. д. Кроме того, становится общим технологическим приемом многократный повтор съемок одного и того же региона океана с помощью различной аппаратуры. И даже сбор спутниковой информации оказывается нелегкой технической задачей. Поэтому для ее решения пошли по пути создания мощных бортовых систем обработки и передачи информации, наземных и надводных систем сбора, а также автоматической и полуавтоматической обработки спутниковых данных. В настоящее время массовая обработка спутниковой информации осуществляется, как правило, в центрах космических исследований, но разрыв в объеме принимаемой с ИСЗ и обрабатываемой информации продолжает расти. Например, в США только около 5 % данных, полученных со спутников, проходит тематический машинный анализ, несмотря на богатый парк технических и программно-математических средств, имеющих в стране.

Бортовая система обработки результатов исследований предназначена в основном для формирования блоков информации высокого или низкого разрешения в режиме запоминающего устройства или непрерывной передачи, сжатия информации, записи на магнитную ленту данных различных модулей, входящих в измерительный комплекс и т. д.

В наземные комплексы сбора и обработки спутниковой информации, как правило, входят несколько ЭВМ, не менее двух запоминающих устройств, причем емкость каждого из них эквивалентна емкости около 1000 условных магнитных лент средней длины

системы цифровой записи на многодорожечных магнитофонах с пропускной способностью около 100 Мбит/с. В общем виде блок-схема подобной компьютерной наземной системы приведена на рис. 34. Спутниковая информация поступает на обработку обычно в виде цифрового массива на магнитной ленте, на которой записана также необходимая служебная информация. Все это поступает в запоминающее устройство в виде накопителя на магнитной ленте (ЗУ МЛ). Использование других источников информации, например в виде аналоговых записей, фотоносителей и т. д., предусмотрено путем включения в систему аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и видеокамеры. Хранение больших массивов информации осуществляется запоминающим устройством в виде накопителя на магнитном диске (ЗУ МД). Доступ к любой информации достигается использованием быстродействующих средств поиска адреса так, что просмотр 300 условных магнитных лент занимает примерно 1 с. Управление всеми этими периферийными устройствами осуществляется процессором какой-либо серийной мини-ЭВМ с подключенным дисплеем. Для контроля обработки изображений, для визуализации процесса используется видеопроцессор с полупроводниковой памятью, позволяющий хранить несколько изображений размером 512×512 байт, и цветной монитор. В систему входят также специальные средства управления курсором (джойстик), устройство получения твердых копий результатов обработки с возможностью вывода цветного изображения.

Следует отметить, что в настоящее время практически не существует специальных систем сбора и обработки спутниковой информации. Как исключение можно отметить используемый для сбора и обработки многозональной видеоинформации со спутников ЛАНДСАТ, МЕТЕОСАТ, НУОА, СПОТ и др., специальный комплекс «Джипси», разработанный на мини-ЭВМ HP-1000. Правда, при всех его положительных качествах: возможности проводить арифметические и логические операции над массивами данных, статистический анализ, геометрические преобразования (раз-

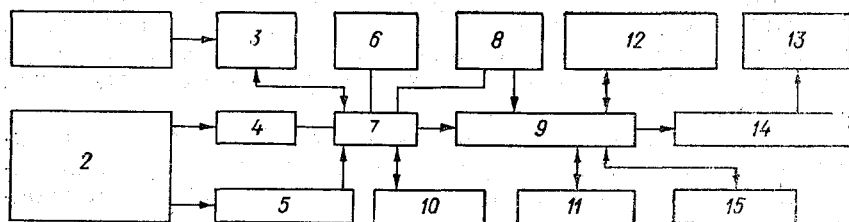


Рис. 34. Общая блок-схема компьютерной наземной системы.

1 — получаемая информация в цифровом виде, 2 — другие источники информации, 3 — запоминающее устройство на магнитной ленте, 4 — АЦП, 5 — видеокамера, 6 — запоминающее устройство на магнитном диске, 7 — мини-ЭВМ, 8 — запоминающее устройство на гибком магнитном диске, 9 — видеопроцессор, 10 и 11 — дисплеи, 12 — видеопроцессор с памятью, 13 — блок получения твердых копий, 14 — цветной монитор, 15 — джойстик.

ворот, масштабирование, трансформация в картографическую проекцию), фильтрация, контрастирование, графопостроение, двумерное преобразование Фурье, монтаж видеофильмов и т. д. — комплекс ограничен объемом цифрового изображения не более $4 \times 512 \times 512$ байт.

В последнее время большое количество информации о процессах, протекающих в океане и атмосфере над ним, поступает с геостационарных спутников. Обработка этих данных выполняется или полностью автоматически, или с участием человека. Так, система сбора, обработки и распространения информации ИСЗ МЕТЕОСАТ выполнена на базе большого числа компьютеров и дисплейных систем и предназначена в основном для решения следующих задач: сбора, географической привязки и создания банка спутниковых изображений; расчета метеорологических характеристик по спутниковым изображениям, контроля их качества и распространения по потребителям в автоматическом режиме; распространения аналоговых и цифровых спутниковых изображений, а также полученной метеоинформации через ИСЗ другим потребителям; сбора, обработки и распространения информации с океанических платформ.

Дальнейшее развитие средств сбора и обработки данных дистанционного зондирования океана, по всей видимости, следует ожидать в сторону использования микро-ЭВМ с развитой периферийной сетью, совершенствования и стандартизации программного обеспечения, применения специализированных процессов, развития банков данных, использования интерактивных методов.

Рассмотрим основные результаты, достигнутые дистанционными методами за последнее время, и те проблемы, которые стоят перед ними в области решения фундаментальных и прикладных задач океанологии. Важное значение в проблеме разработки надежных методик создания долгосрочных и краткосрочных прогнозов является исследование радиационного баланса поверхности океана и, в частности, одной из основных его составляющих — глобального альбеда. По оценке большого количества спутниковых данных, уже полученных к настоящему времени, его среднее значение составляет 27—33 %. В то же время результаты наземных наблюдений оценивают значение альбеда в пределах 29—50 %. Подобное значительное расхождение может быть вызвано рядом причин: несовершенная оценка влияния атмосферы, погрешности, возникающие при переходе от спектральных к интегральным значениям, расхождения различных методик при определении глобальной облачности.

Остановимся на последней причине. В настоящее время не существует единства в количественном определении облачности, что в свою очередь вызывает проблему репрезентативности оценок, полученных различными методами и аппаратурой. Так, результаты наблюдений, полученные геостационарными ИСЗ, выявили ди-

намику распределения и временной изменчивости глобальной облачности значительно более разнообразную, чем полученная по данным полярно-орбитальных спутников или наземных наблюдений. А то обстоятельство, что используемые в настоящее время эмпирические и полумпирические методы обладают существенным разнообразием в статистической обеспеченности результатов, корректности учета того или иного параметра и т. д., не дает возможности создать единую универсальную методику расчета радиационного баланса. Правда, начатый в 1988 г. запуск серии геостационарных спутников третьего поколения позволит получить большое количество результатов наблюдений за глобальной облачностью в разное время суток в течение предстоящего десятилетия, что, вероятно, даст возможность в какой-то мере преодолеть эти трудности.

Исследование гидрофизических полей океана требует использования надежных методов обработки дистанционных измерений, что в свою очередь вызывает необходимость создания моделей формирования уходящего от поверхности океана излучения, его трансформации в атмосфере и, конечно же, развитой системы сбора данных исследований и технических средств, позволяющих их использование на больших массивах данных.

Так, например, в настоящее время наибольший объем данных дистанционного зондирования имеется по ТПМ. И здесь для увеличения достоверности и точности проведения наблюдений необходимо выделить проблемы, оказывающие воздействие на качество измерений: достижение необходимых характеристик собственно прибора для обеспечения соответственной точности измерения ТПМ; исследование физических процессов, формирующих поле ТПО и оказывающих влияние на точность измерений, включая суточный ход сезонного термоклина и тонкий поверхностный слой (ТПС); коррекция влияния атмосферы.

В настоящее время наиболее чувствительным спутниковым радиометром является AVHRR-2, используемый на ИСЗ серий НУОА и «Тайрос-Н». Суммарная погрешность измерений ТПМ данным прибором (в К) состоит из радиометрической чувствительности 0,05—0,12, абсолютной калибровки приемника излучения перед каждой линией сканирования 0,3, коррекции влияния облачности (днем 0,2—0,5, ночью 0,5). Конечно же, вклад этих слагаемых не одинаков и в основном определяется постановкой задачи, но абсолютную погрешность можно определить только непосредственным сравнением с результатами прямых контактных измерений. А вот здесь-то и начинают сказываться эффекты ТПС, суточного хода термоклина и коррекции влияния атмосферы.

Несмотря на то, что проблема ТПС стоит перед океанологами всего мира уже сравнительно давно, вопрос о ее решении еще далек от завершения. ТПС толщиной менее 1 мм холоднее нижележащих слоев на 0,1—0,5 °С и пространственно неоднороден по температуре, и суммарная квадратическая погрешность (σ_t) изме-

жений ТПО ИК-радиометром типа AVHRR близка к значению перепада температуры ТПС. Но до сих пор σ_t рассчитывается по данным измерений ТПО дистанционными методами и непосредственных контактных измерений поверхностного слоя океана (глубина до 1 м), причем последние измерения выполнены в отдельных точках, разнесенных, как правило, на десятки миль. Вполне вероятно, что радиометры следующего поколения, например, типа ATSR на ИСЗ ЕРС-1 будут проводить измерения ТПО, значения которой будут определяться эффектами ТПС и суточного хода гермоклина. Все это позволит более тщательно исследовать данные эффекты, интенсивность которых существенно зависит от изменчивости гидрометеорологических характеристик и изученность которых, как уже указывалось, является недостаточной.

Другая проблема определения ТПО — коррекция влияния атмосферы, вызываемого большим количеством факторов. К ним можно отнести: профили температуры, влажности, концентрации газов и аэрозолей, возможность попадания в поле зрения прибора облачности и т. д. Влияние атмосферы на принимаемое различными приборами, находящимися на ИСЗ, излучение сказывается во всех диапазонах, поэтому всегда стараются выделить атмосферные факторы, создающие основные помехи. Так, например, при измерениях в оптическом диапазоне пытаются отфильтровать облачность, а в микроволновом диапазоне — осадки. Но и при этом погрешности возникают при попадании частичных помех в поле зрения прибора. К ним можно отнести изменчивость влагосодержания атмосферы. Учет этих параметров при производстве измерений ТПО в ИК- или СВЧ-диапазонах сейчас осуществляется зачастую проведением подобных измерений на нескольких длинах волн с последующей коррекцией их в основном канале. Использование подобной идеи устранения влияния атмосферы осуществляется в двухканальном методе расчета ТПО (по Д. С. Робинсону) по результатам измерений в тепловом ИК-участке спектра на ИСЗ НУОА-7. При обработке результатов наблюдений в видимом диапазоне выделялись безоблачные участки, в которых ТПО (T_0) рассчитывалось по формуле

$$T_0 = 1,0351 T_{11} + 3,046 (T_{11} - T_{12}) - 283,93, \quad (72)$$

где T_{11} и T_{12} — радиационные температуры на длинах волн 11 и 12 мкм соответственно. Результаты расчетов сравнивались с данными независимых измерений, выполненных на 94 дрейфующих буях. Результаты сравнений выявили систематическое смещение, равное $0,06^\circ\text{C}$, среднеквадратическая погрешность составила $0,6^\circ\text{C}$.

Подобное использование в расчетах ТПО двухканальных методик показывает возможность классифицировать атмосферные параметры по их вкладу в принимаемое излучение и последовательно учитывать в зависимости от необходимой точности расчета исследуемых величин. Все это еще раз подчеркивает необходи-

мость тщательного анализа разнообразных методических погрешностей, возникающих при исследовании океанологических характеристик дистанционными методами. Причинами, вызывающими такие погрешности, могут быть и учет геоида, и влияние ионосферы на распространение излучения, и воздействие солнечного ветра на ИСЗ при выполнении альтиметрических измерений и т. д., а также неиспользование методов устранения мешающих факторов.

На пространственно-временные колебания ТПО и другие динамические характеристики океана оказывают влияние скорость и направление приводного ветра, значения которых с точностью, пригодной для решения практических задач, также можно определять дистанционными методами. Известны три способа оценки параметров ветра: по наблюдениям солнечной дорожки в видимом диапазоне; по данным измерений ветровым скаттерометром и по динамике распространения облачности. При наблюдениях солнечной дорожки для оценки скорости приводного ветра следует проводить регистрацию яркости бликовой поверхности и динамику изменений площади освещаемой поверхности. Впервые такие исследования проводились в марте — апреле 1979 г. на экваторе в восточной части Тихого океана (110° в. д.). Использовались результаты наблюдений с геостационарного спутника ГОЕС и с четырех заякоренных буйев с анемометрами на трехметровой высоте. В серии из 32 случаев расхождения составили 0,5 м/с. Ветровой скаттерометр впервые использовался на ИСЗ СИСАТ в августе 1979 г. По снимкам облачности, полученным на борту ИСЗ ГОЕС, скорость впервые определялась в 1979 г. и сравнивалась с данными 52 радиозондирований на четырех уровнях в слое 609—1829 м, при этом среднеквадратическая погрешность изменялась от 3,1 на высоте 1829 м до 2,2 м/с на высоте 609 м. При одновременном использовании всех трех способов были рассчитаны корреляционные коэффициенты для скорости ветра, полученной данными способами, которые составили: 0,6 для способов «солнечная дорожка» — скаттерометр; 0,6 для способов облачность — «солнечная дорожка»; 0,7 для способов облачность — скаттерометр. Испытания показали достаточную эффективность всех трех способов при некотором приоритете способа «солнечная дорожка» для получения более подробной информации о состоянии поверхности, несмотря на известные ограничения — небольшой диаметр освещаемой поверхности (около 5° широты в тропиках).

Большие перспективы в исследовании динамических процессов в океане дистанционными методами открываются при использовании радиовысотомеров (альтиметров). Радиолокационные альтиметры с рабочей длиной волны 2,22 см впервые были установлены в 1975 г. на ИСЗ ГОЕС-3, а затем на ИСЗ СИСАТ. Топографические особенности поверхности океана регистрировали данным прибором с точностью около 5 см, при этом погрешность определения высоты волн ($H_{1/2}$) при слабом волнении не превышала 0,5 м, а при сильном 10 %. При использовании альтиметра необ-

ходимо регулярно вносить поправку на содержание водяного пара в атмосфере и форму геоида. В данном эксперименте погрешность определения геоида колебалась от долей метра до 10 м. Программой TOPEX/Poseidon (1991 г.) предусмотрено использование на орбите альтиметра с точностью измерения высоты уровня моря 1—2 см, что позволит исследовать в глобальном масштабе топографические особенности водной поверхности и трехмерную структуру океанических течений.

Другое направление использования дистанционных методов в океанологической практике связано с получением качественно новых представлений об океанических процессах в связи с производством площадной съемки водной поверхности в полосе от сотни до нескольких тысяч километров и с разрешением от метров до километра. Получаемые из космоса снимки поверхности океана несут информацию об океанических процессах, заключающуюся в изображении пространственных контрастов в структуре принимаемого сигнала. Подобные контрасты могут быть вызваны флуктуациями температуры, цвета или шероховатости поверхности океана и являются, как правило, косвенной характеристикой самого процесса, для расшифровки которого необходимы специальные методы интерпретации получаемых на ИСЗ изображений.

Контрасты ТПО проявляются на спутниковых изображениях и позволяют выявить фронтальные разделы основных океанических течений типа Гольфстрим и Куроисио, а также развивающиеся на этих течениях колебания и меандры, отрыв меандров и формирование синоптических вихрей. Они также позволяют описывать планетарные волновые процессы и динамику апвеллингов.

Цветовые контрасты водной поверхности на спутниковых снимках обычно отражают лагранжеву динамику океанических процессов. Если цвет моря считать трассером, то можно оценить тонкую структуру вихревых образований в океане, динамику прибрежных течений, планетарные волновые процессы вблизи шельфовой зоны. Цветовые контрасты позволяют также выделить «грибовидные» течения, часто образующиеся в различных районах Мирового океана. Довольно легко дистанционными методами наблюдается битый лед, который тоже можно использовать как трассер приповерхностной динамики океана.

Картину шероховатости водной поверхности можно регистрировать при оптических наблюдениях вблизи солнечной дорожки и при радиолокационных измерениях. Процессы разнообразных пространственно-временных масштабов оказывают влияние на формирование структуры взволнованной водной поверхности, поэтому и наблюдаемые в спутниковых изображениях контрасты отражают различную океаническую динамику. Так, основной рассеивающий элемент — капиллярные волны — вызывается неоднородностями ветрового воздействия. Вот почему в структуре принимаемого сигнала получаются неоднородности, с помощью которых можно

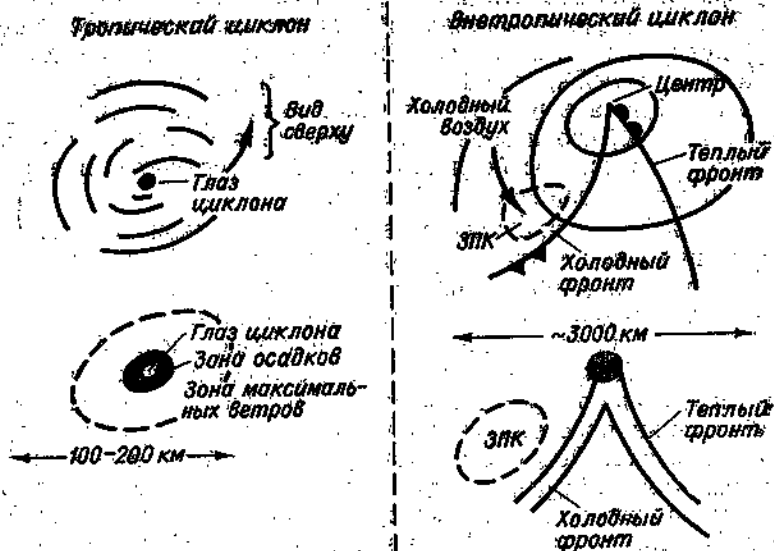


Рис. 35. Изображение атмосферных циклонов.

выявить атмосферные циклоны (рис. 35), или типичные мезомасштабные ячейки атмосферной циркуляции (рис. 36).

Для оценки основных гидрооптических и гидробиологических характеристик морской воды предназначен специальный сканер CZCS для анализа цвета воды в шельфовой зоне. Но точность определения этих характеристик в абсолютных единицах по данным дистанционных методов остается невысокой, где-то в пределах 20—30 %. Более интересные результаты были получены при одновременном проведении спутниковых и контактных наблюдений. Так, при проведении эксперимента с ИСЗ ЛАНДСАТ в заливе Сан-Франциско одновременно с пролетом спутника в реперных точках залива отбирались пробы на соленость, мутность (в нефелометрических единицах), концентрацию взвешенного вещества и хлорофилла для лабораторного анализа. По результатам лабораторных определений строились регрессионные зависимости наблюдаемых параметров от цифровых данных ИСЗ ЛАНДСАТ. Эти зависимости использовались для картирования исследуемых характеристик по всей акватории залива. Качество получаемой при этом информации оценивалось методами статистико-регрессионного анализа, результаты которого в общем согласуются с имеющимися представлениями о биологической активности данной акватории.

Важными этапами интерпретации спутниковых данных являются также калибровка данных, разработка методов атмосферной коррекции и географическая привязка результатов наблюдений. Для получения калиброванных данных, т. е. данных, полу-

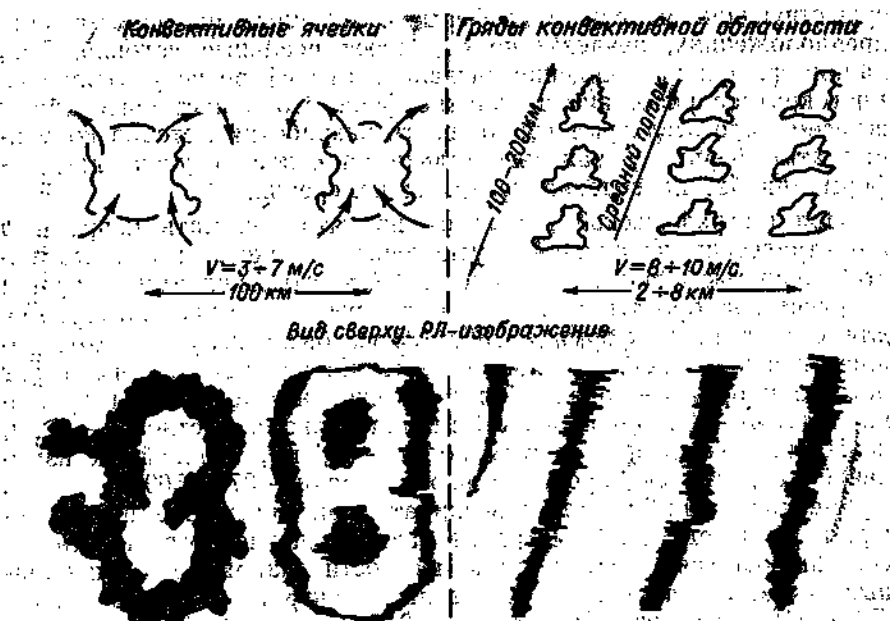


Рис. 36. Изображение типичных мезомасштабных ячеек атмосферной циркуляции.

ченных в абсолютных физических единицах, используются различные предполётные и во время полета калибровки датчиков, а также калибровки по эталонным участкам морской поверхности. Для подобной калибровки следует иметь определенную модель переноса излучения, разработка которой требует многократного одновременного измерения характеристик атмосферы и достаточно однородного тестируемого объекта. Хотя водные объекты в океане достаточно протяженны и однородны, принято считать, что они не обеспечивают необходимую в настоящее время точность, так как малость яркости излучения, уходящего от морской поверхности, не позволяет перекрыть весь возможный динамический диапазон измерений.

Что касается атмосферной коррекции, особенно в оптическом диапазоне, то в добавление к вышесказанному по этому вопросу следует отметить отсутствие серьезных разработок за последнее десятилетие, касающихся этой проблемы. По всей видимости, это вызвано тем, что, во-первых, вся методология обработки и интерпретации данных основывалась на статистическом анализе изображений, при котором коррекция влияния атмосферы практически была не нужна. Но этот метод требует больших затрат машинного времени, поэтому постепенно от него отходят. Во-вторых, слабая яркость уходящего от водной поверхности излучения не позволяла получать высокое качество изображений. В-третьих,

существующие модели атмосферы, основанные на упрощающих предположениях, неадекватно отражают реальные условия. Так, например, при прохождении сигнала в атмосфере не учитывалось многократное рассеяние и влияние фона. Но в настоящее время во всем мире исследуют возможности разработки методов коррекции атмосферных искажений только на основе спутниковой информации без проведения наземных измерений.

Под географической привязкой принято понимать коррекцию геометрических искажений спутниковых снимков, вызванных нестабильностью вращения Земли и ИСЗ, отклонениями спутника от расчетной орбиты и т. д. Так, в случае спутника ЛАНДСАТ для стандартного формата 185×185 км были получены следующие значения геометрических искажений: за счет отклонений от расчетной орбиты — около 40 км, за счет нестабильности вращения Земли — 13 км, кривизны Земли и рельефа местности — 4 км, колебаний скорости и высоты полета — 1,5 км, нелинейных изменений скорости сканирования вдоль строки — 370—560 м и т. д. Кроме того, ошибки могут возникать при оцифровке изображений и их передаче. Несмотря на такие большие погрешности, за счет имеющихся опорных точек местности (например, банк опорных точек, созданных для коррекции сканерных снимков с ИСЗ ЛАНДСАТ, состоит из более чем 200 000 единиц и непрерывно пополняется) ошибки, полученные на снимках спутников ЛАНДСАТ, НУОА, DMSP, идентифицируются и устраняются.

Возможности выявления глубинной динамики по данным наблюдений поверхности океана стали проявляться уже после первых спутниковых экспериментов, так как трансформация состояния водной поверхности происходит и под влиянием глубинных процессов. Так, например, широко известно, что с ИСЗ можно вести наблюдения за внутренними волнами по их проявлениям на поверхности за счет модуляции поверхностного волнения. Кроме того, существует потенциальная возможность количественной оценки вертикальной стратификации гидрофизических полей океана по данным измерений с ИСЗ. Здесь возможен, во-первых, учет корреляции между изменениями высот уровня водной поверхности и флуктуациями плотности морской воды в главном термостатическом клине. Во-вторых, параметры деятельного слоя океана можно оценивать по кинематике внутренних волн, когда дисперсионное отношение внутренних волн определяется стратификацией частоты Вайселя — Брента, а ее квадрат пропорционален вертикальному градиенту плотности морской воды. Другими словами, если мы имеем ряд снимков, равномерно разнесенных по времени, одной и той же акватории океана, то по модуляции поверхностного волнения можно восстановить дисперсионное соотношение внутренних волн, а от них уже перейти к определению глубины залегания сезонного термоклина и среднего значения частоты Вайселя — Брента в нем. Кроме того, возможна оценка траекторий распро-

странения пакетов внутренних волн. Но подобные исследования требуют высокой точности привязки изображений.

Области использования информации, получаемой с ИСЗ за последнее время, широко распространяются по всему миру. Так, большое значение придается исследованиям с помощью геостационарных ИСЗ. Несмотря на то, что аппаратура этих систем имеет более низкое пространственное разрешение, чем подобная аппаратура полярно-орбитальных спутников, ее высокое временное разрешение и возможность наблюдения в течение длительного времени заранее определенного района является их немаловажным достоинством. Кроме того, геостационарные спутники можно использовать как ретрансляторы данных с наземных и надводных систем сбора данных (ССД). По данным 1985 г., число подспутниковых ССД на нашей планете составляет более 4,3 тысячи. Например, японский ИСЗ ХИМАВАРИ-3 с августа 1984 г. принимает данные о распределении облаков, их температуре, ТПО, параметрах ветра в западной части Тихого океана. После обработки на наземных ССД эта информация ретранслируется через этот же спутник в 16 стран региона. Для сбора и ретрансляции информации с наземных и надводных ССД используется также, например, французская ССД ARGOS, устанавливаемая на полярно-орбитальные ИСЗ МО США типа СПОТ или DMSP, а также на геостационарные спутники ГОЕС. Собирая и ретранслируя информацию, подобные ССД выполняют географическую привязку различных движущихся источников данных (например, дрейфтеров) с точностью до 1 км и с дискретностью опроса 2—20 раз в сутки. Число потребителей информации в факсимильной форме этих ССД превышает 1000.

В 1984 г. на орбиту вокруг Земли был выведен ИСЗ ЛАНДСАТ-5, который завершил экспериментальный этап программы космических исследований земных ресурсов США. При выполнении этой программы пройден путь от получения неоткалиброванных изображений до их автоматической обработки с довольно высокой степенью точности. Более 100 стран в это время использовали результаты наблюдений, выполненных по программе ЛАНДСАТ, в частности и для исследования океана.

В настоящее время при исследовании ТПМ чаще всего используются результаты наблюдений ИСЗ НУОА и ГОЕС, на которых задействована аппаратура с наилучшим пространственным разрешением: ИК-радиометр AVHRR и ИК-зондировщик VAS (см. табл. 14 и 15). Задачи, решаемые каждым типом аппаратуры, зависят от ее возможностей. Так, данные наблюдений зондировщиком HIRS/MSU и микроволновым радиометром SMMR в основном используются для построения глобальных карт ТПО, а AVHRR и в какой-то мере VAS используются также для наблюдений за мезомасштабными и синоптическими явлениями в океане. Серия спутников НУОА, начиная с НУОА-7, является штатной

системой: службы сбора и обработки данных ТПМ американского Бюро данных и информации ИСЗ окружающей среды (NESDIS). Кроме того, эти спутники осуществляют сбор, обработку и передачу на Землю результатов измерений ТПО с дрейфтеров с помощью французской ССД ARGOS. При этом установку дрейфующих буев в Мировом океане осуществляет французская служба ARGOS. Получаемая таким образом информация о ТПМ и дрейфе буев распространяется заинтересованным потребителям по линии международной системы связи.

Иногда для повышения достоверности спутниковой информации и для проведения экспериментальных работ используют также и подспутниковые данные. Так, Вастано и Бернштейн, используя спутниковые изображения и данные наблюдений судовыми зондами ХВТ, исследовали изменчивость температурных фронтов и вихрей в северо-западной части Тихого океана, в зоне течений Куроисио и Ойясио. Оценивались размеры этих образований, скорость их перемещений, перепады температуры. Интересным результатом экспериментов в таком сложном в гидрометеорологическом отношении мезомасштабном поле явились проведенные сравнения данных измерений ТПМ, полученных по спутниковым изображениям и с помощью ХВТ. Рассчитанная при этом среднеквадратическая ошибка составила примерно $0,8^{\circ}\text{C}$, а систематическая ошибка около $0,6^{\circ}\text{C}$.

В ноябре 1979 г., в декабре 1981 г., в марте и июле 1982 г. был выполнен совместный анализ глобальных карт ТПО, полученных с помощью приборов AVHRR, HIRS/MSU, SMMR, для апробирования методик, проверки качества калибровок бортовой аппаратуры и сравнения этих карт с результатами: судовых измерений (точность около 1°C); данных ХВТ-измерений в северном и тропическом районах Тихого океана (выполнено по 400—1000 серий в месяц с точностью измерений $0,1^{\circ}\text{C}$ и систематической ошибкой $0,16$ — $0,38^{\circ}\text{C}$); данных дрейфтеров, выпущенных во время Первого глобального эксперимента в южном полушарии между 20 и 65° ю. ш., когда было запущено порядка 100 буев с дискретностью опроса около 6 ч. Проведенный эксперимент позволил получить большой массив данных, а их сравнительный анализ выявил среднеквадратические ошибки по 2 -градусной сетке по всем 4 месяцам: для данных AVHRR — $0,5^{\circ}\text{C}$; HIRS/MSU — $0,7^{\circ}\text{C}$; SMMR — 1% . При этом качество данных судовых наблюдений было признано плохим.

При анализе недельных карт ТПМ, построенных по ежедневным данным, обработанных на ЭВМ IBM-360 с проведением атмосферной коррекции по методике Е. Р. Макклэйна и полученных при исследовании экваториальных районов Атлантического и Тихого океанов в 1983 г. с ИСЗ НУОА-7 с помощью ИК-радиометра, были обнаружены длинные волны. За 1—2 месяца до начала формирования длинных волн на обоих акваториях возникал язык холодных вод, вытягивавшийся вдоль экватора. Длина волн после

их возникновения составляла около 1000 км, и они распространялись в западном направлении с фазовой скоростью 23—46 км/сут в Тихом океане между 90 и 160° в.д. и 18—42 км/сут в Атлантическом от африканского побережья до 30° з.д. В Тихом океане волны наблюдались с августа 1983 г. по февраль 1984 г. и имели характер последовательных колебаний, а в Атлантическом — с июня по август 1983 г. и распространялись в виде пакетов, состоящих из одной или нескольких волн. Возникновение подобной крупномасштабной динамики, выявленной при анализе ТПО, вероятно, связано с Южным экваториальным течением и сопутствующим им для каждого океана противотечением.

Показателен опыт практического использования данных дистанционных методов зондирования океана, реализованный на примере «Экспериментальной ориентированной на спутники программы для коммерческого рыболовства», осуществленной США в 1981—1982 гг. в западной части Тихого океана. В связи с введением каждым государством вдоль своего побережья экономических зон рыбопромысловый флот вынужден разыскивать и осваивать все новые и новые рыбопромысловые районы в открытом океане. А это, естественно, приводит к дополнительным затратам средств, времени, увеличивает степень риска и т. д. Отсюда возникает проблема гарантий или уверенности в том, что район, куда направляется рыболовецкая флотилия, является богатым рыбопромысловым районом. Кроме того, этот район должен быть обеспечен метеопрогнозами, гидропрогнозами и даже рыбопромысловыми прогнозами. А в районах открытого океана такую информацию можно получить только с помощью ИСЗ. Но здесь возникают свои проблемы.

Обработанные результаты наблюдений за гидрометеорологической обстановкой промыслового района должны поступать потребителю постоянно и практически сразу же после производства наблюдений в связи с сильной пространственно-временной изменчивостью этих параметров. Поэтому спутники с большой дискретностью выполнения съемок, например полярно-орбитальные типа ЛАНДСАТ, в этой области деятельности малопригодны, а наиболее оптимальной здесь может служить информация с геостационарных спутников.

Промысловые коски рыбы в открытой части океана в основном располагаются в толще воды, на глубине. Поэтому необходимо выявить возможные эффекты на водной поверхности, свидетельствующие о наличии и динамике промысловых скоплений на глубине и формирующие излучение, которое после прохождения атмосферы регистрируется на ИСЗ. Такими параметрами могут быть ТПМ и цвет воды в приповерхностном слое. Спутниковые наблюдения за ТПМ в данном эксперименте проводились с помощью ИК-радиометра AVHRR с ИСЗ НУОА-6, а за цветом воды сканером CZCS с ИСЗ «Нимбус-7», метеонаблюдения проводились с полярно-орбитальных и геостационарных спутников. Вся

акватория эксперимента была разбита на шесть географических районов, соответствующих основным ареалам распространения различных видов промысловых рыб. Рыболовные флотилии снабжались информацией о состоянии погоды (в виде карт) и прогнозом на 5 сут. Кроме того, для каждого района составлялись специальные планкарты с данными о ТПМ, глубине перемешанного слоя (ГПС), скорости и направлении приводного ветра, характеристиках поверхностного волнения, границах цветковых зон. Анализ значений ТПМ и ГПС проводился каждые 12 ч с использованием данных судовых, спутниковых наблюдений и измерений с самолета-обсерватории с помощью ИК-радиометров.

Проведенный эксперимент позволил выявить, во-первых, наличие связей между основными физическими и биологическими параметрами морской воды, а, во-вторых, основные законы миграции различных видов рыбы. Была разработана методика обработки и интерпретации данных ИСЗ для рыболовного промысла и определены перспективы и направленность развития этих работ.

Глава 4. Методика проведения подспутниковых экспериментов

Расширяющиеся масштабы исследования и освоения Мирового океана выдвигают все новые и новые требования к изучению и измерению различных параметров океана в глобальных масштабах. Особенно необходима информация об океане в вопросах долгосрочного прогноза погоды и проблемы изменения климата. Оперативные сведения об океане необходимы для обслуживания мореплавания, рыболовства, при исследованиях шельфовой зоны и загрязнения.

Имеющийся уже в настоящее время опыт исследования океана позволяет судить о том, что глобальная система слежения за состоянием океана должна опираться на использование традиционных технических средств наблюдений (НИС, АБС и т. п.) и, конечно же, космических методов. Однако следует отметить неадекватность получаемой неконтактными методами информации о Мировом океане. Измерение характеристик поверхности океана неконтактными методами носит относительный характер. Это связано как с изменчивостью собственных параметров измерительной аппаратуры, учитываемых в какой-то степени их контролем (так называемая внутренняя калибровка), так и с изменениями гидрометеорологических условий в районе исследований. На точность измерений заметное влияние, а степень этого влияния зависит от диапазона длин волн, оказывает состояние атмосферы, определяющее поглощение, рассеяние и ее собственное излучение, а также совершенство метода и точность расчета передаточной функции атмосферы. Привязка данных космических методов исследования океана к данным прямым измерений, проведенных во

время подспутниковых экспериментов, позволяет восстановить измеряемое физическое поле в значениях абсолютных единиц.

Известно, что характерной чертой современных спутниковых систем исследования океана является большая полоса обзора, высокое пространственное разрешение, разнообразие спектральных диапазонов измерений, высокая частота съемок одного и того же региона океана разной аппаратурой при различных гидрометеорологических условиях. Все это объясняет одну из важнейших проблем дистанционного зондирования океана — систематический контроль точности определения океанологических параметров по данным ИСЗ.

Поэтому при использовании космических методов исследования океана и представляется необходимым проведение подспутниковых экспериментов, сущность которых заключается в выполнении комплекса синхронных со спутниковыми наблюдениями во времени и пространстве измерений традиционными (с судов, АБС и т. п.) и авиационными методами. Подобная методика позволяет: фиксировать условия спутниковых измерений; моделировать с определенной точностью океанологические процессы; исследовать всю информационную систему в целом, что особенно важно для развития космических методов исследования океана. Под информационной системой здесь условимся понимать всю совокупность космических и иных технических средств и технологических процессов, используемых для исследования океана. Она состоит из спутниковой и авиационной систем измерений и наблюдений; системы традиционных стандартных океанографических работ и системы обработки получаемой при этом информации. Важным моментом создания эффективной космической системы исследования океана является координация развития входящих в нее отдельных систем, улучшение их характеристик, разработка методов и общей теории построения и управления работой системы в целом. В настоящее время для решения этих вопросов можно выделить четыре взаимосвязанные проблемы, методологической основой которых являются комплексные подспутниковые эксперименты: 1) разработка методов определения параметров атмосферы при проведении исследований океана из космоса (передаточная функция атмосферы); 2) разработка методов дешифрирования спутниковой информации; 3) разработка методов оценки информационных свойств материалов и средств исследования из космоса; 4) разработка методов построения и управления работой всей информационной системы.

При производстве комплексного подспутникового эксперимента обычно проводятся следующие виды работ:

- планирование и подготовка эксперимента, выбор района, разработка общих и частных программ, методик и индивидуальных заданий, калибровка используемой аппаратуры, подготовка карт, атласов и т. д.;
- предварительное обследование района и объектов исследований;

— отработка традиционных методов и средств гидрометеорологических измерений;

— проведение традиционных стандартных океанографических работ (НИС, океанографические буи, АБС и т. д.), оценка точности определения гидрофизических характеристик и восстановления измеряемых полей;

— исследование гидрометеорологических параметров с помощью авиации на различных высотах полета с целью определения доли влияния атмосферы (определение передаточной функции атмосферы);

— отработка методов сбора и обработки гидрометеорологической информации и ее оперативной передачи в центры комплексной обработки данных и заинтересованным организациям;

— отработка методов и средств неконтактного зондирования океана и атмосферы в строго контролируемых гидрометеорологических условиях;

— оценка качества функционирования бортовой аппаратуры неконтактного зондирования в процессе ее экспериментальной и штатной эксплуатации;

— организация метрологического обеспечения средств традиционных и неконтактных измерений;

— использование полученных материалов наблюдений для решения поставленных задач.

Районы подспутниковых экспериментов выбираются в зависимости от их изученности, перспективности для дальнейших исследований, возможности организации и проведения традиционных гидрофизических исследований. Необходимо учитывать также и ограничения, накладываемые на программу и порядок проведения эксперимента и связанные с энергетическими возможностями ИСЗ, объемом бортовой памяти, информативностью радиолиний передачи информации, режимом работы измерительных комплексов, возможностями наземных вычислительных средств обработки поступающей информации.

Бортовая спутниковая аппаратура в метрологическом отношении обычно контролируется с помощью абсолютной и относительной калибровок. Так, абсолютная калибровка, например, систем оптических датчиков заключается в предполетной проверке чувствительности с помощью калиброванного источника излучения; калибровке во время полета с помощью искусственного бортового источника или естественного солнечного калибратора; калибровке во время полета по однородным участкам поверхности моря. В случае использования в качестве калибратора однородных участков водной поверхности необходимо также измерять оптические характеристики атмосферы и поверхности моря для расчета энергетической спектральной яркости на входе оптического приемника, при этом используют надлежащую модель переноса излучения.

Первые подспутниковые эксперименты были выполнены в начале 70-х годов в связи с запуском ИСЗ серии ЛАНДСАТ. При этом кроме научных исследований проводились калибровки приемников широкоугольных каналов сканера MSS и телекамеры RBV на акваториях в штате Орегон. Первый из этих районов характеризуется чистотой оптических свойств, а второй — повышенным содержанием фито- и зоопланктона. По результатам наблюдений и модельных расчетов оценивалась глубина проникновения солнечного излучения в воду, которая сравнивалась с данными прямых измерений. С целью повышения точности данных спутниковых наблюдений исследовались возможности коррекции геометрических искажений изображений. В настоящее время для этого используется метод коррекции по опорным точкам местности (ОТМ) с достаточной точностью по известным координатам. Для изображений, например, сканера MSS (площадью 185×185 км), как правило, используется 15—20 ОТМ, позволяющих достичь среднеквадратического отклонения около 150 м, соответствующего картографическим требованиям к построению с масштабом 1:500 000. Для этого в США банк ОТМ, используемых для коррекции сканерных снимков Земли с ИСЗ серии ЛАНДСАТ, составляет 200 000 единиц и непрерывно пополняется. Подобный банк ОТМ Великобритании содержит 2600 единиц, что обеспечивает координатную привязку изображений, получаемых сканером MSS, с точностью 50 м, т. е. менее чем до одного элемента разрешения.

С полигона ВВС США в Ванденберге 9 апреля 1975 г. был запущен на круговую орбиту со средней высотой 843 км и наклонением $114,98^\circ$ ИСЗ ГОЕС-3. Главной целью программы ИСЗ ГОЕС-3 было уточнение сведений о гравитационном поле Земли, форме элементов геоида, структуре и динамике земной коры, поверхностном волнении, приливных колебаниях, структуре океанических течений, а также оценка работы бортовой аппаратуры в натурных условиях. Комплекс научной аппаратуры спутника включал в себя:

- радиолокационный высотомер с двумя режимами накопления данных (общим и интенсивным) на рабочей частоте 13,9 ГГц при 12,5 нс импульсах и двумя соответствующими режимами самоконтроля и самокалибровки. Высотомер обеспечивал измерения высоты до поверхности океана (0,5 м в общем режиме и 0,2 м в интенсивном при дискретности одно измерение в секунду), а получаемые данные позволили оценивать высоту волн с точностью более 25 %;

- радиолокационные ответчики в С-диапазоне (когерентный и некогерентный) и связанные с ними С-волновые радиолокаторы наземного сопровождения. Когерентный датчик обеспечивал измерение расстояний, их приращений и углов, а некогерентный датчик — измерение дальности и углов;

— лазерная система состояла из установленных в три ряда на усеченном под 45° основании 264 кварцевых кубических уголко-вых отражателей, наземных лазерных дальномерных систем и была предназначена для точного определения расстояния до ИСЗ;

— доплеровская система, состоящая из двух бортовых передатчиков и наземных доплеровских приемных станций. Рабочие частоты (162 и 324 МГц) когерентно связаны и генерировались сверхстабильным 5 МГц генератором. Наземные станции слежения измеряли доплеровские компоненты сигналов, принимаемых со спутника, путем подсчета циклов, образующихся как разность между принятой частотой и частотой генератора станции. Эти разности подбирались в соответствующих пропорциях для первоначальной коррекции за рефракцию в ионосфере и исправленной на ту же рефракцию доплеровской частоты;

— радиолокационный датчик в диапазоне S состоял из когерентного S-волнового датчика и системы антенны S-диапазона. Был предназначен для слежения Земля — спутник или спутник — спутник.

Анализ полученных при эксперименте данных о волнении (существенных высотах волн) позволил оценить их точность, оказавшуюся сравнимой с достигаемой при буйковых измерениях. Использование радиовысотометра дало возможность исследовать отклонения от морского геоида, обусловленные влиянием течений, вихрей, штормовых нагонов и других факторов. Информация о морском геоиде в данном случае оказалась гораздо более детальной и надежной, чем имевшаяся ранее. Для Гольфстрима осуществлен опыт получения оперативных данных о границах течения, волнения и скорости течения. Исследовались возможности оценки скорости приводного ветра по форме отраженной волны, получения детальных сведений о рельефе суши и ледяного покрова по данным измерений высот. Выявлена перспективность радиовысотометрии как средства распознавания океанических течений. Убедительной иллюстрацией этого могут служить данные, относящиеся к Гольфстриму, который может быть определен как узкая полоса течения с высокой скоростью вдоль границы между более холодными и плотными водами со стороны берега и более легкими и теплыми водами Саргассова моря. Гольфстрим как бы находится в состоянии геострофического баланса с четко выраженным градиентом давления между двумя водными массами. Границы течения могут идентифицироваться точками с нулевым градиентом давления.

Спутниковая радиолокационная высотометрия позволяет непосредственно измерять топографию морской поверхности и даже рассчитать геострофический компонент скорости течения. Так, Лейт и другие рассмотрели возможности идентификации границ Гольфстрима по результатам синхронных измерений радиовысотометром, ИК-радиометром и самолетными батиметрами. Раньше было доказано, что северная граница Гольфстрима опреде-

ляется изотермой 15°C на глубине 200 м. По данным о ТПМ, полученным с ИСЗ ГОЕС-3, было обнаружено, что тепловой фронт на поверхности океана располагается в среднем на 14,5 км севернее изотермы 15°C на глубине 200 м.

Классическим образцом проведения подспутникового эксперимента были исследования по программе ИСЗ СИСАТ, первого американского океанографического спутника. СИСАТ, запущенный 28 июня 1978 г. на почти круговую орбиту высотой около 800 км и наклоном 108° , обеспечивал обзор 95 % поверхности Мирового океана за 36 ч. После трехмесячного активного функционирования 10 октября 1978 г. СИСАТ вышел из строя в результате короткого замыкания в системе энергоснабжения.

Основной целью деятельности ИСЗ СИСАТ являлась оценка степени всепогодности микроволновых методов исследования Мирового океана, отработка методов и алгоритмов комплексных измерений гидрометеорологических параметров и обработки данных. В комплекс бортовой измерительной аппаратуры входили:

— радиолокационный альтиметр (ALT) с рабочей частотой 13,5 ГГц, длительностью излучаемого импульса 3 нс и полосой обзора на местности от 2,4 до 12 км, в зависимости от состояния поверхности моря был направлен в надир. Использование радиовысотомера показало перспективность его применения для исследования океанической циркуляции, ветрового волнения, приливов и течений;

— радиолокатор бокового обзора с синтезируемой апертурой (SAR) с рабочей частотой 1,275 ГГц, с полосой захвата на местности шириной 100 км по правому борту с центром 20° от надира и с довольно высоким пространственным разрешением около 25 м за счет синтезирования апертуры. Длина полосы обзора составляла порядка 4000 км и определялась зоной радиовидимости наземных приемных станций, т. е. временем непрерывной работы приемной аппаратуры. В задачи SAR входили восстановление пространственной структуры и спектра волн, картирование морских волн, айсбергов, границы океан—суша при любых гидрометеоусловиях и даже при наличии ураганов;

— ветровой скаттерометр (SASS)—микроволновый радиолокатор, предназначенный для обеспечения глобальных измерений в любое время суток в синоптических масштабах параметров приводного ветра. Скаттерометр работал на частоте 14,6 ГГц, освещая поверхность моря четырьмя веерообразными лучами—по два ортогональных луча шириной по 500 км каждый с обеих сторон от проекции трассы полета ИСЗ на водную поверхность. Регистрация доплеровского смещения отраженного сигнала позволяла достичь пространственного разрешения 50 км;

— сканирующий многоканальный микроволновый радиометр (SMMR), измерявший уходящее радиотепловое излучение по пяти каналам с рабочими частотами 6,6 ГГц (4,5 см), 10,7 ГГц (2,8 см), 18 ГГц (1,66 см), 21 ГГц (1,42 см) и 37 ГГц (0,8 см) на горизон-

тальной и вертикальной поляризациях, позволил восстанавливать поля ТПО и значения приводной скорости ветра. Пространственное разрешение на местности SMMR составляло от 22 км для канала 37 ГГц до 100 км для 6,6 ГГц, а ширина полосы сканирования по правому борту была 600 км. Для исключения влияния толщи атмосферы при восстановлении ТПО по данным этой аппаратуры необходимо также определение влаго- и водосодержания атмосферы. Абсолютная и относительная точности восстановления ТПО составили ± 2 и 0,5 К соответственно. Точность восстановления скорости приводного ветра в диапазоне 7—50 м/с равнялась ± 2 м/с;

— сканирующий радиометр видимого и ИК-диапазонов (VIRR), работавший в диапазонах длин волн 0,45—0,94 и 10,5—12,5 мкм, был предназначен для наблюдений за облачностью, оценки температуры верхней границы облаков и ТПО. При обработке данных измерений отмечено существенное снижение яркостной температуры в тепловом диапазоне с увеличением концентрации водяного пара в атмосфере по трассе полета. Поэтому для получения адекватной оценки ТПО необходим учет передаточной функции атмосферы.

За время работы СИСАТ были выполнены две серии комплексного подспутникового эксперимента:

— по программе Международного объединенного эксперимента по изучению взаимодействия океана и атмосферы (JASIN) в Восточной Атлантике, вблизи побережья Шотландии, в июне и августе 1978 г. В этом эксперименте участвовало 14 НИС из пяти стран, включая СССР и США, три метеорологических самолета-обсерватории. На полигоне площадью примерно 300×300 км, над которым было совершено около 200 пролетов ИСЗ, проводились сравнения данных спутниковых и контактных измерений скорости приводного ветра, высоты волн, содержания водяного пара и других характеристик динамического и термического состояния океана и атмосферы;

— в августе—сентябре 1978 г. в северо-западной части Тихого океана, в Аляскинском заливе был проведен другой подспутниковый эксперимент GOASEX (Gulf of Alaska Seasat Experiment), в ходе которого осуществлялись судовые, буйковые и самолетные измерения ТПО, солености, глубины, высоты, периода и спектра волн, температуры, давления и влажности воздуха, скорости и направления приводного ветра, солнечной инсоляции. В качестве технических средств наблюдений использовались океанологические буи, НИС «Океанографер», «Квадра» и «Ванкувер» (последние два канадских судна располагались на океанической станции «Рара» в точке с координатами 50° с.ш. и 145° з.д.). Кроме стандартных метеорологических наблюдений на судах выполнялась специальная программа измерений ветра и волнения в период ± 10 мин по отношению к моменту прихода спутника. Было совершено около 60 пролетов ИСЗ. В подспутниковых наб-

людениях участвовали также четыре самолета, выполнявших измерения скорости ветра на уровне полета, температуры воздуха и ТПО, параметров волнения в районе буев и судов. Использовались, кроме того, данные наблюдений на попутных судах, информация с геостационарного спутника (ГОЕС-3), метеорологических спутников НУОА и Министерства обороны США.

По результатам этих двух важнейших экспериментальных программ были разработаны алгоритмы расчетов вышеперечисленных гидрометеорологических характеристик по данным ИСЗ СИСАТ, а на статистически обеспеченных данных контактных и самолетных измерений проведено их обоснование.

При рассмотрении возможностей определения характеристик волнения и ветра довольно информативными оказались результаты наблюдений с помощью радиолокационного альтиметра. Следует отметить, что для обеспечения надежной интерпретации этих данных понадобились серьезные усилия по калибровке высотометра. Калибровка системы ИСЗ СИСАТ ALT выполнялась по данным измерений альтиметром с самолета и ИСЗ ГОЕС-3, а также лазерным профилометром и контактными методами в виде буйковых и судовых наблюдений. Полученные данные использовались для интерпретации значений существенных высот волн (СВВ) и радиолокационного коэффициента обратного рассеяния (РКОР). Значение СВВ определялось как увеличенная в четыре раза средняя квадратическая высота волн. При сравнении наземных и спутниковых данных коррекция последних проводилась с учетом аппаратных погрешностей, передаточной функции атмосферы и других гидрометеорологических параметров. При сопоставлении данных о высоте полета ИСЗ результаты наблюдений приводились к уровню земного эллипсоида.

Полученные результаты позволили определить точность измерений радиовысотометром, которая оказалась в пределах 5—9 см для условий наблюдений, когда СВВ не превышала 4 м. Подобная точность вполне приемлема для получения существенной информации о вариациях локальной топографии поверхности океана. В 70 % случаев сопоставления значений СВВ по данным СИСАТ и контрольных измерений расхождения не превосходили 0,5 м. Среднеквадратическая разность между данными спутникового альтиметра и измерениями высоты волн с 51 буя оказалась равной 0,38 м. Кроме того, проводились сравнения спутниковых данных со 163 судовыми наблюдениями волнения. Стандартное отклонение этих двух рядов наблюдений составило 0,87 м.

Для определения возможностей изучения поверхностного волнения на основе анализа изображения водной поверхности, полученного радиолокатором бокового обзора SAR, в качестве контрольных использовались данные буйковых и самолетных наблюдений в сентябре 1978 г. в Аляскинском заливе. Аппаратура, установленная на буях, позволяла непосредственно измерять характеристики волнения, а самолет обеспечивал получение радио-

локационных изображений. Анализ условий волнения осуществлен с использованием методики оптического Фурье-преобразования, позволившего определить длину и направление распространения волн (неоднозначность восстановленного направления устранялась путем привязки к контрольным данным). Сравнительный анализ спутниковых, самолетных и буйковых (для 11 точек) данных, совпадающих в пределах 25 км и 1,5 ч, выявил согласие значений длин волн в пределах $\pm 15\%$ и направлений около $\pm 25\%$, что соответствует существующим требованиям к точности восстановления. Анализ спутникового радиолокационного изображения выявил невозможность распознавания высот волн около 1 м, но уверенно выявил высоты от 2 м.

В Аляскинском заливе был также выполнен комплекс наблюдений для калибровки скаттерометра. Решение обратной задачи восстановления волнения по данным скаттерометра заключается в использовании брэггова рассеяния микроволнового излучения капиллярными волнами с характерным масштабом порядка сантиметров. РКОР прямо пропорционален амплитуде капиллярных волн, которая в свою очередь пропорциональна скорости приводного ветра. С учетом того, что рассеяние радиоволн назад анизотропно, можно восстановить также и направление ветра.

Сравнение спутниковых и обычных данных о приводном ветре были сделаны для четырех видов контактных наблюдений: океанографические буи, суда с анемометрами на фиксированной высоте, суда с анемометрами на неизвестной высоте (при сравнении принималась высота 26 м), оценка ветра на судах по шкале Бофорта. Сопоставление результатов восстановления характеристик ветра по данным спутникового скаттерометра с результатами наблюдений на буях и самолетах дало среднее квадратическое отклонение 0,9—2,7 м/с и 16—28°. Ошибки оказались минимальными при использовании данных наблюдений на буях и судах с осреднением за интервалы от 8,5 до 20 мин и максимальными при наблюдениях на попутных судах с осреднением за 2 мин. При оценке результатов сравнений необходимо учитывать, что погрешности свойственны как спутниковым, так и контактным наблюдениям. Сказывается также и неадекватность пространственно-временного осреднения. Сравнение с использованием сглаженных полей ветра (пространственное разрешение около 100 км), приведенных к высоте 19,5 м и условиям нейтральной устойчивости атмосферы, показало, что скорость ветра по данным скаттерометра систематически завышена на 1,1—5,2 м/с. Из-за ограниченного времени наблюдений обеспеченность данных в области скоростей ветра менее 4 м/с и более 16 м/с оказалась недостаточной.

Точность восстановления ТПМ оценивалась путем сравнения с картой осредненных значений ТПМ за сентябрь. Почти всегда значения ТПМ по данным наблюдений SMMR оказывались заниженными на несколько градусов Цельсия. Точность восстановле-

ния ТПМ с помощью алгоритма Вилхейта, который отражает эмпирические статистические зависимости измеряемой радиояркой температуры с ТПМ и скоростью приводного ветра с учетом влаго- и водосодержания атмосферы, определялась для различных случаев на шести витках. Если исключить систематическую погрешность (3—4 °C), то согласование спутниковых и контактных данных находится в пределах $\pm 1,5^\circ\text{C}$.

Из подспутниковых экспериментов можно отметить эксперимент с «Нимбус-7», запущенным на орбиту в 1978 г. На этом ИСЗ использовались СВЧ-радиометр SMMR и сканер для анализа цвета воды шельфовой зоны CZCS. Его спектральные каналы более узкие, а детекторы более чувствительные, чем у сканера MSS системы ЛАНДСАТ. Внутренняя калибровка прибора во время полета состояла в периодическом сравнении яркости калиброванной лампы накаливания с яркостью восходящего излучения. Исследования на «Нимбус-7» под эгидой НАСА позволили выполнить большой объем судовых и самолетных измерений (включая измерения с высотных самолетов-обсерваторий типа F-106 и U-2) оптико-биологических характеристик морских акваторий и атмосферных характеристик для разработки и верификации моделей оптического излучения и биопродуктивности океана.

Глава 5. Современные программы спутниковых исследований

Выполненные к настоящему времени эксперименты по исследованию океана из космоса выявили возможности количественного определения ряда гидрометеорологических характеристик и формирования новых представлений о гидродинамических процессах в океане на основании измерений со спутников. В связи с выводом на орбиту вокруг Земли нового поколения ИСЗ, оборудованных более совершенной по своим технологическим, техническим и прочим возможностям измерительной аппаратурой, представляется, что основным направлением деятельности дистанционных методов исследования океана будет переход от экспериментов с отдельными приборами к созданию спутниковых систем и разработка методики обработки и интерпретации результатов измерений, особенно при исследовании динамики атмосферы и океана. Исходя из этого представляется интересным рассмотреть проекты перспективных программ спутниковых исследований океана и атмосферы над ним, планируемых ведущими в промышленном отношении странами мира (без России) в настоящее время (по данным Г. А. Гришина и Ю. В. Кихая).

Соединенные штаты Америки объявили несколько программ дистанционного зондирования океана из космоса. Наиболее перспективной из них признается программа NROSS, поддерживаемая ВМФ США и начатая в 1989 г. Спутники этой серии предназна-

чены для исследования характеристик приводного ветра скаттерометром, причем скорость ветра будет измеряться в диапазоне 3—30 м/с с точностью около 2 м/с; ТПО — с помощью микроволнового радиометра с точностью 0,5 К; высоту уровня водной поверхности — лазерным альтиметром с точностью не хуже ± 10 см. Серия спутников NROSS является основным элементом программы НАСА для изучения океана из космоса. Стоимость одного ИСЗ по программе NROSS оценена в 290 млн долларов. Кроме программы NROSS НАСА планирует осуществить еще два океанографических эксперимента: совместный американо-французский эксперимент TOPEX/Poseidon по изучению топографии морской поверхности и OCI по исследованию цвета воды Мирового океана. Эксперимент OCI на базе французского ИСЗ СПОТ-3 предназначен для исследования оптико-биологических параметров водной среды с наблюдением за распределением и пространственно-временной изменчивостью хлорофилла в Мировом океане, а также верификации лабораторных моделей изменчивости первичной продукции. Исследования в основном проводятся модифицированным вариантом сканера CZCS, имеющего шесть каналов в видимом диапазоне и два в ИК-диапазоне.

Кроме этих экспериментов НАСА проводит еще две крупные океанографические программы: TOGA и WOGF. Эксперимент TOGA предназначен для исследований по проблеме взаимодействия океана и атмосферы. С этой целью будет определяться вероятность реакции земной атмосферы на аномалии с временными масштабами от месяца до года гидрометеорологических параметров тропической зоны океана, исследоваться возможности моделирования океана и атмосферы в данных масштабах времени, а также будут предприняты усилия по созданию научных основ наблюдений и передачи данных в целях составления оперативного прогноза исследуемых явлений. Программа WOGF посвящена изучению законов динамики вод Мирового океана. С этой целью исследуются параметры термодинамики и циркуляции верхнего и среднего слоев океана, характеристики приповерхностного ветра, изменчивость динамических высот, трассеров, теплосодержания, относительной завихренности (осредненной по некоторой площади) и т. д. В качестве измерительной аппаратуры используются альтиметры, радиолокаторы бокового обзора с синтезированной аппаратурой, ИК- и СВЧ-радиометры, а в океан будет запущено большое число дрейфтеров со спутниковыми ответчиками.

Так же как и НАСА, программы исследований океана из космоса разрабатывает Национальное управление по исследованию океана и атмосферы США (НУОА). Эти программы предусматривают проведение исследований вертикальных профилей температуры и влажности в атмосфере, ТПМ и принципы распределения по поверхности Земли штормов, облачности, ледяных полей и снега. Исследования предусматривают эксплуатацию геостационарных (ГОЕС), полярно-орбитальных (НУОА), метеорологиче-

ских ИСЗ и спутников серии ЛАНДСАТ. Так, для изготовления и запуска в 1988 и 1990 гг. двух новых ИСЗ ЛАНДСАТ-6, -7 выделены государственные субсидии в размере 300 млн долларов.

Канада проводит исследования океана из космоса под управлением Центра космического зондирования, который осуществил запуск в 1990 г. ИСЗ РАДАРСАТ с основным измерительным прибором РЛС БО, предназначенным для картирования морского льда и топографии морской поверхности с пространственным разрешением 25 м. Кроме того, на спутнике установлен скаттерометр для измерения характеристик приповерхностного ветра и ИК-радиометр для измерения ТПМ. Данная программа разрабатывается совместно с США и Великобританией. Также разрабатывается комплексная система обработки спутниковых изображений MOSAICS, принимаемых практически с любых ИСЗ.

Европейское экономическое сообщество создало Европейское космическое агентство (Великобритания, Бельгия, Испания, Италия, Нидерланды, Норвегия, Португалия, Турция, Франция, ФРГ, Швейцария и Швеция), предполагающее в конце 80-х годов запуск для океанографических исследований ИСЗ ЕРС-1. Основными задачами этой программы является развитие и содействие экономическим и торговым отношениям в пределах принятой экономической зоны 200 миль; исследование гидрофизических процессов, протекающих в шельфовой зоне; контроль полярных областей; участие в программе исследования климата на земном шаре (WCRP). Спутник оснащен одним активным микроволновым инструментом (AMI), состоящим из трех модулей: радиолокатор бокового обзора, ветровой и волновой скаттерометры. При работе в режиме РЛС БО излучение принимается на горизонтальной поляризации на частоте 5,3 ГГц под углом 23° от надира с пространственным разрешением 30×30 м (100×100 м в режиме непосредственной передачи). В режиме ветрового скаттерометра прибор позволяет измерять скорость и направление ветра в диапазоне 4—24 м/с с точностью 10 % (± 2 м/с) по скорости и ± 20 % по направлению. Блок волнового скаттерометра измеряет высоту волн в диапазоне 1—20 м с точностью 10 % и направление волн длиной 50—1000 м с точностью 20 % в диапазоне 0—360°. Кроме того, на борту ЕРС-1 установлены радиолокационный альтиметр с разрешением 5 см, позволяющий измерять высоты волн в диапазоне 1—20 м с точностью $\pm 0,5$ м; сканирующий вдоль трассы ИК-радиометр (ATSR), работающий в каналах 3, 7, 11 и 12 мкм, с чувствительностью 0,1 К, пространственным разрешением 1×1 км, полосой захвата 500 км и точностью измерения 0,5 К в квадрате 50×50 км при облачности 80 %.

Кроме программы ЕРС Европейское космическое агентство разработало программу метеорологических наблюдений с геостационарных спутников МЕТЕОСАТ. Запуск МЕТЕОСАТ-2 осуществлен в 1987 г., а эксплуатация ИСЗ этой серии планируется

до 1995 г. Планируется также создание глобальной навигационной системы NAVSAT из 24 ИСЗ для определения в любой момент времени независимо от погодных условий трех координат положения стационарных и движущихся с любой скоростью объектов с точностью географической привязки 80—100; 5—20 или 0,05—0,2 м. Ввод системы в эксплуатацию начался в 1990 г. В соответствии с современными требованиями на всех исследовательских ИСЗ как геостационарных, так и полярно-орбитальных намечается увеличение обработки результатов наблюдений непосредственно на борту спутника. Возрастет также роль ИСЗ как ретрансляторов информации с наземных и надводных ССД.

Франция под эгидой Национального центра космических исследований CNES использует для исследования океана совместно с Бельгией и Швецией спутниковую систему СПОТ. Запуск первого спутника данной системы состоялся в феврале 1989 г., когда этой же ракетой был выведен на орбиту и первый шведский спутник «Викинг». Исследовательская аппаратура спутника СПОТ-1 состоит из двух видеокамер HRV, ориентированных по обе стороны от трассы полета, средств сбора и передачи результатов наблюдений. Камеры HRV, работающие в двух режимах (мультиспектральном и панхроматическом), имеют три диапазона 0,5—0,59; 0,61—0,68; 0,79—0,89 мкм с разрешением 20 м и один диапазон 0,51—0,73 мкм с разрешением 10 м. При наблюдениях в нади́р с высоты 830 км полоса обзора составляет 60 км, а управление зеркалами позволяет вынести зону наблюдений от трассы полета, что увеличивает захват до 80 км. Наклонное зондирование обеих камер позволяет захватить полосу 117 км с трехкилометровым перекрытием, что позволяет строить стереоизображения. В будущем эти спутники будут оснащены альтиметром «Посейдон», прибором для измерения цвета воды (модификация CZCS), системой сбора данных ARGOS и системой межспутниковой лазерной связи. Результаты наблюдений со спутника СПОТ-1 в цифровой форме передаются в тулузский Центр приема и обработки изображений, введенный в строй в 1984 г. Подобные центры приема и обработки изображений с ИСЗ СПОТ и ЛАНДСАТ-4, -5 планируется построить в Бангладеш, Бразилии и Швеции. С выводом на орбиту ИСЗ СПОТ-2 в 1990 г. стоимость этого проекта составила 4 млрд франков, а стоимость центра по приему и обработке изображений оценивается в 130 млн франков.

Япония в 1987 г. запустила экспериментальный спутник для исследования океана МОС-1, оборудованного тремя измерительными системами. Многоканальный с автономным электронным сканированием радиометр MESSR, работающий в четырех спектральных диапазонах между 0,51 и 1,1 мкм с разрешением 50 м в полосе захвата 100 км. Радиометр с механическим сканированием VIRR, работающий в одном видимом (900 м разрешение) и трех тепловых инфракрасных диапазонах с разрешением 2,7 км.

Микроволновый сканирующий радиометр MSR, работающий на частотах 23,8 и 31,4 ГГц с разрешением 32 и 23 км соответственно и предназначенный для определения содержания водяного пара в атмосфере.

Следует отметить, что в целом до 2000 г. планируются запуски семи ИСЗ типа МОС, пяти типа ЕРС, пяти типа ГОЕС, не считая спутников серий ЛАНДСАТ, НУОА, NROSS и др. Использование новейших аппаратурных разработок позволяет считать, что в первом приближении все методические новинки, направленные на выбор оптимальных условий наблюдения за океаном, обеспечения коррекции искажающего влияния атмосферы, геометрических искажений, географической привязки и др., решены с точностью, пригодной для практического использования. Обработка спутниковой информации в основном осуществляется на мощных универсальных ЭВМ и специализированных комплексах, позволяющих проводить параллельное и конвейерное выполнение операций над большими массивами данных. Имеющиеся точностные характеристики разнообразной спутниковой аппаратуры и научные программы исследований океана и атмосферы над ним из космоса, сформулированные рядом развитых стран мира в рамках национальных и международных проектов на ближайшее будущее, позволяют предположить, что большинство важнейших процессов динамики, гидробиологии и гидрооптики океана будут успешно контролироваться с помощью ИСЗ уже к концу нашего столетия. Намечилась тенденция к созданию всемирной информационной службы наблюдения Земли из космоса, которая включала бы в себя одновременно системы проведения космических и наземных наблюдений, сбора и научного анализа результатов наблюдений.

АВТОРИТЕТ

Коровин Владимир Петрович

Зарубежные технические средства в океанологии

Учебное пособие

Редактор О. Д. Рейнгерц

ЛР № 020309 от 28.11.91.

Сдано в набор 10.01.1994.

Подписано в печать 6.09.1994

Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная.

Печать высокая. Печ. л. 12, 25. Уч.-изд. л. 13, 2. Тираж 500 экз. Зак. 30

Российский государственный гидрометеорологический институт.

195196, С.-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

Типография ВАС