

ГЛАВА 11

МОРЯ

*А. Г. Костяной, С. А. Лебедев, Ф. С. Терзиев, А. В. Григорьев,
Р. Е. Никонова, Ю. Г. Филиппов*

ВВЕДЕНИЕ

Современные изменения климата оказывают заметное влияние на состояние морей, это касается как их физических, так и экологических параметров. В результате меняются условия хозяйственной деятельности на морях и состояние океана как важнейшей части климатической системы Земли.

Для России изменения состояния морей — серьезный вопрос. На севере и востоке территория страны непосредственно выходит к океану. Система прибрежных морей является важной частью ее природного комплекса и имеет большое значение для экономики России. На северо-западе и на юге соответственно Балтийское и Черное моря традиционно играют существенную хозяйственную роль. Столь же важное в хозяйственном отношении Каспийское море вследствие своей геофизической закрытости обладает еще и высокой чувствительностью к изменению климата на водосборе и из-за этого требует особого внимания при оценке последствий изменения климата.

В данной главе рассмотрены методические вопросы, связанные с организацией мониторинга состояния морей и его методического обеспечения. Акцент сделан на измерении тех параметров, которые меняются под воздействием изменения климата. При этом вопросы оценки будущих изменений не затрагиваются, а детально обсуждаются основные аспекты выявления произошедших изменений.

ФУНКЦИИ ВЕДОМСТВ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ В РОССИИ

В связи с необходимостью выявить антропогенные изменения состояния природной среды возникла потребность в организации специальной информационной системы — системы наблюдения и анализа состояния природной среды, в первую очередь ее загрязнения и эффектов, вызываемых им в биосфере. Именно такую систему в 1974 г. Ю. А. Израэль предложил называть мониторингом состояния природной среды, а точнее — мониторингом антропогенных изменений окружающей природной среды. В соответствии с определением мониторинга в него включаются в качестве основных элементов наблюдения за факторами воздействия и состоянием окружающей среды, прогноз ее будущего состояния и оценка фактического и прогнозируемого состояния природной среды (Израэль, 1979).

Понятие мониторинга в настоящее время широко используется в разных областях деятельности. Поэтому смысл, вкладываемый в него, широко варьирует. В науках о Земле и в экологии под мониторингом обычно подразумевается регулярная система наблюдений, имеющая целью получение информации, необходимой для осуществления и планирования тех или иных видов деятельности.

Основой мониторинга, как правило, является программа, определяющая перечень наблюдаемых показателей, порядок производства наблюдений, содержание создаваемой инфор-

мационной продукции. Опыт, накопленный в разных областях деятельности, показывает, что при формировании программы мониторинга в обязательном порядке должны учитываться следующие обстоятельства. Во-первых, — это правовые основы мониторинга как общественно значимой информационной системы. Во-вторых, — это цели и задачи мониторинга, в которых отражено предназначение информации, являющейся основной продукцией этой системы. В-третьих, — это специфические особенности, присущие явлениям и процессам, выступающим в качестве объектов наблюдений.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 219 от 10.04.2007 “Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов” (в ред. Постановлений Правительства РФ от 22.04.2009 № 351, от 17.10.2009 № 830) организация и осуществление мониторинга проводятся Федеральным агентством водных ресурсов, Федеральным агентством по недропользованию и Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет) с участием уполномоченных органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации.

Росгидромет при осуществлении мониторинга поверхностных водных объектов совершает следующие действия:

— осуществляет регулярные наблюдения за состоянием поверхностных водных объектов в части количественных и качественных показателей состояния водных ресурсов, внутренних морских вод и территориального моря Российской Федерации, континентального шельфа и исключительной экономической зоны Российской Федерации на базе государственной наблюдательной сети;

— проводит оценку и прогнозирование изменений состояния поверхностных водных объектов в части количественных и качественных показателей состояния водных ресурсов;

— обеспечивает сбор, обработку, обобщение и хранение сведений, полученных в результате наблюдений за водными объектами, и представление в Федеральное агентство водных ресурсов данных мониторинга поверхностных водных объектов с учетом данных мониторинга, осуществляемого при проведении работ в области гидрометеорологии и смежных с ней областях, в соответствии с установленными формами и порядком представления данных, а также порядком информационного обмена;

— обеспечивает предоставление федеральным органам исполнительной власти, органам государственной власти субъектов Российской Федерации, органам местного самоуправления, а также юридическим и физическим лицам данных мониторинга поверхностных водных объектов в порядке, установленном Федеральным законом РФ “Об информации, информационных технологиях и о защите информации”.

Основные функции в области фонового мониторинга окружающей природной (в том числе морской) среды традиционно были сосредоточены исключительно у специально уполномоченных на то государственных органов. Это нашло отражение во введенном в действие в 2002 г. законе РФ “Об охране окружающей среды”: “Государственный мониторинг окружающей среды (государственный экологический мониторинг) осуществляется в соответствии с законодательством Российской Федерации и законодательством субъектов Российской Федерации в целях наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе за состоянием окружающей среды в районах расположения источников антропогенного воздействия, и воздействием этих источников на окружающую среду, а также в целях обеспечения потребностей государства, юридических и физических лиц в достоверной информации, необходимой для предотвращения и (или) уменьшения неблагоприятных последствий изменения состояния окружающей среды”.

В последующем развитие законодательства в этой сфере было связано с конкретизацией разных видов экологического мониторинга, а также с расширением прав и обязанностей хозяйствующих субъектов по его проведению. Наряду с осуществлением мониторинга источников антропогенного воздействия предприятия стали привлекаться к выполнению других видов экологического мониторинга.

В частности следует отметить конкретизацию понятия мониторинга водных объектов в Водном кодексе РФ (2006 г.) и в Постановлении Правительства РФ № 219 от 10.04.2007 “Об утверждении Положения об осуществлении государственного мониторинга водных объектов” (в ред. Постановлений Правительства РФ от 22.04.2009 № 351, от 17.10.2009 № 830). Мониторинг включает в себя:

1) регулярные наблюдения за состоянием водных объектов, количественными и качественными показателями состояния водных ресурсов, а также за режимом использования водоохранных зон;

2) сбор, обработку и хранение сведений, полученных в результате наблюдений;

3) внесение сведений, полученных в результате наблюдений, в государственный водный реестр;

4) оценку и прогнозирование изменений состояния водных объектов, количественных и качественных показателей состояния водных ресурсов.

Мониторинг водных объектов можно подразделить по их типам следующим образом:

1) мониторинг поверхностных водных объектов с учетом данных мониторинга, осуществляемого при проведении работ в области гидрометеорологии и смежных с ней областей;

2) мониторинг состояния дна и берегов водных объектов, а также состояния водоохранных зон;

3) мониторинг подземных вод с учетом данных государственного мониторинга состояния недр;

4) наблюдения за водохозяйственными системами, в том числе за гидротехническими сооружениями, а также за объемом вод при водопотреблении и водоотведении.

В соответствии с этими документами существенно расширились понятия о целях, задачах и субъектах реализации фоновой мониторинга морской природной среды. Перечень нормативно-законодательных документов, регламентирующих деятельность по организации и проведению такого мониторинга, достигает 70 документов.

Функциональной основой комплексного фоновой мониторинга природной среды морей России является морская наблюдательная система Росгидромета, предназначенная для определения характеристик состояния природной среды морей России и являющаяся составной частью государственной наблюдательной сети.

МОРСКАЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА В РОССИИ

Морская наблюдательная система — комплекс наблюдений, проводимых с разных наблюдательных платформ унифицированными средствами измерений на основе единой нормативно-методической и правовой баз. Морская наблюдательная система в России включает наземную и космическую подсистемы. В состав наземной подсистемы входят сеть станций морских береговых и устьевых гидрометеорологических наблюдений, сеть добровольных и штатных судовых наблюдений, сеть океанографических наблюдений и работ, сеть автоматических буйковых станций (заякоренных и дрейфующих), сеть общегосударственной службы наблюдений за загрязнением морей. В состав космической подсистемы входит группа российских и зарубежных метеорологических и специализированных спутников, позволяющих делать снимки земной поверхности из космоса, определять уровенную поверхность под маршрутами пролета, темпера-

туру воды, содержание взвеси и хлорофилла в поверхностном слое, ряд других гидрометеорологических и экологических параметров, а также центры по приему и обработке космической информации.

Основу морской наблюдательной сети России составляют стационарные и подвижные пункты наблюдений за состоянием морской природной среды, размещенные на морском побережье, морских островах, в устьях рек и в открытом море. Эта сеть пунктов наблюдений предназначена для получения информации о явлениях и процессах, протекающих в прибрежной зоне моря, на поверхности и в глубинных слоях, о взаимодействии морских процессов с атмосферными процессами, а также для оценки степени загрязнения морской среды.

Морская наблюдательная сеть России является составной частью государственной наблюдательной сети и делится на две категории: основную сеть и дополнительную.

Основная (федерального назначения) сеть морских наблюдений представляет собой минимально необходимую с точки зрения научной, практической и экономической целесообразности систему, предназначенную для выполнения комплексного фонового мониторинга состояния морей России и степени ее загрязнения, для изучения многолетней и сезонной изменчивости метеорологических, океанографических и гидрохимических параметров (включая параметры загрязнения моря), для обеспечения потребностей в информации о фактическом и прогнозируемом состоянии морской среды в зоне ответственности и интересов России.

Дополнительная (специального назначения) сеть морских наблюдений предназначена для решения специализированных задач в области гидрометеорологии и океанографии, тематических исследований режима и состояния морской среды в интересах специальных потребителей информации.

Из основной морской наблюдательной сети выделяется реперная сеть, предназначенная для изучения долговременных, вековых изменений гидрометеорологических и гидрохимических величин, а также параметров загрязнения морей России и устьевых областей впадающих в них рек. В реперную (вековую) сеть морских наблюдений входят сеть морских береговых и устьевых станций и постов, а также сеть океанографических станций и разрезов, в том числе

1) сеть океанографических судовых наблюдений (работ), производимых в открытом море на стандартных горизонтах с целью получения информации о состоянии морской среды и атмосферы над морем, а также о протекающих в этих средах физических и химических процессах;

2) морская гидрометеорологическая береговая и устьевая сеть, представляющая совокупность стационарных пунктов стандартных морских наблюдений, размещенных на морском побережье, морских островах, искусственных морских сооружениях (эстакадах, платформах, маяках);

3) сеть пунктов наблюдений за загрязнением морских вод для получения данных о химическом составе и загрязнении вод морей и океанов по химическим и биологическим показателям;

4) сеть морских автоматических буйковых станций, а также подводных автономных и управляемых аппаратов, представляющая совокупность стационарных и подвижных пунктов морских наблюдений (измерений), установленных на заякоренных, подвижных, управляемых и дрейфующих буйках и аппаратах.

Сеть океанографических судовых наблюдений

Эта сеть состоит из океанографических станций, океанографических разрезов, океанографических съемок и рейдовых станций.

Океанографические станции по продолжительности работ на них подразделяются на разовые, многочасовые, полусуточные, суточные и многосуточные. По способу удерживания судна при производстве океанографических работ станции могут быть якорными и дрейфовыми. Океанографические станции по числу выполняемых с определенной дискретностью серий наблюдений делятся на односерийные и многосерийные.

Океанографические разрезы ориентируются на акватории морей таким образом, чтобы они удовлетворяли ряду требований, в том числе могли

- 1) характеризовать изменчивость состояния морской среды в основных районах;
- 2) пересекать струи постоянных течений, основные циркуляционные системы и фронты в море;
- 3) проходить поперек проливов или вдоль границ между отдельными районами моря;
- 4) проходить по географическим границам морей с целью мониторинга и оценки водо-, соле- и теплообмена между морями;
- 5) отвечать требованиям репрезентативности для районов моря.

Океанографические разрезы могут выполняться как путем последовательно выполняемых океанографических станций, так и путем буксировки измерительных комплексов вдоль разрезов.

Рейдовые станции располагаются в прибрежной зоне моря, в заливах и бухтах, на устьевых взморьях и в морских устьях крупных рек. Это, как правило, якорные океанографические станции, размещаемые в точках с постоянными географическими координатами. Рейдовые наблюдения производятся в виде многочасовых, полусуточных, суточных, многосуточных океанографических станций.

В состав наблюдений на станциях океанографических разрезов и рейдовых станциях входят наблюдения за следующими параметрами морской среды:

— метеорологическими характеристиками приподнятого слоя атмосферы (атмосферное давление, скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, тип и количество облачности, атмосферные явления, осадки, видимость);

— температурой и соленостью воды на поверхности моря, морским волнением, течением, цветом и прозрачностью воды, концентрацией растворенного кислорода, величиной рН;

— при наличии льда в море — за распределением льдов, их количеством, толщиной и дрейфом льда, положением кромки припая и плавучих льдов;

— вертикальным распределением (на стандартных горизонтах наблюдений) океанографических параметров — температуры и солености воды, скорости и направления течения, концентрации растворенного в воде кислорода.

На станциях океанографических разрезов, включенных в Общегосударственную сеть наблюдений за загрязнением природной среды (ОГСН), дополнительно должны производиться наблюдения за следующими показателями: щелочностью, содержанием кремния, сероводорода, нитратов, фосфатов, азота и фосфора, специфических для данного района моря загрязняющих веществ (не менее трех).

Для наблюдений на океанографических и рейдовых станциях установлены следующие стандартные горизонты:

1) для глубоководных океанографических станций — 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600, 800 м и в придонном слое (в 5—10 м от дна);

2) для рейдовых станций до глубины места 6 м — 0, 3 м, дно; при больших глубинах — 0, 5, 10, 15, 20 м и далее через 10 м до придонного горизонта.

В отдельных случаях назначаются дополнительные (к указанным выше) горизонты наблюдений для точного определения границ расположения слоя скачка солености, температуры и плотности морской воды.

Океанографические разрезы и океанографические съемки выполняются раз в сезон, рейдовые станции выполняются раз в месяц (ближе к середине месяца) в виде многосерийных станций с дискретностью наблюдений 1—3 ч.

МОРСКАЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ БЕРЕГОВАЯ И УСТЬЕВАЯ СЕТЬ

На станциях этих сетей выполняются наблюдения за следующими параметрами и явлениями: уровнем поверхности моря, температурой и соленостью воды у берега, параметрами ветрового волнения, ледовыми явлениями (шириной и толщиной припая, высотой снега на льду, количеством неподвижного и сплошностью плавучего льда, формами и возрастными видами льда, направлением и скоростью дрейфа льда, датами ледовых фаз). Наблюдения проводятся четыре раза в сутки в сроки 0, 6, 12 и 18 ч по Всемирному скоординированному времени (ВСВ).

На гидростворах и постах в устьях рек проводятся наблюдения за уровнем поверхности воды, температурой, соленостью (плотностью), мутностью воды, ледовыми явлениями, расходами воды и наносов.

Сеть морских гидрометеорологических буйковых станций и подводных аппаратов

Эта сеть состоит из стационарных якорных и подвижных буюв и аппаратов, размещенных на акватории моря. Установка и эксплуатация буюв и подводных аппаратов производятся с учетом требований безопасности морского судоходства, поэтому требуется предоставление информации об их местонахождении. Буи и аппараты автоматически производят измерения метеорологических и океанографических (поверхностных и глубоководных) параметров, накопление данных, их кодировку и передачу

информации в центры сбора. С морских буюв в автоматическом режиме с определенной дискретностью поступает следующая информация: атмосферное давление у поверхности моря, температура и влажность воздуха в приводном слое, направление и скорость ветра, температура и электропроводность воды у поверхности моря и на глубинных горизонтах, направление и скорость течения (с якорного буюа) или параметры дрейфа (с дрейфующего буюа).

Сеть пунктов наблюдений за загрязнением морских вод

Данная сеть располагается на побережьях морей, морских заливов, бухт, гаваней, в прибрежной зоне и на акваториях морей и океанов. Эта часть морской наблюдательной сети входит в ОГСН.

Полученная в результате функционирования морской наблюдательной сети информация о состоянии природной среды морей России в виде гидрометеорологических, ледовых, океанографических и других данных используется в обслуживании информационных потребностей отраслей экономики, военно-морского флота, морского транспорта, рыбного промысла, разведки и эксплуатации морских месторождений нефти и газа, проектирования и строительства морских гидротехнических сооружений.

Морская наблюдательная сеть является также базой экспериментальных наблюдений, опытной эксплуатации новых технических средств измерений, апробации новых методик наблюдений, подготовки специалистов по морской гидрометеорологии и океанографии.

Дистанционный мониторинг

Для мониторинга морей России применяются также летательные и космические аппараты.

Летательные аппараты применяются для океанографических наблюдений и работ при необходимости быстрого получения данных

о распределении на больших акваториях температуры поверхности моря (с помощью радиометров) и морских льдов (с помощью радиолокаторов), для аэрофотосъемок волнения, исследования циркуляции и динамики вод, профилей водной поверхности в прибрежной зоне моря (с применением лазерного профилографа), для установления признаков загрязнения вод.

Космические аппараты находят широкое применение в практической океанографии для получения информации о распределении температуры поверхности моря, морских льдов, циркуляционных структур, взвесей, фитопланктона, нефтяного загрязнения и др. Спутниковая альтиметрия позволяет получать продольные профили уровня поверхности моря и осуществлять мониторинг изменений уровня моря. Использование метода спутниковой геодезии на основе глобальной системы позиционирования GPS позволяет при наблюдениях уровня моря учитывать вертикальные движения земной коры и обеспечивать привязку уровневых наблюдений к единой высотной основе.

В настоящее время, к сожалению, наблюдения в системе комплексного фонового мониторинга природной среды морей России значительно сократились или прекратились полностью в условиях резкого сокращения государственного финансирования. Авиационные и космические средства практически не используются из-за отсутствия современных специально оборудованных самолетов и отечественных природно-ресурсных спутников, предназначенных для изучения Земли.

ТЕМПЕРАТУРА И СОЛЕННОСТЬ

Температура, соленость, плотность, скорость и направление течений, уровень поверхности моря являются основными физическими параметрами Мирового океана. До середины прошлого столетия они измерялись традиционными контактными методами. С развитием приборостроения появились дистанционные

методы зондирования поверхности океана как с борта самолета, так и с искусственных спутников Земли (ИСЗ). Таким образом, данные о состоянии океана условно можно подразделить на два типа: контактные и дистанционные.

Наземные и морские измерения

Основными источниками океанографической информации, получаемой контактными методами, являются попутные судовые измерения, океанографические станции, разные зонды и батитермографы, специализированные платформы, уровневые посты, разные буи и др. Каждый из них дает свой спектр информации о состоянии океана. Кратко остановимся на каждом из них. Более подробно они описаны в работе (Boyer et al., 2006).

Попутные судовые измерения

Попутные судовые измерения начались с наблюдений за погодой и состоянием поверхности океана, которые проводились с начала активного мореплавания. Первые попутные судовые измерения температуры поверхности океана (ТПО), которые можно найти в базе данных “Мировой океан 2005” (WOD05)* Национального центра океанографических данных США**, относятся к 1867 г. Эти измерения проводили норвежские суда “Isbjornen” и “Ishavet” во время работ в Северном и Норвежском морях и в Северной Атлантике около о. Исландия (Boyer et al., 2006).

Помимо традиционных наблюдений за основными метеорологическими величинами (температурой воздуха, скоростью и направлением ветра и т. д.) при попутных судовых измерениях собирается информация о характеристиках океанической поверхности. Сначала это были только измерения ТПО и высоты морских волн, позднее некоторые рыболовецкие суда стали проводить измерения содержа-

* World Ocean Database 2005 — WOD05.

** National Oceanographic Data Center — NODC.

ния CO₂ и хлорофилла в поверхностном слое океана. Число подобных измерений к настоящему времени значительно увеличилось. Так, например, база данных ICOADS* на настоящий момент содержит более 169 миллионов измерений ТПО с торговых судов (Worley et al., 2005).

К этому типу информации о Мировом океане помимо данных попутных судовых измерений следует отнести и данные научных экспедиций по измерению солености поверхностных вод, проводимых в тропической зоне Тихого океана (Henin, Grelet, 1996) в рамках международной программы исследования изменчивости климата CLIVAR** (CLIVAR, 1998).

При попутных корабельных измерениях точность измерения ТПО (ртутными термометрами) составляет не более 0,001°C (Worley et al., 2005), а солености — 0,02‰ (Delcroix, Picaut, 1998; Delcroix et al., 2005)***.

В базе данных WOD05, которая на настоящий момент является наиболее полной по сравнению с другими, число данных попутных измерений за период 1867—2000 гг. превышает 2 миллиона.

Океанографические станции

История проведения измерений океанографических параметров океанографическими или гидрографическими станциями начинается с экспедиции английского военного корабля “Challenger” в 1872—1876 гг. (Китайгородский, 1995). Это была первая комплексная экспедиция по изучению Мирового океана, организованная по инициативе Британского адмиралтейства и Королевского общества.

Было пройдено около 69 тыс. морских миль (более трех окружностей экватора), пересечены с севера на юг и с запада на восток Атлантический и Тихий океаны, проведены наблюдения на 362 океанографических станциях. Впервые были взяты пробы морской воды с разных глубин (горизонтов) и измерены ее физические свойства, химический и биологический состав. Таким образом, данные океанографических станций (Ocean Station Data — OSD) содержат комплексную информацию не только о приповерхностных водах океана, но о всей его толще. Их еще называют профилями океанографических параметров.

По продолжительности работ океанографические станции подразделяются на разовые, многочасовые, полусуточные, суточные и многосуточные. Наблюдения ведутся с судна, лежащего в дрейфе (дрейфовые океанографические станции) или стоящего на якоре (якорные океанографические станции), а также с дрейфующего или неподвижного льда. Глубоководные измерения на океанографических станциях выполняются на горизонтах, принятых за стандартные (0, 5, 10, 20, 50, 75 м и т. д.).

Обычно на океанографической станции для измерений используются несколько (как правило, около 20) батометров Нансена, погружаемых за борт корабля. Они закрепляются на тросе с интервалом от нескольких десятков до сотен метров. Распределение батометров по глубине делается с таким расчетом, чтобы большинство из них находилось в верхних слоях океана, где вертикальные градиенты температуры и солености — наибольшие. Защищенные опрокидывающиеся термометры (для измерения температуры) прикрепляются к каждому батометру вместе с незащищенным опрокидывающимся термометром (для измерения глубины). Батометр состоит из цилиндра с затворами на каждой стороне для отбора морской воды на глубине. Соленость определяется в лаборатории при последующем анализе этих проб.

Точность определения температуры опрокидывающимися ртутными термометрами,

* International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set — ICOADS.

** Climate Variability and Predictability World Climate Research Program — CLIVAR.

*** В дальнейшем, рассматривая разные методы получения океанографических данных, будем указывать точность измерения только температуры и солености. Для других параметров точность их измерения можно найти в специализированной литературе.

которыми оснащены почти все океанологические станции, составляет $0,001^{\circ}\text{C}$, а точность измерения солёности, определяемой методом химического титрования пробы воды с солями серебра, составляет $0,02\%$ (Stewart, 2006). На океанографических станциях помимо измерений температуры и солёности могут производиться также взятие проб грунта, сбор планктона и донных организмов.

В начале 1960-х годов механические инструменты на нансеновских батометрах были заменены электронными инструментами, измеряющими электропроводность, температуру и глубину.

Начиная с 1970-х годов в рамках разных международных и национальных проектов (GEOSECS*, SAVE**, WOCE***, программа “Разрезы” и др.) проводятся периодически повторяющиеся измерения вертикальных профилей разных океанографических параметров на стандартных горизонтах вдоль разрезов по акватории всего Мирового океана. Это позволяет получить информацию, необходимую в первую очередь для исследования и моделирования как состояния Мирового океана, так и изменчивости его климата. В базе данных WOD05 за период 1872—2004 гг. общее число данных таких измерений превысило 2,2 млн., из них более 122 тыс. измерений проведены с помощью зондов CTD****.

Измерения батитермографами и зондами

Принцип измерения этих датчиков основан на фундаментальной зависимости электропроводности морской воды от температуры и солёности (Wallace, 1974; Prien, 2001). Измерения записываются в электронной форме или внутри инструмента во время погружения или на компьютер, находящийся на корабле. Температура

обычно измеряется термистором, электропроводность — с помощью электромагнитной индукции, давление — кварцевым кристаллом.

Батитермограф — механическое устройство, которое показывает профиль температуры в зависимости от глубины на задымленном куске стекла (Mechanical BathyThermograph — MBT) (Stewart, 2006). Это устройство широко использовалось для картирования термической структуры вод верхней части океана включая слой перемешивания до того, как было заменено в 1970-х годах сначала цифровыми (Digital BathyThermograph — DBT), а потом невозвратными батитермографами (Expendable BathyThermograph — XBT) (Worley et al., 2005).

Невозвратный батитермограф (Expendable BathyThermograph — XBT) — электрический прибор, который измеряет изменение температуры с глубиной, используя термистор на свободно падающем обтекаемом грузе. Термистор соединен с омметром на корабле тонкой медной проволокой, которая разматывается с тонущего груза. Сейчас невозвратный батитермограф — наиболее распространенный инструмент для измерений вертикальной термической структуры океана. Зонд достигает глубины от 200 до 1830 м в зависимости от модели прибора (Stewart, 2006).

В начале 1960-х годов, помимо замены механических инструментов на нансеновских батометрах электронными инструментами, измеряющими электропроводность, температуру и глубину, была проведена разработка специализированных CTD-зондов. Они получили свое название от Conductivity-Temperature-Depth, хотя первые модели назывались STD (Salinity-Temperature-Depth). Результаты измерений записываются в электронной форме или внутри инструмента во время погружения или на компьютер на борту корабля. Температура обычно измеряется термистором, электропроводность — с помощью электромагнитной индукции, давление — кварцевым кристаллом.

Среди производителей CTD-зондов имеется несколько крупных компаний-лидеров,

* Geochemical Ocean Sections Study (GEOSECS).

** South Atlantic Ventilation Experiment (SAVE).

*** World Ocean Circulation Experiment (WOCE).

**** Conductivity-Temperature-Depth (CTD).

Таблица 11.1. Точность измерения основными типами батитермографов и зондов

Тип датчика	Точность измерений			Комментарий	
	Глубина (давление), %	Температура, °С	Соленость, ‰	Предельная глубина измерений, м	Источник
Механический батитермограф	0,1	0,02	Не измеряется	500	(Worley et al., 2005; Stewart, 2006)
Цифровой батитермограф	0,1	0,05		1000	(Pankajakshan et al., 2003; Stewart, 2006)
Невозвратный батитермограф	2	0,1—0,15		1800	(Worley et al., 2005)
Зонд измерений солености, температуры и глубины	0,015—0,08	0,001—0,005	0,02	6000	(Lawson, Larson, 2001)
Зонд измерений электропроводности, температуры и глубины					
Невозвратный зонд измерений электропроводности, температуры и глубины	2	0,02	0,05	1000	(Johnson, 1995; Mizuno, Watanabe, 1998)

разработавших и выпускающих СТД-зонды, которые отличаются наиболее хорошими метрологическими характеристиками. Кабельные зонды используют кабель-трос для своего электропитания и передачи данных в цифровом виде в бортовое устройство или сразу в компьютер. Главным достоинством кабельных зондов является возможность наблюдения за изменением измеряемых величин в реальном масштабе времени. Это качество особенно важно для оперативной оценки изменяющихся характеристик водных масс.

В настоящее время аналогично батитермографам разработаны и невозвратные СТД-зонды (Expendable Conductivity-Temperature-Depth — XCTD), проводящие измерения температуры, электропроводности и давления с глубиной на свободно падающем обтекаемом грузе.

Точность измерения температуры и солености разными батитермографами и зондами представлена в табл. 11.1.

Буйковые измерения

Дальнейшим развитием системы измерений основных океанографических параметров (температуры и солености) стало создание сети автономных или буйковых океанографических станций. Буйковые измерения можно подразделить на три основных группы: заякоренные, дрейфующие и профилирующие.

Заякоренный буй — закрепленный на якоря буй, на тросе которого закреплены датчики измерения температуры, солености (электропроводности) и давления, а в некоторых случаях — и датчики скорости течения. На самом буйе расположена небольшая автономная метеорологическая станция, иногда и измеритель высот ветровых волн. Получаемая информация передается по кабелю или через спутник в центр обработки данных.

Первыми дрейфующими буями (Drifting Buoy — DRB) по сути своей стала “бутылочная” почта, которая еще в начале 1800-х годов позволила сделать первые шаги в изучении по-

верхностной циркуляции Мирового океана. В дальнейшем для изучения течений на глубине стали использовать поплавки нейтральной плавучести (Sound Fixing And Ranging — SOFAR, RAFOS), пространственное и временное расположение которых определялось с помощью акустических локаторов.

Современный дрейфующий буй (или дрейфтер) помимо передачи на борт спутника с системой “ARGOS” сигнала, позволяющего определить его местоположение, оснащен датчиками измерения основных метеорологических величин (атмосферного давления, температуры воздуха, скорости ветра и т. д.) и океанографических параметров (CTD-датчики) — температуры и солёности.

Международная программа WOCE требовала глобального покрытия Мирового океана дрейфующими буями не только на поверхности, но и на глубине. Для этого были созданы поплавки нейтральной плавучести нового типа (Autonomous Lagrangian Circulation Explorer — ALACE). Они дрейфовали на заданном горизонте (от 200 до 1000 м), всплывали на поверхность через заданный интервал времени, передавали на спутники с системой “ARGOS” сигнал, позволяющий зафиксировать их положение, и вновь опускались на горизонт дрейфа.

Первые эксперименты с дрейфующими SVPB-дрейфтерами (Surface Velocity Program — Barometer) в Черном море были проведены в конце 1990-х годов совместными усилиями Морского гидрофизического института (Севастополь, Украина) и Института океанологии

им. П. П. Ширшова РАН (Москва). Первые дрейфтерные эксперименты в Каспийском море были проведены в 2006—2008 гг. совместными усилиями Морского гидрофизического института (Севастополь, Украина), Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН (Москва) и ряда организаций Азербайджана.

Следующим этапом развития буйковых измерений основных океанографических параметров стало создание профилирующих буев (Profiling Float — PFL).

Спущенный на воду буй опускается на заданный горизонт и дрейфует в течение 10 сут. После этого он поднимается на поверхность с постоянной скоростью 1 м/с, проводя измерения давления, температуры и электропроводности (на основании которой в дальнейшем рассчитывается солёность морской воды). Процесс подъема с глубины 2000 м и измерения обычно занимают около 6 ч. Поднявшийся буй дрейфует на поверхности в течение некоторого времени, достаточного для передачи данных на проходящие спутники (обычно 6—12 ч). Цикл повторяется до тех пор, пока не истощатся батареи или буй не будет выловлен случайно рыбаками. Поймать буй специально довольно сложно — требуется сочетание многих условий (спутниковый телефон, пеленгационный контур и хорошая погода).

Точность измерения температуры и солёности разными буями представлена в табл. 11.2.

Успешное использование в северной части Атлантического океана сети из нескольких десятков профилирующих буев в 1997—1998 гг.

Таблица 11.2. Точность измерения для основных типов буев

Тип датчика	Точность измерений			Комментарий	
	Глубина (давление)	Температура, °С	Солёность, ‰	Предельная глубина измерений, м	Источник
Заякоренный буй	2%	0,002—0,03	0,003	0—700	(Ando et al., 2005)
Дрейфующий буй	2%	0,001—0,01	0,002	0—1000	(Boyer et al., 2006)
Профилирующий буй	2,4 дбар	0,005	0,002	1800	(Davis et al., 1992, 2001)

в рамках программы WOCE позволило приступить к созданию международной системы ARGO, представляющей собой прообраз глобальной сети автономных океанографических станций. Предложенный впервые в 1999 г. проект был одобрен Межправительственной океанографической комиссией и Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Он начал воплощаться в жизнь в 2000 г.

Первичная цель проекта ARGO — создание и поддержание глобальной сети из 3000 буев (что соответствует более 100 тыс. измерений STD-зондами) — была достигнута в ноябре 2007 г. Одновременно были созданы национальные центры ARGO и обеспечен свободный доступ к данным через Интернет в течение 24 ч (требуемых на первичный контроль качества) с момента их поступления.

Информация с всплывающих буев постепенно становится более востребованной, чем данные корабельных измерений STD-зондами.

Дистанционные измерения

Дистанционные методы измерений сегодня дают информацию в том числе о следующих параметрах состояния Мирового океана: о температуре поверхности океана, высоте и шероховатости морской поверхности, цвете моря, содержании хлорофилла и взвеси, морском льде, высоте морских ветровых волн (Нелепо и др., 1983; Stewart, 1985; Observing..., 2001; Rees, 2001; Satellite Altimetry..., 2001; Remote Sensing..., 2003; Лаврова и др., 2011).

Методы дистанционного зондирования Мирового океана подразделяют на три типа: пассивные, полуактивные и активные.

Пассивные методы основаны на регистрации теплового излучения, видимого излучения и естественного гамма-излучения с поверхности моря.

Полуактивные методы основаны на облучении морской поверхности естественными и искусственными источниками электромагнитного излучения в широком спектральном диа-

пазоне и анализе спектрального состава принятого сигнала с поверхности акватории.

При использовании активных методов исследуемая водная поверхность облучается источниками излучения заданного спектрального состава с регистрацией или отраженного излучения, или флуоресценции, или комбинационного рассеяния.

Температура поверхности океана (ТПО) — одна из первых океанографических величин, которая начала измеряться с борта искусственных спутников Земли. Она рассчитывается по данным о радиояркостной температуре, измеряемой инфракрасными (ИК) и сверхвысокочастотными (СВЧ) радиометрами (включая и радиометры, сканирующие вдоль подспутникового следа), а также по данным сканеров видимого диапазона, которые имеют дополнительный канал в ИК-диапазоне.

Мониторинг ТПО осуществляется с помощью радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer — усовершенствованный радиометр очень высокого разрешения), установленных на нескольких спутниках серии “NOAA-KLM”. Спутники серии “NOAA” (National Oceanic and Atmospheric Administration, США) являются квазиполярными спутниками. Они оснащены разными инструментами, в частности, радиометром AVHRR с пятью спектральными каналами с пространственным разрешением 1 км и разрешением по температуре 0,1°С. Радиометр используется для широкого диапазона задач по мониторингу состояния окружающей среды, в том числе для анализа и прогноза погоды, изучения поля температуры поверхности океанов и морей, температуры и влажности атмосферы, мониторинга движения вод океана, извержений вулканов, лесных пожаров, солепылевых бурь, интенсивности вегетации и др. С любой точки земной поверхности спутник считывает информацию дважды в сутки.

Мониторинг ТПО осуществляется также с помощью спектрорадиометров MODIS, установленных на спутниках “Terra” и “Aqua”.

18 декабря 1999 г. NASA (Национальное аэрокосмическое агентство США) осуществило запуск спутника “Terra”, а 4 мая 2002 г. спутника “Aqua” со сканерами MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) на борту. “Terra” — флагман спутниковой системы по мониторингу Земли (EOS), предназначенный для получения комплексных данных об атмосфере (свойства аэрозолей и облаков, профили температуры и водяного пара), суше (изменения в природных ландшафтах, вегетации, снежном покрове и температуре суши) и океане (температура поверхности, содержание взвеси и хлорофилла). Многофункциональные 36-канальные сканеры MODIS позволяют получать информацию об оптических свойствах подстилающей поверхности с пространственным разрешением 250, 500 и 1000 м в надире, а также тепловые изображения в ИК-диапазоне с пространственным разрешением 1000 м. Полоса обзора шириной 2330 км позволяет ему видеть любую точку на Земле не реже раза в сутки.

Для мониторинга температуры поверхности моря (ТПМ) также используется спутник “MetOp-2” Европейского космического агентства, “GMS” S-VISSR (Geostationary Meteorological Satellite, Stretched-Visible Infrared Spin Scan Radiometer), “TRMM” MI (Tropical Rainfall Measuring Mission, Microwave Imager: TMI) и целый ряд других спутниковых систем, принадлежащих космическим агентствам разных стран.

Основным препятствием для мониторинга ТПМ в ИК-диапазоне является облачность. Поэтому для районов, практически постоянно закрытых облаками, используются СВЧ-радиометры, которые обладают существенно худшим разрешением по пространству — 25 км — и по температуре — 0,8°C. Точность измерения температуры поверхности океана для разных типов радиометров представлена в табл. 11.3.

В конце 2009 г. на орбиту был запущен спутник “SMOS” Европейского космического агентства, предназначенный, в частности, для измерения солёности на поверхности океана. “SMOS” (Soil Moisture and Ocean Salinity — влажность почв и солёность океана) является очередным космическим аппаратом из серии спутников “Earth Explorer”, задача которых — изучение важнейших параметров Земли в рамках проводимой Европейским космическим агентством (ЕКА) программы “Живая планета” (Living Planet). “SMOS” — первый спутник, предназначенный для глобальных измерений влажности почв на суше и солёности Мирового океана. Космический аппарат (КА) SMOS был разработан и изготовлен консорциумом научно-исследовательских учреждений и производственных предприятий Европы.

Программа SMOS предполагает использовать на одноименном спутнике интерферометр-радиометр MIRAS (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis), позволяю-

Таблица 11.3. Точность измерения температуры поверхности океана с борта ИСЗ разными радиометрами

Тип	Датчик		Точность, °С
	Название (полное и сокращенное)		
ИК-радиометр	Advanced Very High Resolution Radiometer	AVHRR	0,3—0,5
Спектрорадиометр	Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer	MODIS	0,3
ИК-радиометр	Along-Track Scanning Radiometer	ATSR	0,3
СВЧ-радиометр	Special Sensor Microwave Imager	SSMI	0,7—0,8

щий проводить в глобальном масштабе измерения влажности почв и растительности суши с пространственным разрешением 60 км и солености морских вод с разрешением 200 км. Радиометр будет давать изображения, соответствующие интенсивности собственного излучения поверхности в L-диапазоне (21—23 см). Вычисление значений солености осуществляется на основе измеренных значений яркостной температуры в L-диапазоне при разных углах наклона и поляризации приемной антенны. Параллельно с разработкой аппаратуры спутника, выполняющей первичную оценку солености “в точке”, активно разрабатываются методы пространственно-временного осреднения результатов таких измерений, позволяющие уменьшать влияние ошибок измерений и статистического шума. Предполагается, что первичная оценка солености будет получена для участков размером 40 × 40 км с точностью 1‰. Пространственно-временное осреднение данных позволит получать глобальные карты солености Мирового океана за 10—30 сут для участков площадью 200 × 200 км с точностью 0,1‰.

После ряда подготовительных процедур 21 мая 2010 г. спутник “SMOS” приступил к оперативной работе. Данные со спутника “SMOS” впервые позволят построить высокоточную, регулярно обновляемую глобальную карту солености Мирового океана, что расширит знания о закономерностях океанических течений и их воздействии на климатическую систему.

ОСНОВНЫЕ БАЗЫ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИХ ДАнных

Базы океанографических данных, полученных контактными методами измерений, как правило, формируются Национальными центрами океанографических данных (НЦОД), куда они поступают из океанологических институтов, транспортных компаний и других источников. Между НЦОД существует систе-

ма обмена данными, что позволяет пополнять собственные базы и разрабатывать разные электронные атласы как Мирового океана в целом, так и отдельных его акваторий и морей. Обработанные данные спутниковых измерений обычно хранятся либо в специализированных архивах, либо в тех институтах и центрах, где они обрабатывались. Кратко остановимся на основных базах данных океанографической информации.

ВНИИГМИ-МЦД и ЦОД

Система Мировых центров данных (МЦД) была создана в 1957 г. Она действует под эгидой Международного совета научных союзов (МСНС). На базе Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) Росгидромета обеспечивается функционирование трех МЦД: 1) по метеорологии, 2) по океанографии, 3) по ракетам, спутникам и данным о вращении Земли.

В МЦД накапливается информация от всех международных исследовательских программ, ведущихся под эгидой МСНС, направленных на изучение Земли. МЦД, действующие на базе ВНИИГМИ-МЦД, входят в состав регионального кластера, созданного на основе группы российских Мировых центров данных и украинского Мирового центра данных по геоинформатике и устойчивому развитию. Они участвуют в процессе перехода от Системы Мировых центров данных (WDC System) к Мировой системе данных (World Data System).

В фондах МЦД накоплены международные данные о состоянии природной среды за длительный период времени в объеме более 4000 бобин магнитных лент и компактных дисков (CD-ROM), 65 тыс. документов на бумажной основе, в том числе данные практически всех завершившихся международных исследовательских программ, таких как Программа исследования глобальных атмосферных про-

цессов, Программа “Тропический океан — глобальная атмосфера” и др. Кроме того, МЦД получают по глобальной системе телесвязи ВМО оперативную глобальную информацию о состоянии природной среды (более 100 тыс. сообщений в месяц).

Мировой центр данных по океанографии обеспечивает хранение и обслуживание пользователей данными о физических, химических и динамических параметрах Мирового океана, а также публикациями и изданиями по океанографической тематике, которые получены в результате международного обмена из других стран либо представлены для международного обмена организациями Российской Федерации.

В ноябре 1964 г. приказом начальника Главного управления гидрометеорологической службы академика Е. К. Федорова в г. Обнинск был создан Центр океанографических данных (ЦОД). В 1971 г. ЦОД вошел в состав ВНИИГМИ-МЦД. Создание ЦОД явилось крупным решением, заложившим научно-организационную и правовую основу формирования государственного фонда данных (ГОСФОНДА) по океанографии и обеспечения этими данными учреждений всех министерств и ведомств, осуществляющих изучение океанов и морей и использование их ресурсов.

В ЦОД ВНИИГМИ-МЦД используется больше десятка баз справочных сведений об океанографических данных:

— база справочных сведений о рейсах НИС по материалам исторических наблюдений за многолетний период (более 32 тыс. экспедиций);

— массив пространственно-временных координат океанографических станций, который позволяет получить распределение океанографических станций по квадратам или в виде точек;

— массив сведений о наблюдениях за течениями (данные с 7500 автономных буйковых станций — АБС);

— база справочных сведений о морских береговых и устьевых станциях и постах (420 станций);

— сведения о наблюдательных платформах (800 шт.);

— описания форматов хранения данных (15 шт.);

— сведения о мореведческих организациях (60 шт.);

— сведения о базах океанографических данных на технических носителях в разных организациях (50 шт.);

— базы словарей (судов, стран, учреждений, географических областей, приборов и др.) в объеме более 10 тыс. параметров.

ЕСИМО

ЕСИМО — межведомственная распределенная система информации об обстановке в Мировом океане, функционирующая на основе существующих информационных систем разных ведомств и поддерживающая на постоянной основе базы метаданных и информации регламентированного содержания, технологии доступа, обмена, интеграции информационных ресурсов ведомств для полноценного информационного обеспечения деятельности по изучению Мирового океана, мониторингу его состояния и использования его ресурсов.

Цель — создание единой системы информации об обстановке в Мировом океане, направленной на информационное обеспечение разнообразной морской деятельности.

Основные задачи ЕСИМО следующие.

1. Создание единой нормативно-методической, организационной, метрологической и технологической основы ведения информационных ресурсов по состоянию Мирового океана в Российской Федерации.

2. Формирование и ведение государственных информационных фондов данных о состоянии Мирового океана и прибрежных территорий.

3. Развитие и стандартизация технологий мониторинга состояния и загрязнения Мирового океана и прибрежных территорий в оперативном и задержанном режимах.

4. Интеграция ведомственных информационных систем и обеспечение доступа ко всей совокупности государственных информационных ресурсов по Мировому океану.

5. Организация обмена с аналогичными системами в рамках международного сотрудничества, а также участие в международных программах.

Перечень основных мероприятий следующих.

1. Построение базовых элементов Единой системы (далее системы) информации об обстановке в Мировом океане, их сопровождение и развитие на постоянной основе.

2. Развитие и внедрение методов, средств и технологий наблюдения за состоянием и загрязнением природной среды Мирового океана и прибрежных территорий.

3. Обеспечение пользователей оперативной информацией об обстановке в Мировом океане в реальном масштабе времени.

4. Обеспечение потребителей обобщенной и специализированной информацией об обстановке в Мировом океане и на прибрежных территориях.

5. Интеграция, ведение и распространение информационных ресурсов об обстановке в Мировом океане и обеспечение телекоммуникационного взаимодействия элементов системы и пользователей.

6. Развитие специальных и региональных составляющих системы.

Ожидается, что реализация позволит сформировать единое информационное пространство страны по проблемам морской среды, повысить эффективность информационного обеспечения и сопровождения принятия решений по хозяйственной, военной и научной деятельности в Мировом океане, морях России и на прибрежных территориях.

Электронные атласы и базы данных

Среди зарубежных баз данных, содержащих информацию о Мировом океане, следует отметить в первую очередь те, которые по сути своей являются электронными атласами океанографической информации (среднегодовые, среднемесячные и среднесезонные поля основных океанографических параметров на регулярных сетках). К таким базам и архивам данных следует отнести следующие:

— атласы Мирового океана (World Ocean Atlas) Национального центра океанографических данных США (National Oceanographic Data Center — NODC)* для соответствующих годов (Levitus, 1982 (полное название приведено в списке литературы), Levitus, 1994, 1998, 2001, 2005, 2009 (полные названия выложены на сайте)**), которые содержат среднегодовые, среднемесячные и среднесезонные поля температуры, солёности, потенциальной температуры, содержания кислорода и т. д.;

— данные, предназначенные для модельных расчетов, проводимых в рамках программы WOCE***,****;

— атласы океанов (Южного, Тихого, Атлантического и Индийского), полученные по данным измерений и расчетов, проводимых в рамках программы WOCE;

— среднегодовые и среднемесячные за каждый год поля океанографических параметров, полученных по данным дистанционного зондирования с борта ИСЗ, хранящиеся в Центре данных по физической океанографии (Physical Oceanography Distributed Active Archive Center — PODAAC)****;

— средние многолетние поля динамической топографии, полученной как в результате

* Атласы известны по имени своего создателя Сиднея Левитуса (Sydney Levitus).

** <http://www.nodc.noaa.gov/OC5/indprod.html>.

*** <http://whpo.ucsd.edu/>.

**** Данные хранятся также на ftp-сервере PODAAC.

***** <http://podaac-www.jpl.nasa.gov>.

модельных расчетов, так и обработки данных спутниковой альтиметрии*.

Отдельно следует выделить базовые модели, которые необходимы как при дополнительной обработке спутниковой информации (например, спутниковой альтиметрии), так и при ее интерпретации. Это глобальные и региональные модели приливов** и модели геоида.

База данных in situ океанографической информации WOD05 и WOD09

Наиболее известной и часто используемой базой данных океанографической информации является база данных World Ocean Database, на основе которой созданы атласы Национального центра океанографических данных США. Эти данные постоянно пополняются и обновляются.

База данных эксперимента GODAE

Из существующих на данный момент баз данных***, предназначенных для решения задачи ассимиляции данных о состоянии Мирового океана в модели геофизической гидродинамики и находящейся в открытом доступе, следует отметить базу данных Эксперимента по усвоению данных Мирового океана (Global Ocean Data Assimilation Experiment — GODAE)****. В ней аккумулируется информация из трех основных центров: ARGO****, FNMOC (Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center)***** и NAVO (Naval Oceanographic Office)*****.

База спутниковой информации PODAAC

Другой базой океанографических данных, которая может использоваться в климатичес-

* Поля средней динамической топографии не хранятся в едином центре данных. Их необходимо искать самостоятельно.

** Часть информации есть на ftp-сервере PODAAC.

*** Речь идет только о базах данных, а не о системах усвоения информации, в которых базы данных являются составной частью.

**** <http://www.usgodaе.org>.

***** <http://www.argo.ucsd.edu/index.html>.

***** <https://www.fnmoc.navy.mil/PUBLIC/index.html>.

***** <https://www.navo.navy.mil>.

ких исследованиях, является архив информации Центра данных физической океанографии (PODAAC)*****. Данный сервер содержит в основном спутниковую информацию: температуру поверхности океана, полученную с разных спутников и разными типами датчиков (ИК- и СВЧ-радиометры; сканер, работающий в видимом диапазоне; радиометр, сканирующий вдоль подспутникового следа*****); скорость и направление приводного ветра по данным СВЧ-радиометров, радаров с синтезированной апертурой и скаттерометров; информацию исходных баз данных спутниковой альтиметрии TOPEX/“Poseidon” и “Jason-1, -2”, которые содержат данные о высоте морской поверхности, ее аномалиях, высоте морских волн и модуле скорости приводного ветра.

Вся эта информация доступна с ftp-сервера.

НЕКОТОРЫЕ ПРИМЕРЫ НАБЛЮДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ В МОРЯХ РОССИИ

Исследование сезонной и межгодовой изменчивости температуры поверхности (ТПМ) взаимосвязанных Черного и Азовского морей выполнено на основе спутниковых массивов проекта Pathfinder NODC (США) (еженедельные значения с пространственным разрешением 4 км) в период 1982—2009 гг. В Черном море анализ выполнен как для моря в целом, так и для трех его регионов: прибосфорского, северо-восточного и прикерченского; в Азовском — для двух открытых регионов моря: центрального (с глубиной более 10 м) и западной части Таганрогского залива (с глубиной более 5 м) в навигационный период (апрель — ноябрь) (Гинзбург и др., 2011).

***** <http://podaac-www.jpl.nasa.gov>.

***** Радиометры такого типа устанавливаются в основном на спутниках, имеющих на борту радар с синтезированной апертурой и (или) альтиметр.

Установлено дальнейшее потепление Черного моря. Среднегодовая температура воды моря в целом, не превышавшая в 1982—1993 гг. 15°C , в 2007—2009 гг. увеличилась до $\sim 16^{\circ}\text{C}$. Положительный тренд в Черном море в целом за весь рассматриваемый период оказался равным $\sim 0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а в его прибосфорском, северо-восточном и прикерченском регионах — соответственно $\sim 0,05$, $0,06$ и $0,08^{\circ}\text{C}/\text{год}$. В период календарного года с апреля по ноябрь, для которого имеются спутниковые данные по Азовскому морю практически без пропусков, тренд ТПМ составил в Черном море $\sim 0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$. В Азовском море он был существенно меньшим: $\sim 0,03^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в его цент-

ральной части и $\sim 0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$ в Таганрогском заливе (Гинзбург и др., 2011).

На рис. 11.1—11.6 представлены примеры мгновенных полей ТПМ для Черного и Каспийского морей, а также межгодовая изменчивость ТПМ и выявленные линейные тренды за период 1982—2000 гг. (Оценочный доклад..., 2008а, 2008б).

Для общей оценки характера изменения параметров во времени используются тренды. Наиболее удобными являются линейные тренды, так как они позволяют определять среднюю за выбранный период скорость изменения рассматриваемого параметра. На рис. 11.7—11.9 показаны примеры графиков наблюдаемых гидрологических характеристик и их линейные

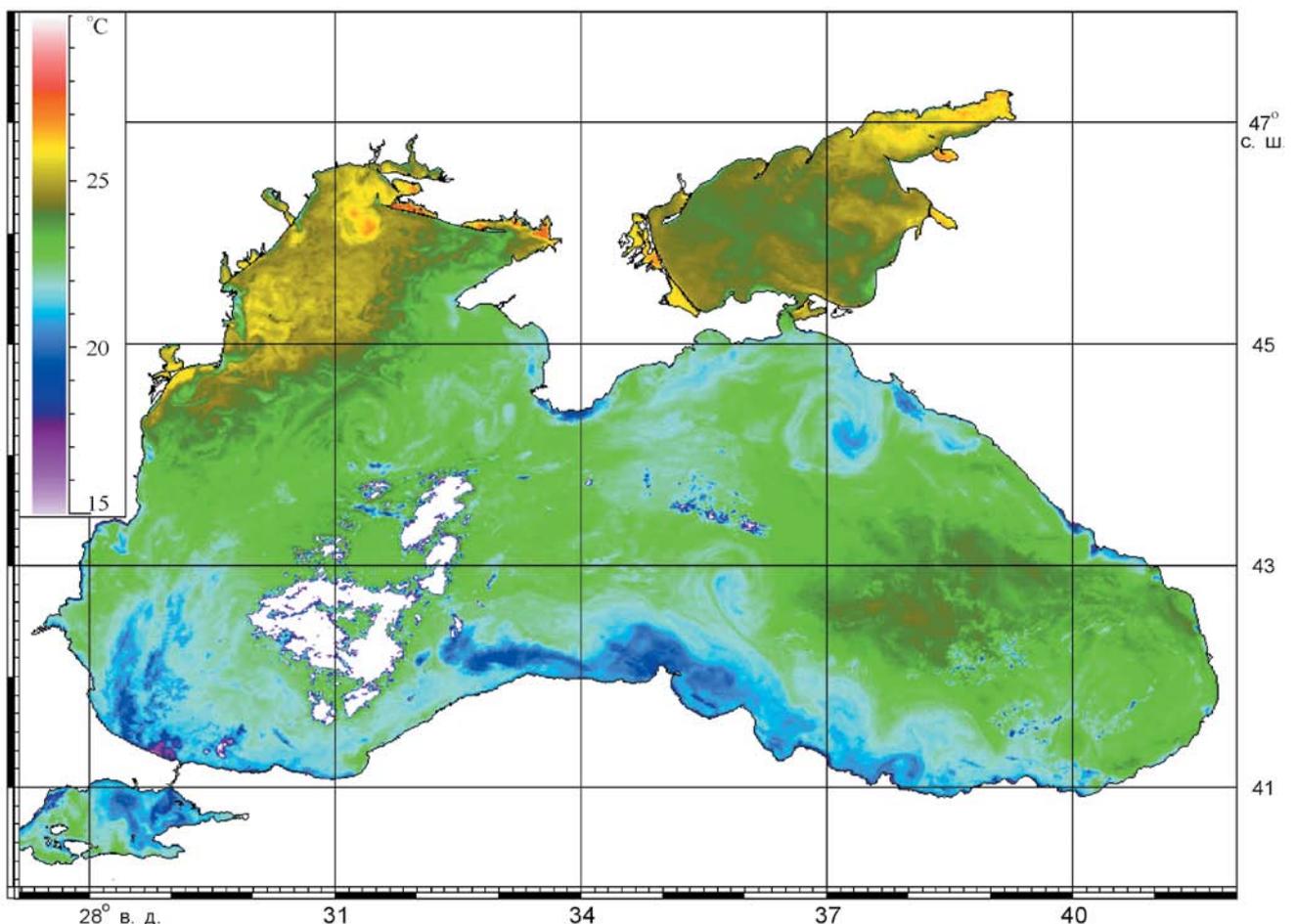


Рис. 11.1. Температура поверхности Черного и Азовского морей 12 июня 2010 г. по данным спутника “NOAA-18” (23 ч 55 мин ВСВ).

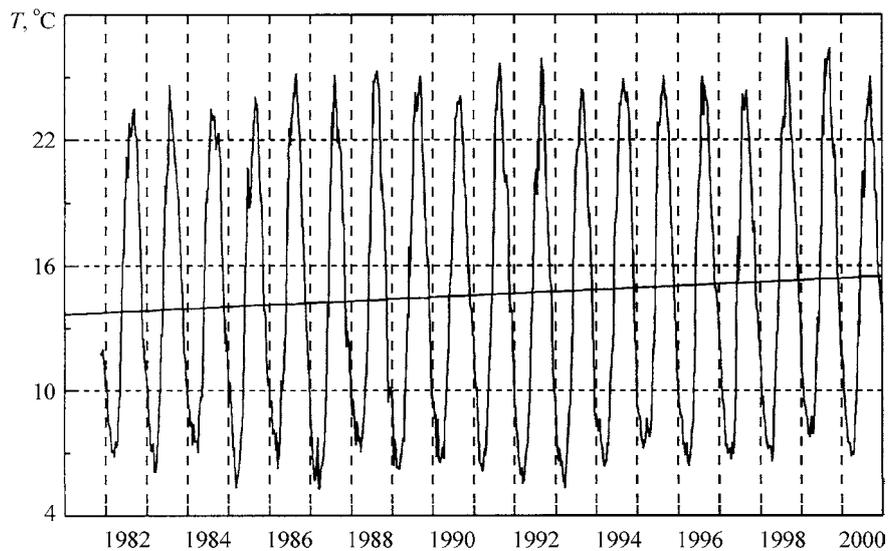


Рис. 11.2. Межгодовая и сезонная изменчивость температуры поверхности Черного моря в 1982—2000 гг. по спутниковым данным. Линейный тренд равен $0,06^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

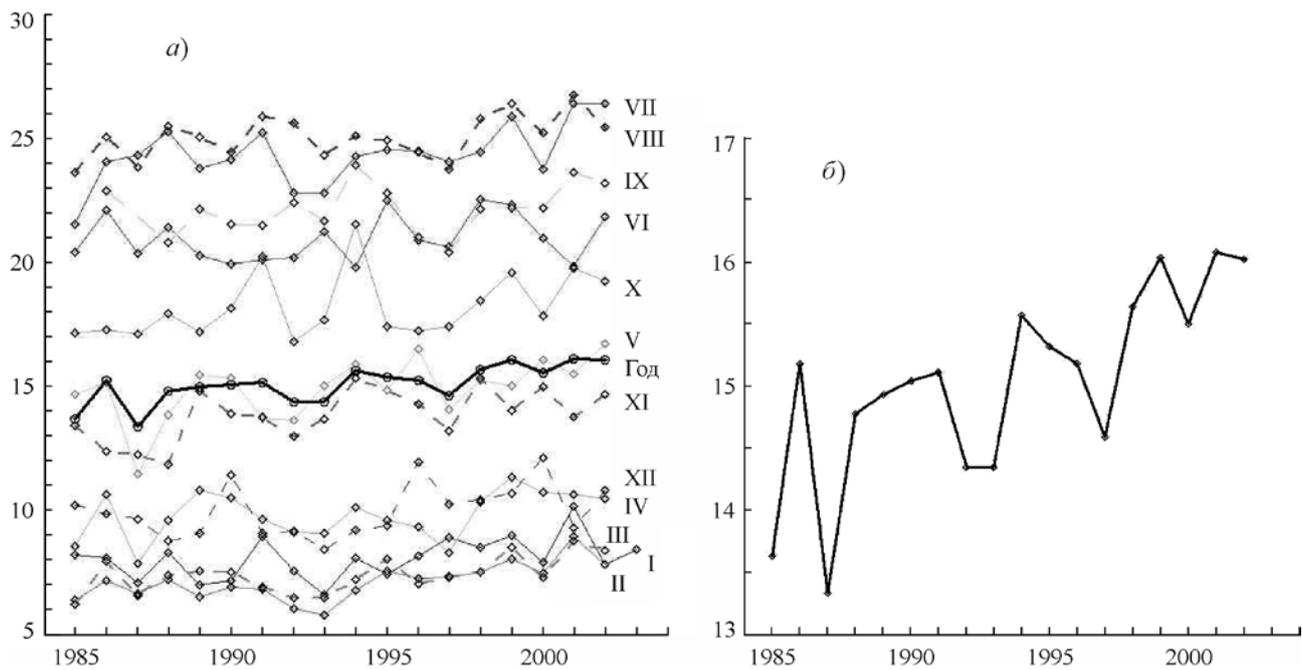


Рис. 11.3. Среднемесячные (а) и среднегодовые (б) значения температуры поверхности Черного моря в 1985—2003 гг.

тренды на станциях российского побережья Черного и Азовского морей в 1991—2008 гг. (после перерыва в наблюдениях в 1986—1990 гг.).

На рис. 11.7 видно, что среднегодовая температура воды в прибрежной части в обоих морях за последние 18 лет в целом увеличива-

лась. Оценки линейных трендов показывают среднюю скорость повышения температуры прибрежных вод Черного моря — $0,08^{\circ}\text{C}/\text{год}$, на восточном побережье Азовского моря — $0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$. При этом среднегодовая температура для Азовского моря остается ниже значения

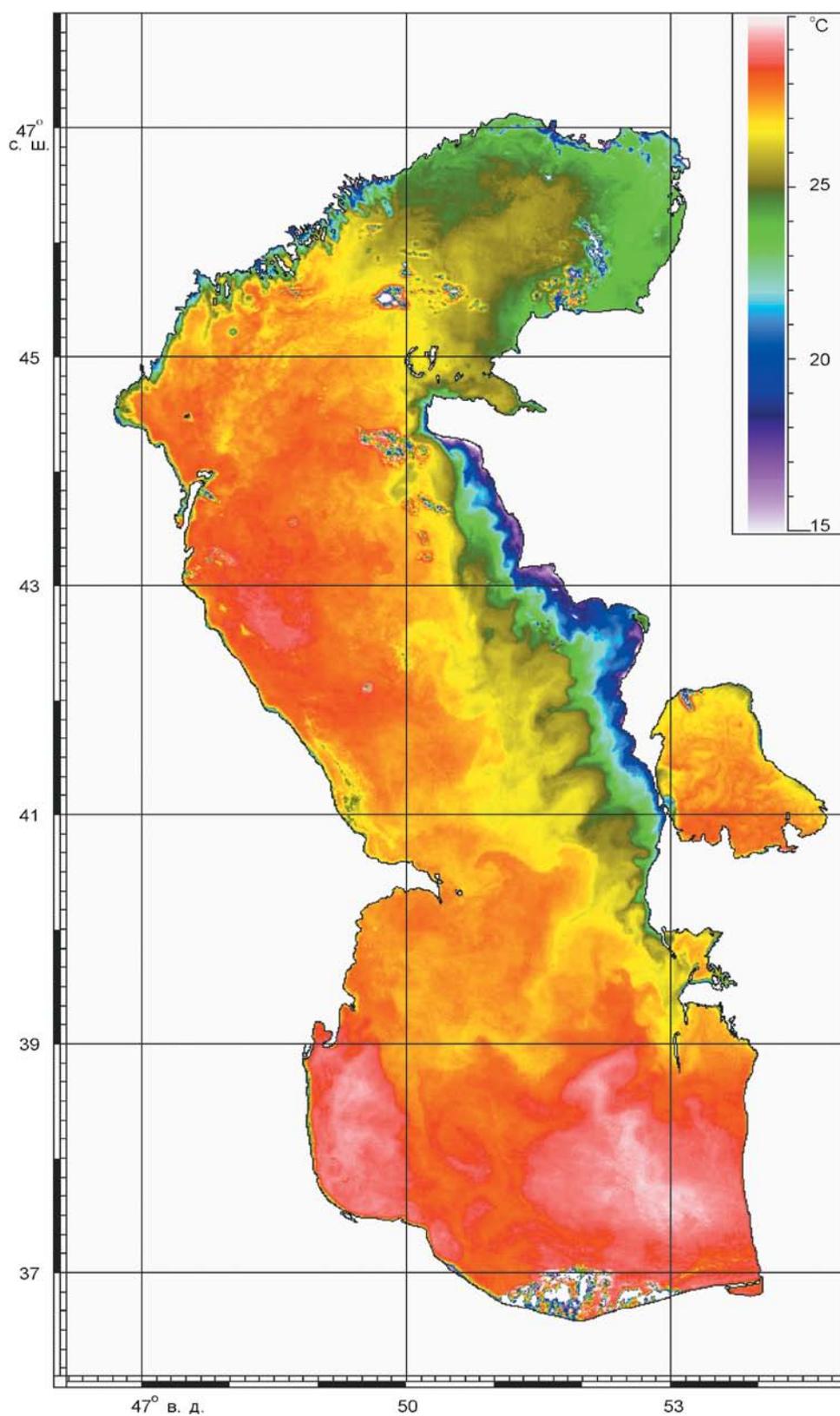


Рис. 11.4. Температура поверхности Каспийского моря 14 августа 2005 г. по данным спутника “NOAA-18” (22 ч 47 мин ВСВ).

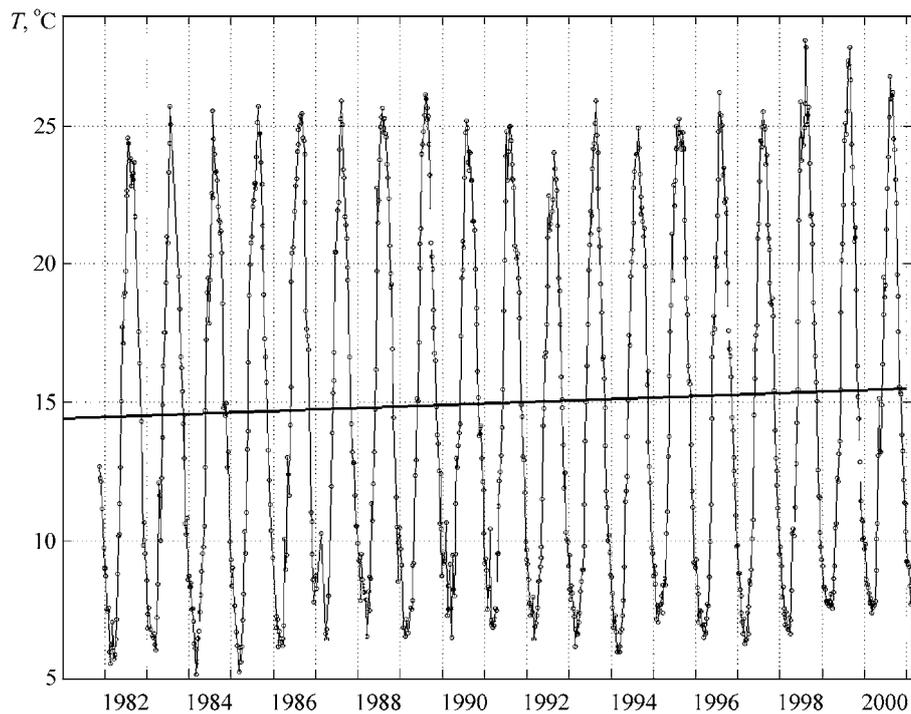


Рис. 11.5. Межгодовая и сезонная изменчивость температуры поверхности Каспийского моря в 1982—2000 гг.; спутниковые данные. Линейный тренд равен $0,05^{\circ}\text{C}/\text{год}$, в 1982—1991 гг. он составил $0,27^{\circ}\text{C}/\text{год}$, а в 1992—2000 гг. — $0,30^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

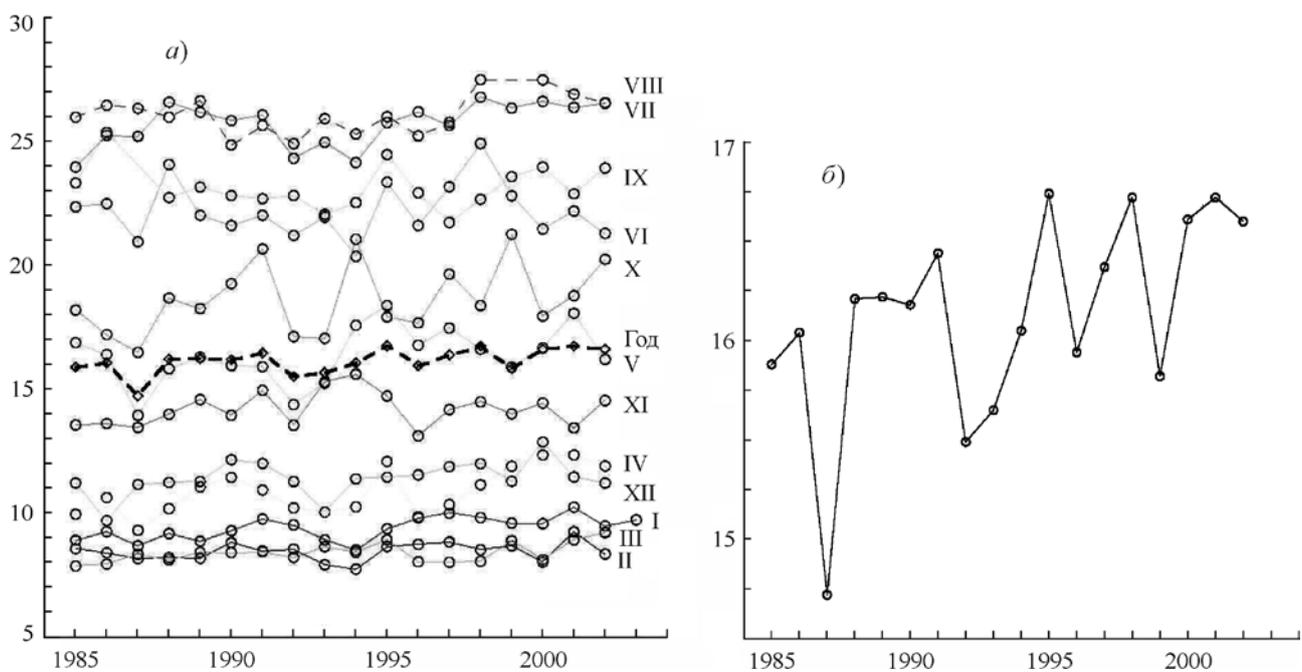


Рис. 11.6. Среднемесячные (а) и среднегодовые (б) значения температуры поверхности Каспийского моря в 1985—2003 гг.

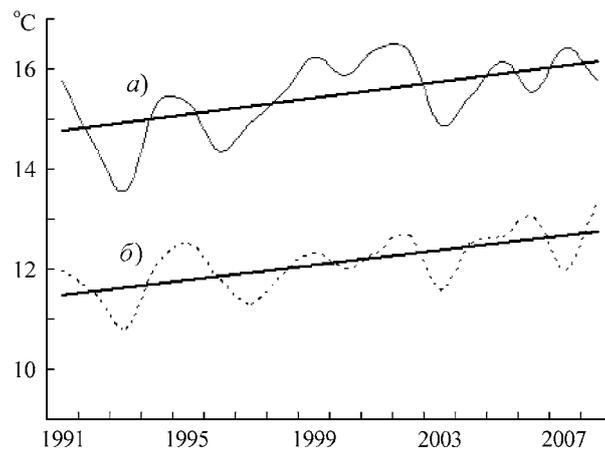


Рис. 11.7. Температура поверхности воды на восточном побережье Черного (а) и Азовского (б) морей и ее линейные тренды (прямые линии) в 1991—2008 гг.

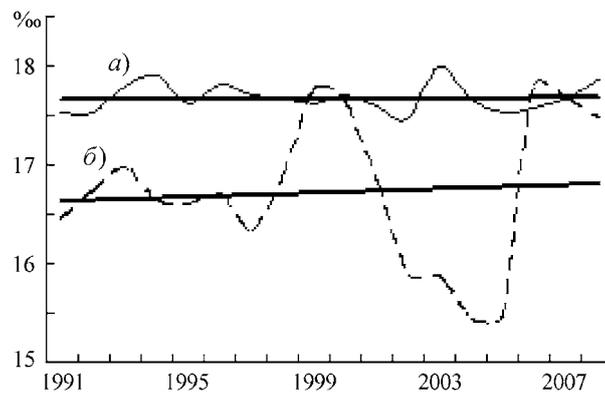


Рис. 11.8. Соленость воды на восточном побережье Черного моря в пунктах Геленджик (а) и Сочи (б) и ее линейные тренды (прямые линии) в 1991—2008 гг.

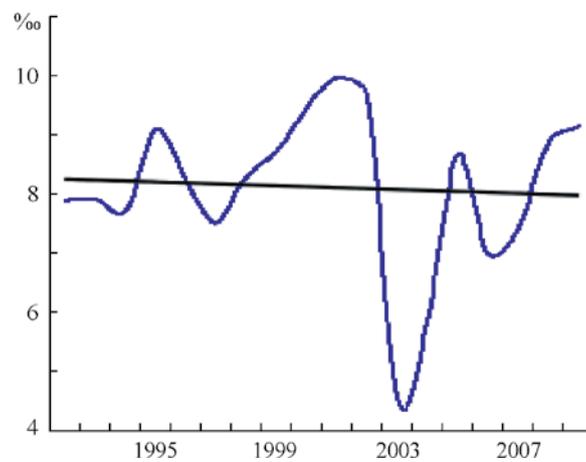


Рис. 11.9. Соленость воды в пункте Темрюк (Азовское море) и ее линейный тренд (прямая линия) в 1991—2008 гг.

того же показателя для Черного моря примерно на 3°C, что объясняется мелководностью Азовского моря и его географическим положением.

Изменение среднегодовой температуры на рассматриваемых морях обусловлено в основном потеплением климата в зимний период. Так, за предшествующие 16 лет там не отмечалось ни одной суровой зимы (Боровская и др., 2008).

Изменчивость солености в эти же годы приведена на рис. 11.8 и 11.9. Как видно, среднегодовая соленость в обоих пунктах на восточном побережье Черного моря за последние 18 лет в целом немного увеличивалась. Оценки линейных трендов для пунктов Сочи и Геленджик указывают на среднюю скорость увеличения солености 0,01 и 0,001‰ в год соответственно. К сожалению, в остальных пунктах в измерениях солености были значительные пропуски.

Полный ряд наблюдений солености в Азовском море в рассматриваемый период имеется только для станции Темрюк (рис. 11.9). Согласно этим данным, в целом соленость в этом районе моря немного уменьшалась (со средней скоростью 0,015‰/год). Колебания солености здесь тесно связаны с изменчивостью стока р. Кубань. Изменчивость солености Азовского моря по длительным рядам наблюдений характеризуется колебаниями с разными периодами: 7,6; 5,7; 3,8 и 2,3 года.

УРОВЕНЬ МОРЯ, ПРИВОДНЫЙ ВЕТЕР, ВОЛНЫ

Наземные и морские измерения

Методы измерения уровня моря

Изменения уровня моря отличаются широким амплитудно-частотным спектром. Разные составляющие вариаций уровня, включая и межгодовую изменчивость, обусловлены разными физическими процессами. Поэтому измерения уровня в прибрежной зоне и на открытой акватории морей требуют специально организованных систематических измерений. Во многих приморских странах организована

национальная сеть постоянных береговых и островных уровенных постов (ИОС, 2006).

Прибрежные наблюдения за изменениями уровня моря ведутся на специально оборудованных уровенных постах. По устройству различают речные, свайные, свайно-речные посты, а также уровенные посты с установкой разного типа самописцев уровня моря — мареографов (приборы для непрерывной регистрации уровня моря) (ИОС, 2006). Для решения специальных задач кроме наблюдений на стационарной сети ведутся и эпизодические наблюдения на дополнительных и временных прибрежных уровенных постах, а также в открытом море специальными мареографами.

По принципу измерения уровня можно условно выделить три типа приборов: приборы, непосредственно измеряющие уровень моря (уровенные рейки, поплавковые измерители и т. п.); приборы — датчики давления, с помощью которых уровень моря определяется путем измерения гидростатического давления; приборы — лазерные и акустические измерители, с помощью которых уровень моря определяется по расстоянию от прибора до водной поверхности.

Наиболее простым прибором для измерения уровня моря является уровенная рейка. Они бывают постоянные (футштоки) и переносные, устанавливаемые в момент измерений на специально подготовленные сваи. Однако при всем своем широком распространении измерения с помощью уровенных реек не лишены случайных и систематических ошибок, особенно при волнении. На стационарных уровенных постах отсчеты по уровенной рейке производят два, три или четыре раза в сутки. На временных уровенных постах наблюдения выполняют в начале каждого часа.

Поплавковые измерители уровня моря довольно просты по своему устройству и надежны в эксплуатации. Чувствительным элементом в данных приборах является поплавок. Их инструментальные ошибки составляют 1—3 см. Работа прибора основана на принци-

пе механической передачи изменений положения поплавка на регистрирующее устройство. Поплавковому измерителю свойственна погрешность, величина которой зависит от подбора (расчета) элементов прибора. Все поплавковые измерители уровня моря оснащены самописцами, которые осуществляют непрерывную запись уровня моря. Первый автоматический мареограф был установлен на о. Говернорс (штат Нью-Йорк, США) зимой 1844/45 г. В настоящее время электронные телеметрические системы позволяют автоматически передавать информацию от мареографов, установленных на прибрежных станциях, прямо в центр обработки данных.

Электроконтактные измерители уровня моря позволяют преобразовать положения уровня воды в электрические импульсы. Чувствительный элемент прибора, использующего этот метод, представляет собой ряд электрических контактов, расположенных на жестком основании через равные промежутки выше и ниже уровня воды. Системой постоянных резисторов электрические контакты соединены со схемой питания прибора и регистратором. При подъеме уровня моря контакты поочередно замыкаются на “землю”, в результате чего электрическое сопротивление в цепи датчика уменьшается скачкообразно. При понижении уровня наблюдается обратный процесс. 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 датчика, подвергаются фильтрации. В этом случае оценка колебаний с периодами более 30 с может производиться даже с точностью 1—2 мм (при расстоянии между контактами 7 мм). Однако в связи с обрастанием контактов точность из-

мерений может со временем резко уменьшаться. Поэтому приборы подобного типа требуют постоянного наблюдения за их состоянием.

Измерения уровня моря путем регистрации изменений гидростатического давления базируются на использовании упругой деформации чувствительного элемента под действием гидростатического давления. Чувствительным элементом в датчиках давления являются мембраны (плоские или гофрированные), сильфоны и трубчатые пружины. В свою очередь, величина деформации измеряется с помощью механических, электрических, магнитных, оптических и других систем, а по использованному методу преобразователи классифицируются как резистивные, индуктивные, емкостные, резонансные и пьезоэлектрические.

На данный момент разработано множество акустических измерителей. Их действие основано на измерении времени прохождения импульса звука, отраженного от поверхности воды. Измерители подобного типа устанавливаются в воздухе над наивысшим наблюдаемым уровнем. В состав измерителя входит звуковой излучатель, совмещенный с приемником. Звуковой излучатель посылает импульс звука по направлению к поверхности воды, звук отражается от поверхности воды и возвращается. Приемник фиксирует возвращенный импульс, а время, истекшее с момента отправки импульса, позволяет оценить пройденное им расстояние. Поскольку в расчетах используется скорость звука, а скорость звука в воздухе зависит от его температуры и влажности, данная технология измерения требует компенсации изменения температуры воздуха. Компенсация производится, как правило, путем измерения некоторого постоянного, эталонного расстояния и замеров температуры воздуха в рабочем пространстве. Ко всему прочему все измерения производятся в звуковой трубе, которая защищает от резких изменений рабочее пространство измерителя. Возможна установка акустических измерителей внутри внешнего колодца, который обеспечит успо-

коение поверхности и защиту от резких изменений температуры воздуха. Звуковая труба акустического измерителя имеет эталонную калибровочную точку, позволяющую получить эталонный отраженный импульс. Поскольку дистанция до эталонной точки точно известна (около 1,2 м) и постоянна, ее значение и время отражения эталонного импульса могут быть использованы для измерения скорости звука в рабочем пространстве. Однако эталонная точка находится в верхней части звуковой трубы над наивысшим наблюдаемым уровнем, что не позволяет точно оценить скорость звука ниже нее. Таким образом, если температура ниже эталонной точки будет существенно иной, это вызовет ошибку в измерениях. Акустические измерители уровня имеют точность измерения порядка 1 мм. Однако если уровень воды на 2 м ниже эталонной точки, а температура воздуха в этой точке на 1°C выше, чем в нижней части трубы, то ошибка составит 3,6 мм. Диапазона измерений акустического датчика иногда не хватает во время штормов, а в северных районах сильные заморозки не позволяют проводить качественные измерения при помощи акустических измерителей.

Выбор датчика для уровня поста целиком зависит от местных условий и целей и задач проводимых наблюдений. Так, речные уровенные посты, как правило, оборудуются в портах у берега и снабжаются постоянными металлическими уровнями рейками. Свайные уровенные посты оборудуются при положении дна моря и отсутствии гидротехнических сооружений. Они состоят из ряда свай, устанавливаемых в створе с пронивелированным профилем и с нормированными расстояниями между ними. Наблюдения выполняются переносными уровнями рейками. Свайно-речные уровенные посты оборудуются при положении дна и значительных колебаниях уровня, когда дополнительно к сваям устанавливают постоянные уровенные рейки (при необходимости можно использовать и переносные уровенные рейки).

Станции мониторинга

Инструментальные наблюдения за изменениями уровня Каспийского моря (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1992) начались в XIX в., сначала в Баку (с 1830 г.) и Астрабадском заливе (с 1853 г.), а затем в Махачкале и Куули-Маяке (с 1900 г.), в Красноводске (Туркменбаши) (с 1915 г.), в Форте-Шевченко и заливе Кара-Богаз-Гол (с 1921 г.). После этого было открыто еще значительное число постов. Некоторые из них просуществовали недолго. Наибольшее число уровенных постов (порядка 78) действовало в 1920—1930-е годы. Посты располагались по периметру Каспийского моря более или менее равномерно. Затем их число по разным причинам сократилось почти в два раза (рис. 11.10). В годы Великой Отечественной войны наблюдения за уровнем моря велись с перерывами.

Данные об уровне моря публиковались в Водном кадастре и в Морском гидрологическом ежегоднике, но в разных высотных системах отсчета (использовались Черноморская, Балтийская, условная, местная системы высот) (Основные гидрометеорологические..., 1940; Гидрометеорология и гидрохимия..., 1992).

В 1961 г. результаты наблюдений в 31 пункте были сведены в Каталог в единой системе высот реперов. Был установлен единый “нуль” поста Каспийского моря — на 28,00 м ниже нуля Кронштадтского футштока (Каталог..., 1964). В 1975—1980 гг. реперы уровенных постов повторно привязывались к Государственной системе высот (1977 г.). Результатом нивелирования реперов в регионе Каспийского моря (западное побережье) стало изменение высотных отметок относительно 1950 г. в пределах от 7 до 11 см (Победоносцев и др., 2004).

Выполненное в 1970-е годы геометрическое нивелирование на западном побережье Каспийского моря и последующее нивелировочное уравнивание сети изменили высотные отметки реперов. Изменение отметок было связано с повышением точности нивелирова-

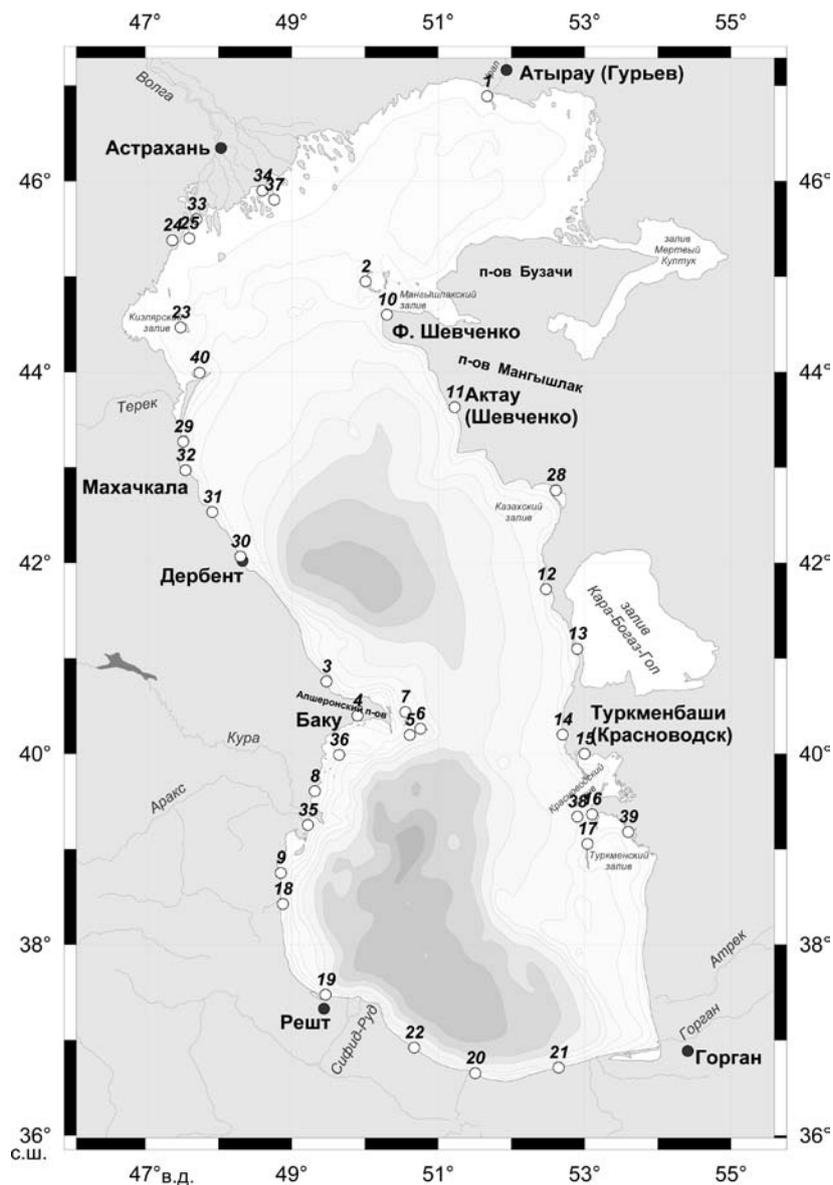


Рис. 11.10. Сеть уровенных постов Каспийского моря: 1 — о. Б. Пешные, 2 — Кулалы, 3 — Сумгаит, 4 — Баку, 5 — Нефтяные Камни, 6 — о. Жилой, 7 — о. Чиллов, 8 — Нефтьчала, 9 — Ленкорань, 10 — Форт-Шевченко, 11 — Актау, 12 — Бекдаш, 13 — Кара-Богаз-Гол, 14 — Куули-маяк, 15 — Туркменбаши (Красноводск), 16 — Челекен, 17 — Огурчинский, 18 — Астара, 19 — Бандар Анзали, 20 — Нов-Шахр, 21 — Бабольсер, 22 — Рамсар, 23 — о. Тюлений, 24 — Лагань, 25 — Искусственный, 26 — Жамбай, 27 — Каламкас, 28 — Фетисово, 29 — Сулак, 30 — Дербент, 31 — Изберг, 32 — Махачкала, 33 — Вышка, 34 — Тишково, 35 — Зюйд-Остовый Култук, 36 — о. Свиной, 37 — Двенадцатая Огневка, 38 — Челекен-эстакада, 39 — Аладжа, 40 — о. Чечень.

ния и вертикальными движениями реперов за период 1950—1977 гг. В то же время на восточном побережье Каспийского моря по разным причинам в 1970-е годы нивелирование не проводилось. Поэтому в настоящее время на Каспийском море для расчета уровня моря

существует две системы высот: система высот 1950 г. для восточного побережья и система высот 1977 г., введенная с 1 января 1979 г., для западного побережья.

Отсутствие единого геофизического обоснования уровенных наблюдений на Каспий-

ком море приводит к различиям между средними годовыми высотами уровня восточного и западного побережий (иногда до 30 см). Поэтому для уровенных постов западного побережья вводятся поправки, чтобы все уровенные наблюдения привести к отметке 1950 г. Это создает определенные неудобства и часто приводит к путанице. В связи с этим давно назрела необходимость безотлагательного и срочного проведения нивелирования уровенных постов и приведения уровенных наблюдений к Балтийской системе высот.

Наблюдения за уровнем Черного моря (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1991а) в России начались с середины XIX в. Они проводились по уровенным рейкам, установленным в нескольких портах, преимущественно дирекцией маяков и лоций Черного и Азовского морей и частично управлениями портов. Систематические наблюдения были организованы в 1873 г. Наиболее длинные, сохранившиеся ряды имеются для Очакова (с 1874 г.), Одессы и Севастополя (с 1875 г.).

В 1912 г. Отделом торговых портов Министерства торговли и промышленности была утверждена “Общая программа развития гидрометеорологической службы в торговых портах и пунктах морских побережий Европейской России”. Были возобновлены ранее прерванные в отдельных пунктах наблюдения и организованы новые уровенные посты.

Во время гражданской войны 1918—1920 гг. работа многих уровенных постов была прервана, рейки частично повреждены, а частично — уничтожены. В 1920 г. Центральной станцией гидрометеослужбы Черного и Азовского морей (размещавшейся в Феодосии) была проделана большая работа по восстановлению сети станций и ее расширению в соответствии с программой 1912 г.

Перед Великой Отечественной войной 1941—1945 гг. Севастопольским управлением гидрометеослужбы (УГМС) было открыто в разных пунктах побережья Черного и Азовского морей 17 постов и еще два поста — Гид-

рографическим управлением Военно-Морского флота.

Во время Великой Отечественной войны многие уровенные посты были полностью или частично уничтожены, и наблюдения не проводились. Пострадали также посты, расположенные на кавказском побережье, где наблюдения хотя и продолжались, но с перерывами, вследствие повреждений уровенных реек при бомбежках с воздуха. В условиях оккупации работал уровенный пост в г. Ялта. С 1944 г. сеть уровенных постов начала восстанавливаться, реконструироваться и расширяться. На многих постах были установлены самописцы уровня моря.

В середине 1950-х годов геодезической службой СССР была проведена большая работа по точной нивелировке геодезических пунктов, что позволило привести все реперы к единой системе высот и сделать данные сопоставимыми. До этого каждый пункт имел свой нуль поста. На территории СССР в 1977 г. была введена Главная высотная основа СССР в Балтийской системе высот, отнесенной к 1977 г., которая действует и поныне.

Большая работа была проделана при подготовке “Каталога уровенных наблюдений на Черном и Азовском морях” (Каталог..., 1965): исключены ошибки из материалов предыдущих наблюдений, данные приведены к единой системе высот. Всего в разные годы на территории СССР на Черном море существовало 44 уровенных поста, данные которых до 1985 г. (включительно) сведены в (Каталог..., 1990). Здесь же содержатся краткие сведения о постах и об их высотной привязке (реперах). С 1992 г. сеть станций отошла к созданным независимым государствам, бывшим республикам СССР, после чего началось сокращение сети станций.

В Констанце и Сулине (Румыния) наблюдения проводятся с 1858 г., причем сохранились полные ряды. В Болгарии наблюдения за уровнем моря начали проводиться с 1881 г. (Варна). Позже были открыты станции Несебар (1924 г.) и Бургас (1928 г.). На турецком побережье в течение 1949—1962 гг. наблюде-

ния проводились в Эрегли, Трабзоне (1956—1983 гг.) и Самсуне (1961—1983 гг.). В Турции сеть станций принадлежит гидрографической службе Военно-морского флота.

В настоящее время сеть пунктов наблюдений за уровнем Черного моря насчитывает 30 станций (рис. 11.11), из них 13 принадлежат Украине (не считая пунктов, расположенных в устьях рек и в лиманах, непосредственно не связанных с морем) (Ильин, Репетин, 2002),

5 — Российской Федерации, 4 — Болгарии, по 3 — Румынии и Турции, 2 — Грузии. Таким образом, в среднем одна станция приходится на 120 км береговой линии. Вместе с тем станции расположены очень неравномерно. Самая густая часть сети на западном побережье — половина всех станций, а самая редкая — на южном, турецком побережье (всего три станции). Необходимо отметить, что сеть станций на побережье Черного моря — одна из самых

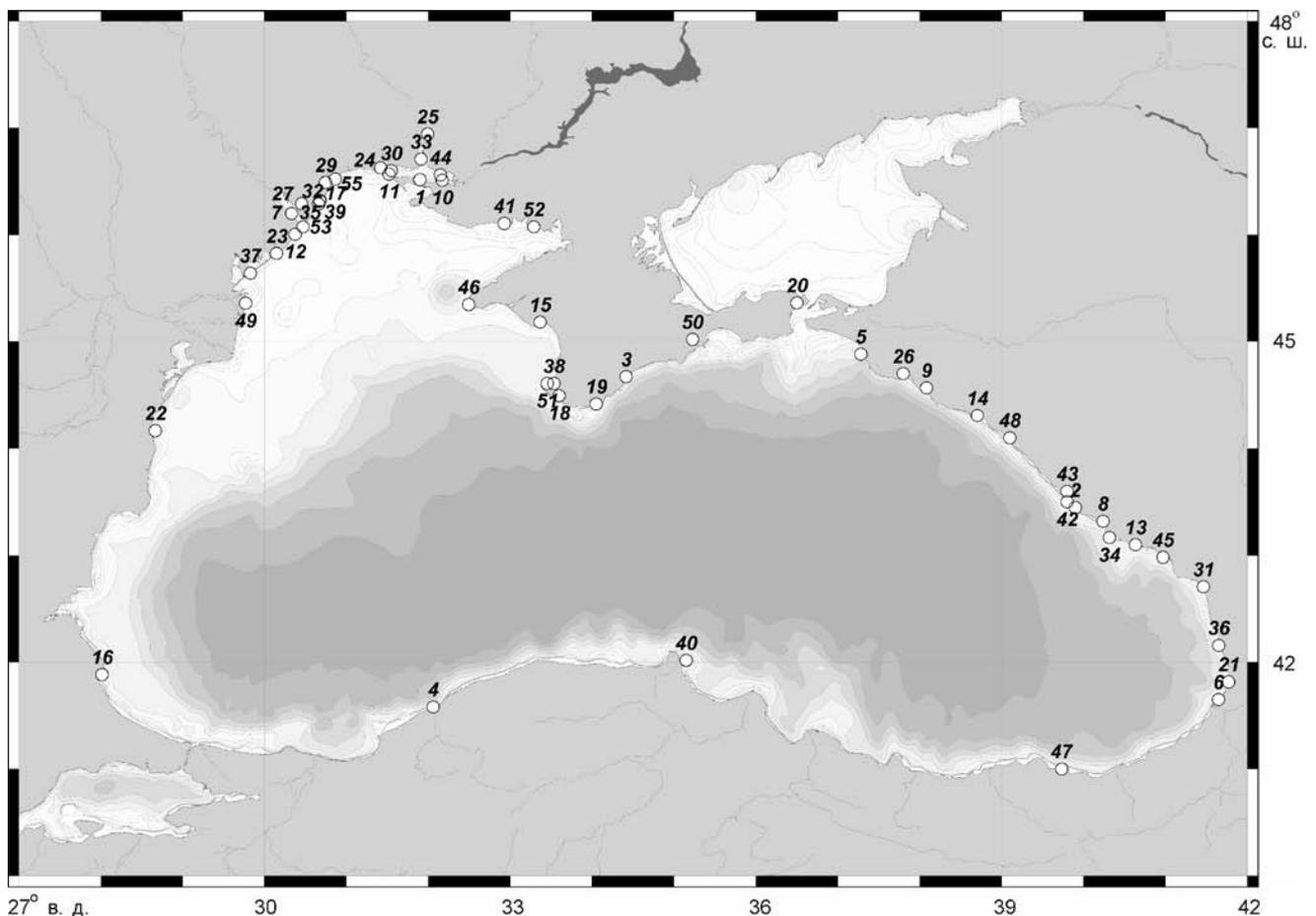


Рис. 11.11. Сеть уровенных постов Черного моря: 1 — Аджигиол; 2 — Адлер; 3 — Алушта; 4 — Амасра; 5 — Анапа; 6 — Батуми; 7 — Белгород-Днестровский; 8 — Гагра; 9 — Геленджик; 10 — Геройское; 11 — Григорьевка; 12 — Григорьевский лиман; 13 — Гудаута; 14 — Джубга; 15 — Евпатория; 16 — Игнеада; 17 — Ильичевск; 18 — Камышовая; 19 — Качивели; 20 — Керчь; 21 — Кобулеты; 22 — Констанца; 23 — Лебедевка; 24 — Лиманы; 25 — Николаев (Днепро-Бугская); 26 — Новороссийск; 27 — Одесса; 28 — Одесса-порт; 29 — Одесса-порт; 30 — Очаков; 31 — Очамчира; 32 — Паромная переправа; 33 — Парутино; 34 — Пицунда; 35 — Понтонный мост; 36 — Потти; 37 — Приморское; 38 — Севастополь; 39 — Северный; 40 — Синоп; 41 — Скадовск; 42 — Сочи; 43 — Сочи-порт; 44 — Станислав; 45 — Сухуми; 46 — Тарханкутский маяк; 47 — Трабзон-П; 48 — Туапсе; 49 — Усть-Дунайск; 50 — Феодосия; 51 — Херсонес; 52 — Хорлы; 53 — Цареградское гирло; 54 — Черноморское; 55 — Южный; 56 — Ялта.

густых для внутренних морей, не говоря уже об океане. Так, в работе (Tsimplis, Spencer, 1997) признается, что на побережье Средиземного моря, несмотря на то, что значительную часть береговой линии занимают высокоразвитые страны, существующая сеть пунктов наблюдений за уровнем моря совершенно недостаточна.

Систематические наблюдения за уровнем на побережье Азовского моря на уровне постах Керчь, Геническ, Таганрог ведутся с конца XIX в., а с начала XX в. — и на уровне постах Ейск, Приморско-Ахтарск, Темрюк-порт (рис. 11.12) (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1991б). Данные наблюдений отвечают условиям однородности, т. е. они приведены к единой системе высот.

В настоящее время в России действует Главная высотная основа (ГВО) СССР 1977 г.,

введенная с 1 января 1979 г. на всей территории СССР и отнесенная к 1977 г. Для перехода от Балтийской системы высот (БС), принятой ранее, к системе высот 1977 г. вводились поправки, представляющие собой разность между отметками высот реперов в БС и ГВО СССР. Значения этих поправок в разных пунктах Азовского моря изменяются от 5 до 10 см и имеют положительный знак. За единый нуль постов Азовского моря, который используется для оперативных целей, с 1961 г. принята отметка, равная $-5,000$ м БС.

Базы (архивы) данных

При решении разных научных и практических задач возникает необходимость получения исторической, оперативной и прогностической информации о качественных и количест-

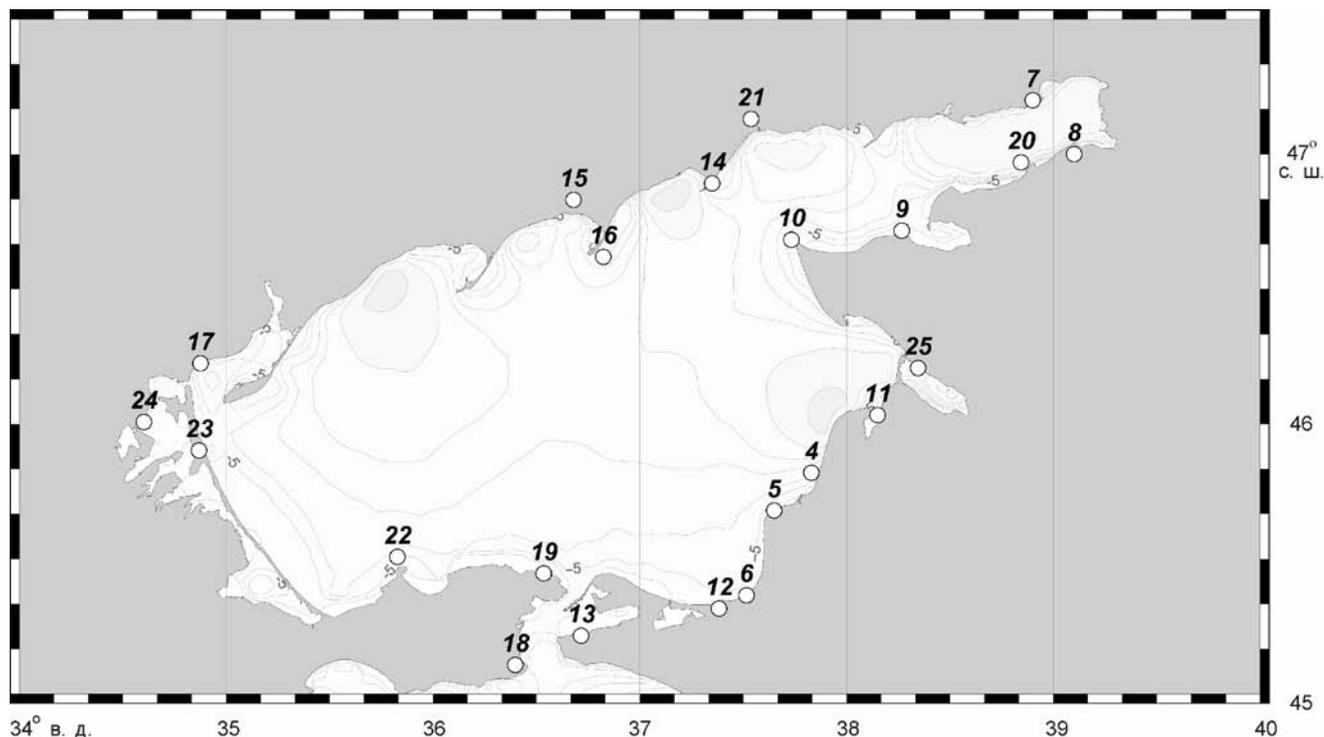


Рис. 11.12. Сеть уровненых постов Азовского моря: 1 — Раздорская; 2 — Багаевский; 3 — Старочеркасская; 4 — Слободка; 5 — Темрюкский рыбзавод; 6 — Перекопка; 7 — Таганрог; 8 — Очаковская коса; 9 — Ейск-порт; 10 — Должанская; 11 — Приморско-Ахтарск; 12 — Темрюк-порт; 13 — Тамань; 14 — Белосарайская коса; 15 — Бердянск; 16 — Бердянская коса; 17 — Геническ; 18 — Заветное; 19 — Керчь; 20 — Маргаритово; 21 — Мариуполь; 22 — Мысовое; 23 — Стрелковое; 24 — Чонгарский мост; 25 — Ясенская переправа.

венных характеристиках изменчивости уровня морей, в частности южных морей России.

Базы данных с российских уровенных постов для каждого моря формируются в соответствующем региональном Управлении гидрометеорологической службы (УГМС). Затем они передаются во Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). Для каждого моря в табличном виде приведены сведения о названии станции, ее коде в системе Государственного водного кадастра (ГВК), координатах, времени наблюдений и уровне моря. Недостатком этих данных является сложность их получения из ВНИИГМИ-МЦД, так как они отсутствуют в открытом доступе в сети Интернет.

Примером уже существующих систем, предоставляющих свободный доступ пользователей к данным наблюдений за уровнем моря и программные средства управления ими, может служить информационная система GLOSS (Global Sea Level Observing System) (www.gloss-sealevel.org). Она реализована в рамках одноименного международного проекта, являющегося частью программы GOOS (Global Ocean Observing System). Эта программа была инициирована ИОС (Intergovernmental Oceanographic Commission) при участии ВМО (World Meteorological Organization). В данную сеть из всех постов южных морей России входит только пост Туапсе.

Одной из составляющих GLOSS является PSMSL (Permanent Service for Mean Sea Level) (www.psmsl.org). В эту сеть входят восемь черноморских постов: Туапсе (Россия), Севастополь (Украина), Потти и Батуми (Грузия), Констанца (Румыния), Игнеда (Турция), Бургас и Варна (Болгария). Таким образом, уровенные посты Азовского и Каспийского морей не входят ни в одну международную наблюдательную сеть.

К достоинствам систем GLOSS и PSMSL можно отнести тщательный отбор используемых уровенных постов, что обеспечивает хо-

рошую надежность получаемых данных, предоставление подробной полезной информации об особенностях осуществления измерений и обработки данных, предоставление графической информации о местоположении уровенного поста и оценок месячной и годовой изменчивости уровня моря, полученных по результатам наблюдений.

Идеи, заложенные в системах GLOSS и PSMSL, могут быть развиты в следующих направлениях:

- расширение информации с поста (добавление синхронизированных временных рядов температуры воды и воздуха, атмосферного давления, скорости и направления приводного ветра, относительной влажности воздуха);

- расширение возможностей выборки данных (GLOSS позволяет выбирать данные только по уровенным постам, тогда как интерес могут представлять выборки по сезонам, временным интервалам, диапазонам значений уровня моря и т. д.);

- обеспечение открытости системы (возможность получения не только среднемесячных и среднегодовых значений уровня, но и данных срочных измерений).

Следующим этапом развития международной сети наблюдений за уровнем Черного моря стал проект MedGLOSS, который отвечает как национальным, так и международным интересам. В перспективе он должен охватить весь регион Черного и Средиземного морей. Все участники проекта получают доступ к данным мониторинга, проводимого другими странами-участницами.

Установленные в рамках программы MedGLOSS в 2003 г. в п. Кацивели и в Констанце мареографы входят в сеть мониторинга уровня моря MedGLOSS и работают в режиме, близком к режиму реального времени (on-line режим), т. е. данные с небольшим запаздыванием размещаются на соответствующем сайте (medgloss.ocean.org.il). Данные со станций Туапсе и Бургас, также входящие в эту сеть, по-

ступают на сайт MedGLOSS в режиме задержки (off-line режим).

Все эти международные проекты должны до некоторой степени решить еще одну проблему. После распада СССР практически прекращен обмен данными между странами бывшего СССР, обладающими развитой сетью пунктов наблюдений за уровнем моря. Сейчас среднемесячные данные по постам Поти, Батуми и Туапсе доступны только на сайте PSMSL (причем анализ данных дает повод усомниться в их качестве). Украина представила в этот международный проект данные только по Севастополю до 1994 г.

Недостатки современных наземных и морских методов измерения уровня моря

Проведение систематических измерений уровня моря связано со значительными затруднениями, связанными с 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, и обрастание измерительных приборов и т. п.

Оценка уровня моря на уровне постах по данным измерений не является простой задачей. Из данных наблюдений должны быть исключены влияние сгонно-нагонных явлений, сейшевые колебания, влияние изменения атмосферного давления и ряда других факторов, а также тектонические вертикальные смещения земной коры (побережья).

Так, организация измерений уровня моря по уровненой рейке через 6, 8 или 12 ч может привести к возникновению дополнительной ошибки измерений уровня, обусловленной особенностями орографии береговой линии. Например, наблюдаемые в Севастопольской бухте сейшевые колебания при проведении срочных измерений по уровненой рейке попадают в разные фазы сейшевых колебаний и

дают искаженную картину изменений уровня с погрешностью от 1—2 до 10—15 см. Амплитуда сейш изменяется от 2—3 до 20—30 см (Горячкин и др., 2002). Эксперименты показали, что внедрение современных измерителей уровня моря является острой необходимостью (особенно в бухтах, лиманах, заливах).

Важной проблемой, возникающей при оценке межгодовой изменчивости уровня моря по данным уровненых постов, является влияние современных вертикальных движений земной коры (СВДЗК).

Скорости СВДЗК на побережье Каспийского моря не превышают 1 см/год. На большей части каспийского побережья они варьируют в пределах 0,2—0,5 см/год, на Среднем Каспии примерно равны 0,3 см/год (Победоносцев, 1972). Для некоторых уровненых постов на побережье Каспийского моря скорость СВДЗК составляет: –0,14 см/год для Махачкалы, –0,09 см/год для Форта-Шевченко, –1,10 см/год для Баку и –0,01 см/год для Туркменбаши (Красноводск). Северо-Западное Причерноморье представляет собой область современных опусканий со скоростью –0,15...–0,18 см/год (Лилиенберг и др., 1972). В Черном море максимальные величины скорости СВДЗК зафиксированы в Варне и Бургасе. За период 1928—1980 гг. они составили соответственно +1,07 и +0,73 см/год (Trifonova, Demireva, 2003). Выполненные в работах (Горячкин, Иванов, 2006; Горячкин, 2008) оценки скорости вертикальных движений земной коры для периода 1927—1990 гг. показывают, что везде скорости вертикальных движений невелики. Они варьируют вокруг величины +0,1 см/год, за исключением района Одессы и Колхидской низменности, где они равны –0,51 и –0,62 см/год соответственно (Каталог..., 1990). Побережье Крыма погружается со средней скоростью –0,14 см/год (–0,1 см/год — Черноморское; –0,12 см/год — Евпатория; –0,14 см/год — Алушта; –0,31 см/год — Керчь) (Багрова и др., 2001). Вертикальные движения

имеют свои микроритмы, период которых определяется несколькими годами.

Северо-западное побережье Азовского моря опускается со средней скоростью $-0,08$ см/год ($-0,06$ см/год — Таганрог; $-0,05$ см/год — Белосарайская коса; $-0,15$ см/год — Приморск; $-0,03$ см/год — Геническ) (Карта..., 1971). Средняя скорость СВДЗК на юго-восточном побережье в среднем близка к $-0,05$ см/год ($-0,04$ см/год — Темрюк-порт; $-0,07$ см/год — Должанская). Особенно следует выделить район п. Ачуево ($-0,4$ см/год) и район дельты р. Дон ($-0,2$ см/год).

Учет вертикальных движений необходим в любой сколько-нибудь долговременной программе оценки изменений уровня южных морей России. В настоящее время наиболее просто и экономно его следовало бы провести с помощью методов спутниковой геодезии или GPS-измерений (Захаров, 2006) или проведением регулярного повторного нивелирования уровенных постов (Багрова и др., 2001).

В связи с внедрением в геодезическую практику спутниковых технологий в России на новом качественном уровне создается государственная спутниковая геодезическая сеть, позволяющая установить единую общеземную систему высот. Наряду с решением фундаментальных и прикладных задач, обеспечивающих построение на территории Российской Федерации единой высокоточной государственной системы геодезических координат и поддержание ее на уровне современных и перспективных требований, представляется целесообразным выполнять привязку реперов и нулей морских уровенных постов к вновь создаваемой (на основе применения глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС) единой государственной системе координат и высот. Это нашло отражение в Федеральной целевой программе (ФЦП) “Глобальная навигационная система” (на период 2002—2011 гг.), которая включает в себя наряду с выполнением основных мероприятий по созданию новой высокоэффективной госу-

дарственной системы геодезического обеспечения России мероприятия по “созданию системы постоянных спутниковых наблюдений за динамикой уровня моря на уровенных постах российских морей и прогноза его состояния” (Остроумов, Остроумов, 2007).

Примеры оценок наблюдаемых изменений статистическими методами

Межгодовая изменчивость уровня Черного моря, оцененная по данным ежечасных наблюдений на посту Кацивели (Украина) за период с 1993 г. по 2006 г. и по среднемесячным данным на посту Туапсе (Россия) за период с 1916 по 2008 г., охарактеризована на рис. 11.13 и рис. 11.14. Штриховой линией показана межгодовая изменчивость уровня моря. На рис. 11.15 представлены многолетние данные об уровне моря по восточному побережью Черного и Азовского морей, полученные контактными измерениями, и линейные тренды. Все данные на рис. 11.13—11.15 приведены в Балтийской системе высот (БС). Как видно на рис. 11.15, уровень воды в обоих морях в целом увеличивается.

Оценки линейных трендов дают среднюю скорость повышения уровня на северо-восточном и восточном побережьях Черного моря: $0,46$ и $0,42$ см/год соответственно. При этом повышение уровня в Сочи составило $0,55$ см/год, в Новороссийске — $0,46$ см/год, в Туапсе — $0,34$ см/год.

На рис. 11.15 видно, что периоды основных колебаний уровня обоих морей близки. Амплитуда колебаний среднегодового уровня около линии тренда в обоих морях составляет 5 — 10 см. При этом амплитуда этих колебаний в Азовском море несколько больше, чем в Черном море.

Близость периодов колебаний — аргумент в пользу того, что эти колебания обусловлены общностью климатических характеристик увлажненности в бассейнах обоих морей,

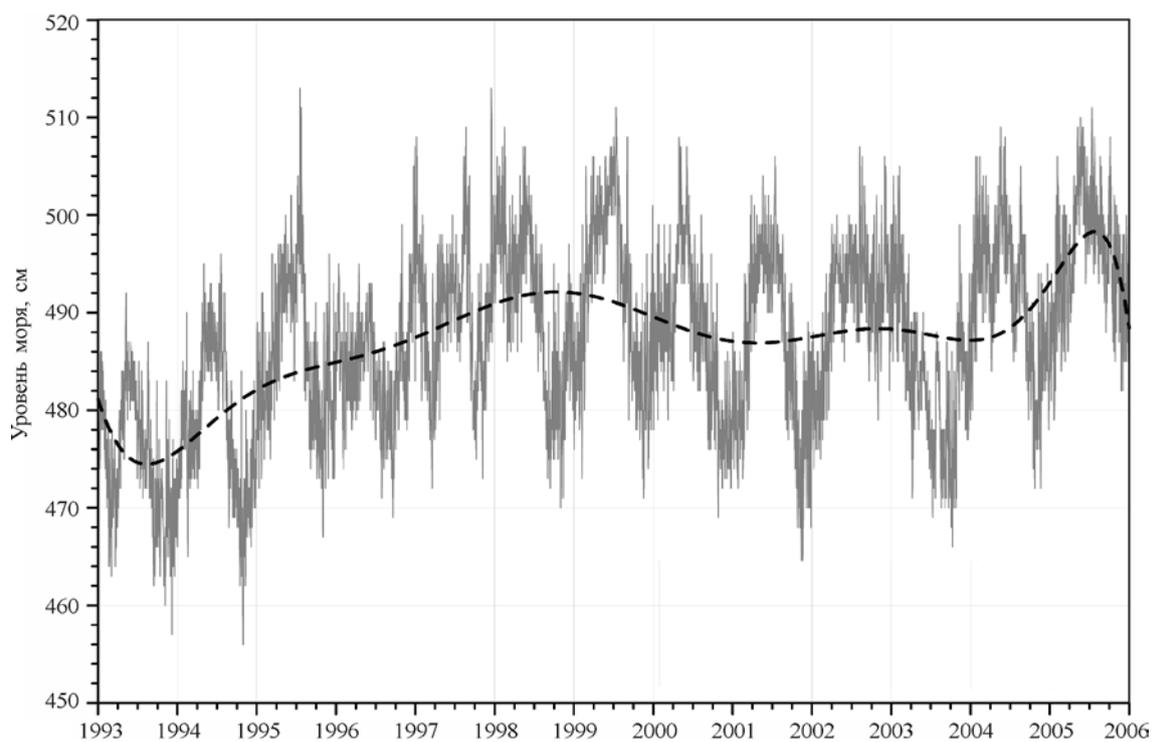


Рис. 11.13. Результаты ежечасных измерений уровня Черного моря на посту Кацивели (Украина) с 1993 по 2006 г.

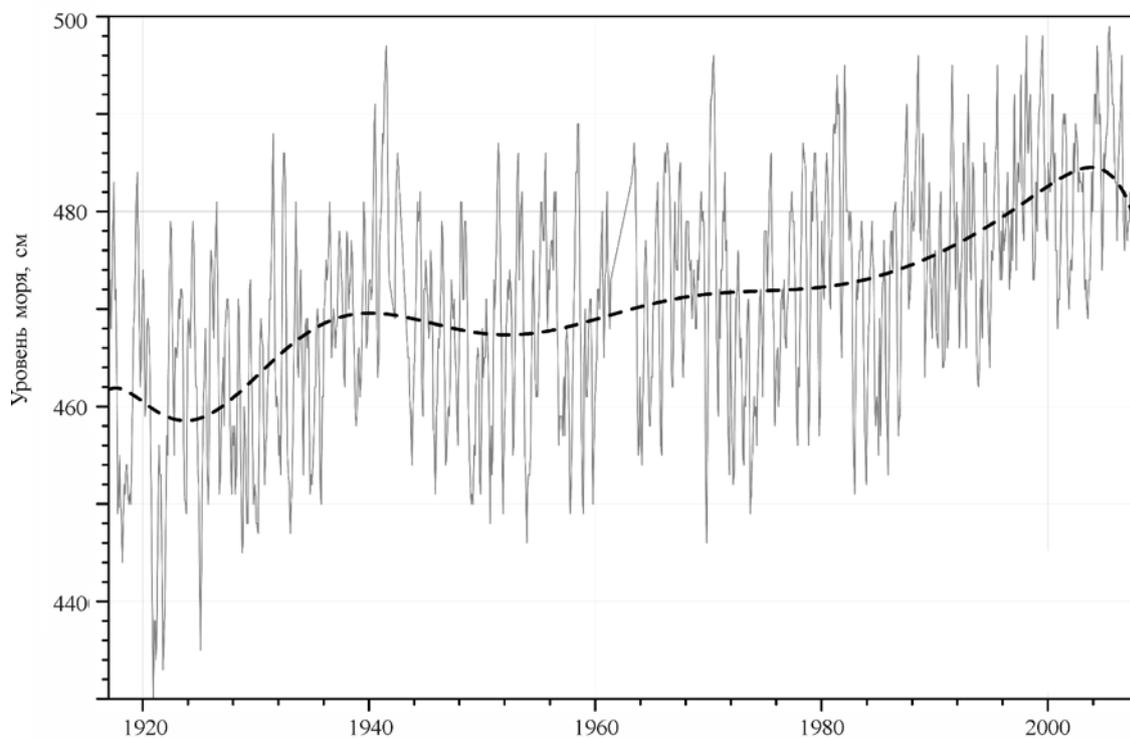


Рис. 11.14. Изменение уровня Черного моря в 1916—2008 гг.; представлены среднемесячные данные поста Туапсе (Россия).

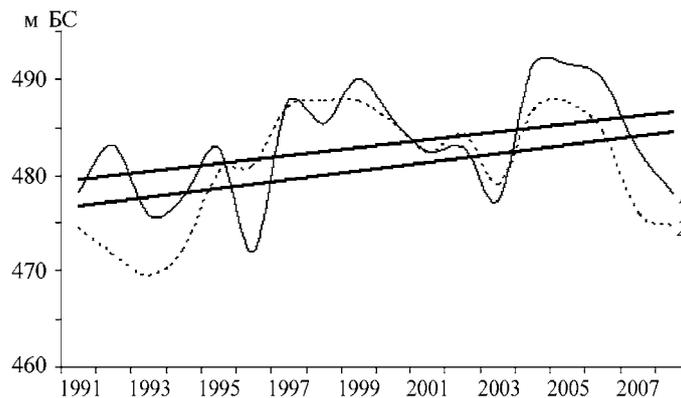


Рис. 11.15. Изменение уровня на восточном побережье Азовского (1) и Черного (2) морей, полученные контактными измерениями, и линейные тренды (прямые).

причем Азовское море более чувствительно к изменениям этих характеристик.

Расчеты периодограмм по длительным рядам наблюдений за уровнем в прошлые годы показывают, что в колебаниях среднегодового уровня Черного моря имеются статистически достоверные колебания с периодами 2,4, 3,6 и 4,8 года. Составляющие с близкими периодами (2,4, 3,6, 4,2 года) отмечаются в колебаниях среднегодового уровня Азовского моря.

Исследование периодограммы, построенной по данным о колебаниях уровня океана в районе Бреста (Франция), показало наличие статистически достоверных составляющих с периодами 2,2—2,4 и 3,3—3,6 года.

Многолетние тренды уровня Черного и Азовского морей близки и связаны как с изменениями климата в Северном полушарии, так и с трендом уровня Мирового океана. В работе (Рева, 1997) было рассмотрено изменение уровня в 20 пунктах Черного моря за разные периоды наблюдений с 1874 по 1991 г. Обнаружено, что начиная с 1920-х годов интенсивность подъема уровня моря была $1,83 \pm 0,007$ мм/год, что, по мнению автора, находится в хорошем соответствии с данными о повышении уровня моря в Северной Атлантике.

По расчетам авторов, выполненным на основе данных об уровне моря только со станций

восточного побережья Черного моря, с 1920-х годов по 1985 г. увеличение уровня составило также 1,82 мм/год. Таким образом, данные о многолетнем изменении уровня на российском побережье Черного моря достаточно точно соответствуют оценке изменения среднего уровня всего моря.

Гидродинамические методы

Среди расчетных методов наиболее полную информацию об уровне Мирового океана и его изменениях могут давать гидродинамические модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО).

Современные МОЦАО включают интерактивные блоки атмосферы, океана, деятельного слоя почвы, криосферы и биосферы. Они являются наиболее перспективными для использования при исследованиях как естественных процессов изменчивости климата, так и его реакции на внешние, в том числе антропогенные воздействия.

В рамках подготовки Четвертого оценочного доклада (вышел в 2007 г.) Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) был организован проект по анализу расчетов климата разными моделями при заданных концентрациях парниковых газов и аэрозолей и трех сценариев антропоген-

ного воздействия на глобальный климат. Полученные оценки повышения среднего уровня Мирового океана показывают, что в конце XXI в. повышение уровня может составить от 0,19 до 0,50 м (Fourth Assessment Report..., 2007). Здесь же указано, однако, что подъем уровня океана может быть и бóльшим, так как в данное время еще недостаточно изучены динамические процессы в ледниковых щитах Гренландии и Антарктиды, частичная потеря массы которыми вследствие потепления может привести к большему подъему уровня Мирового океана.

Наряду с изменениями среднегодового, фонового уровня моря, для безопасности населения и хозяйственной деятельности на побережьях морей важно оценивать экстремальные значения, связанные со сгонно-нагонными явлениями. Так, сильные ветры над Азовским морем подчас вызывают опасные подъемы и спады уровня на его берегах, нарушая условия нормальной деятельности флота, прибрежных предприятий и населенных пунктов.

В работе (Филиппов, 2009) приводится метод расчета экстремальных характеристик мезомасштабных колебаний уровня редкой повторяемости на основе гидродинамического моделирования сгонно-нагонных процессов и теории экстремальных значений Гумбеля — Лангбейна. Согласно последней, в каждой точке моря период повторяемости T для определенной градации уровня моря вычисляется по выборке, составленной из годовых максимумов уровня. Например, в районе Таганрога при современном режиме ветра и современном фоновом уровне моря его наибольшее нагонное повышение, возможное раз в 25 лет, составляет 142 см, раз в 50 лет — 150 см, раз в 100 лет — 160 см, в районе Темрюка — соответственно 85, 97 и 110 см.

Физико-статистические методы

Примером физико-статистического метода прогноза климатических изменений уровня является метод выделения определенных кли-

матообразующих предикторов, ход изменения которых во времени и их статистические характеристики позволяют оценивать будущее изменение уровня моря. Физико-статистические методы появились около века назад и до сих пор часто используются в прогностической работе. В их основе лежат физические гипотезы, которые являются результатом детального анализа изучаемых процессов на основе систематических наблюдений и теоретических исследований.

Наибольшие трудности возникают при выборе предикторов, которые определяются физической сущностью изучаемого явления. От их удачного выбора многое зависит, и поэтому важно правильно выбрать не только сами аргументы, но и их оптимальное число. Под оптимальным числом понимают такую совокупность предикторов, дальнейшее увеличение числа которых не приводит к существенному повышению точности прогноза. Затем работа сводится к нахождению взаимосвязи между предикторами — определяющими факторами — и прогнозируемой величиной.

Так, например, в основу наиболее актуального в настоящее время прогноза многолетних изменений среднего уровня Каспийского моря положено утверждение о том, что колебания его уровня определяются в основном атмосферными процессами. При этом время запаздывания изменения уровня (адаптация) от изменений атмосферных процессов может составлять несколько лет. В работе (Абузьяров, 2003) в качестве предикторов использовались интегральные значения индексов циркуляции атмосферы в форме Н. А. Белинского, а также значения коэффициентов разложения в ряды по естественным составляющим полей аномалий приземного атмосферного давления над Северным полушарием. Результаты испытаний показали преимущество выбора второго варианта предикторов.

На рис. 11.16 представлена полученная по этим расчетам перспективная оценка изменения уровня Каспия на ближайшие годы. Соглас-

но этим оценкам, значительный подъем уровня ожидается в 2012—2013 гг. — до $-26,2$ м ГВО (Главная высотная основа России).

В работе (Мещерская, Голод, 2003) разработан статистический метод прогноза уровня Каспийского моря с заблаговременностью 5—18 лет (до 2018 г.). В качестве предикторов были использованы несколько иные крупномасштабные климатические величины: разности температуры воздуха в тропической и полярной зонах, повторяемость западной формы

циркуляции по Г. Я. Вангенгейму, число дней с глубоким циклоном в районе азорского максимума, ледовитость в Северо-Европейском бассейне, давление в центре сибирского максимума, индексы североатлантического колебания, индексы южного колебания и индексы зональной циркуляции А. Л. Каца. В результате расчетов также получено, что в конце рассматриваемого периода (2020 г.) уровень моря может оказаться на отметке около $-26,5$ м ГВО (рис. 11.17). На рисунке видно, что климати-

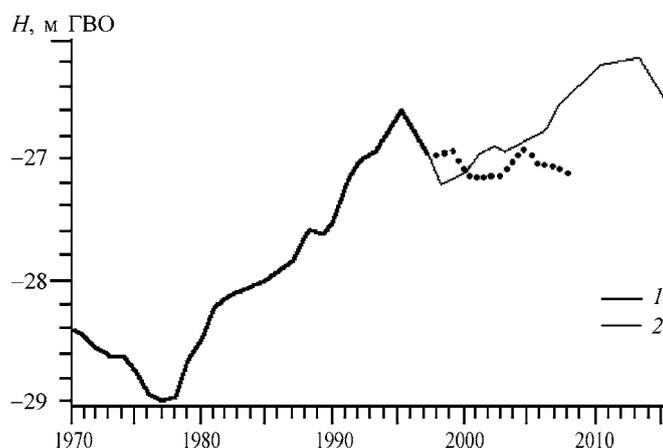


Рис. 11.16. Фактический ход уровня Каспийского моря до 1997 г. (1) и его перспективная оценка до 2015 г. (2) (Абузяров, 2003). Точки показывают фактический ход уровня после 1997 г.

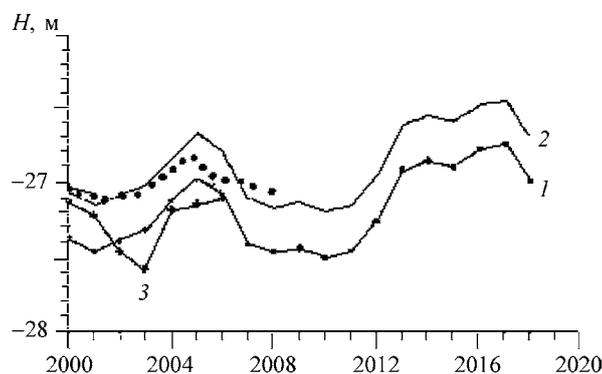


Рис. 11.17. Результаты перспективной оценки уровня Каспия с использованием климатических параметров в качестве предикторов (Мещерская, Голод, 2003). 1 — прогноз уровня Каспия без приведения к фактическому уровню 2002 г.; 2 — то же с приведением; 3 — прогнозы уровня средней заблаговременности. Точки показывают фактический ход уровня после 2000 г.

ческие предикторы, использованные в работе (Мещерская, Голод, 2003), позволяют достаточно хорошо прогнозировать изменения уровня Каспийского моря.

Стерические измерения уровня моря

Уровень моря может изменяться как глобально, так и локально, вследствие, например, изменений плотности воды. Изменения уровня моря, вызванные изменениями плотности воды, называются стерическими. Изменения плотности, вызванные только изменениями температуры, называются термостерическими, тогда как изменения, вызванные изменениями солёности, называются галостерическими. Стерические колебания вносят существенный вклад в сезонную изменчивость уровня морей России, определяют многие особенности в синоптическом и межгодовом диапазонах изменчивости и влияют на климатические тренды. Для получения оценок стерических изменений уровня моря применяются разные методики (Белоненко и др., 2009; Фукс, 2005).

Решение этой задачи возможно двумя путями: численное моделирование или использование дистанционного зондирования в дополнение к традиционным контактными методами измерений уровня, температуры и солёности морей. Примеры решения подобной задачи для Мирового океана, Средиземного и Чёрного морей приведены в работах (Cazenave et al., 2002; Antonov et al., 2005; Chambers, 2006; Ishii et al., 2006; Garcia et al., 2007; Белоненко и др., 2009).

Дистанционные измерения

Спутниковая альтиметрия

Среди дистанционных методов оценки уровня моря в первую очередь следует выделить спутниковую альтиметрию как основной инструмент исследования изменчивости уровня по всей акватории внутренних морей, а не только у побережья. Спутниковая альтиметрия относится к одному из активных методов дис-

танционного зондирования поверхности Земли с борта космического аппарата. Более подробно ознакомиться с методом спутниковой альтиметрии можно в работах (Радиолокационные методы, 1980; Chelton et al., 2001; Rees, 2001; Remote Sensing..., 2003; Seelye, 2004; Лебедев, Костяной, 2005; Vignudelli et al., 2011).

Развитие спутниковой альтиметрии условно можно разделить на три этапа. Первый этап (с 1974 по 1980 г.) — это спутниковые программы, связанные с исследованием потенциальной возможности использования спутниковой альтиметрии, в первую очередь в геодезии. Все эти эксперименты были направлены на решение задачи изучения средней поверхности Мирового океана, отождествляемой при некоторых предположениях с поверхностью геоида. Это связано с тем, что плотность гравиметрических измерений в Мировом океане меньше по сравнению с измерениями на суше.

Второй этап (с 1985 по 1992 г.) — проведение целенаправленных спутниковых экспериментов для выполнения геодезических программ и исследования возможностей применения спутниковых альтиметрических измерений в других науках о Земле (например, океанологии, гляциологии, гидрологии и т. д.).

Третий этап (с 1993 г. по настоящее время) — проведение постоянного мониторинга водной поверхности Мирового океана, окраинных и внутренних морей.

Параметры орбит и общие характеристики всех спутников, проводящих альтиметрические измерения, приведены в работах (Лебедев, Костяной, 2005; Vignudelli et al., 2011).

Основные программы спутниковой альтиметрии можно условно разделить на два типа. Первые направлены на решение геодезических задач: уточнение формы и высот геоида и гравитационного поля Земли (они получили название геодезических программ), вторые — на осуществление мониторинга изменчивости уровня моря. Круг задач, которые могут решаться в рамках этих программ, достаточно широк — от разных океанологических задач

до исследований глобальных изменений климата. Эти программы получили название изомаршрутных.

Для решения геодезических задач параметры орбиты подбираются таким образом, чтобы плотность покрытия подспутниковыми трассами (треками) Мирового океана была максимальной — в пределах нескольких километров.

Изомаршрутные программы предполагают повторяемость трасс в пределах ± 1 км через определенный период (цикл) времени. Они позволяют реализовать режим повторных измерений по сетке равномерно расположенных на земной поверхности треков. Изомаршрутные программы направлены в первую очередь на решение задач мониторинга пространственно-временной изменчивости высоты морской поверхности или уровня океана. Подспутниковые трассы для разных программ имеют разные расстояния между треками од-

ного типа (восходящими или нисходящими) в зависимости от широты места.

Принципиальная схема измерений, проводимых альтиметром или радиовысотометром, представлена на рис. 11.18, на котором показаны разного рода поверхности, относящиеся к данному методу дистанционного зондирования из космоса. Остановимся на них более подробно.

Поверхность, относительно которой проводятся альтиметрические измерения, называется отсчетным эллипсоидом. Он представляет собой эллипсоид вращения в геоцентрической системе координат. Его определяют следующие параметры: a_e — экваториальный радиус (большая полуось), b_e — полярный радиус (малая полуось) и $f_e = \frac{a_e - b_e}{a_e}$ — коэффициент сжатия. Обычно они соответствуют параметрам земного эллипсоида, определяемого Мировой геодезической системой WGS-84 (Rapp, 1998),

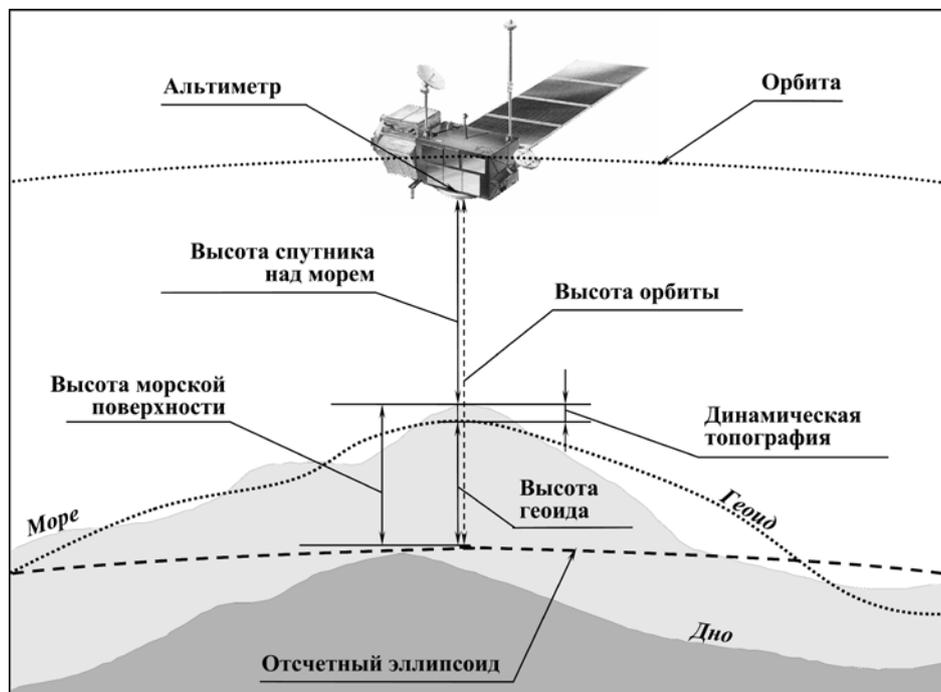


Рис. 11.18. Принципиальная схема альтиметрических измерений и основные поверхности, связанные с ними.

$$a_e = 6378,1363 \text{ км и } f_e = 1/298,257223563.$$

Они рассчитываются таким образом, чтобы масса эллипсоида при условии постоянной плотности распределенного в нем вещества была равна массе Земли, а центры их тяжести совпадали (Медведев, 1980; Пеллинен, 1985).

Высота морской поверхности h_{ssh} относительно отсчетного эллипсоида рассчитывается по высоте спутника над морем h_{alt} , полученной в результате обработки данных спутниковой альтиметрии, и по высоте орбиты h_{orb} самого спутника:

$$h_{ssh} = h_{orb} - h_{alt}.$$

Для более корректного расчета высоты морской поверхности необходимо учитывать ряд поправок dh , связанных с прохождением радиосигнала через атмосферу (электронное и молекулярное рассеяние и поглощение), с инструментальными ошибками, состоянием подстилающей поверхности и др. (Chelton, 1988; Chelton et al., 2001; Лебедев, Костяной, 2005; Vignudelli et al., 2011):

$$h'_{ssh} = h_{orb} - h_{alt} + \sum dh.$$

Для решения многих задач требуется из высоты морской поверхности исключить высоты морских приливов h_{tide} . Для этого используют понятие уровня моря h_{sl} , который определяется соответственно как

$$h_{sl} = h'_{ssh} - h_{tide}.$$

Реальная форма Земли отличается от эллипсоида. Из-за различий температуры и солености, атмосферного давления, наличия течений и т. д. поверхность моря не совпадает строго с поверхностью геоида, а отклоняется приблизительно в пределах одного метра.

Средняя высота морской поверхности (СВМП) h_{mss} рассчитывается путем осреднения спутниковых данных разных альтиметрических программ за длительный промежуток времени. Существует множество моделей средней высоты морской поверхности (Tapley, Kim, 2001). Они отличаются друг от друга исходными данными (т. е. временным интер-

валом осреднения); пространственным разрешением, используемыми моделями приливов и т. д.

Отклонение морской поверхности h'_{ssh} от геоида

$$h_{dyn} = h'_{ssh} - h_{geoid}$$

в силу его определения (невозмущенная поверхность океана) называется динамической топографией. Данное отклонение обусловлено тем, что вода в океанах находится в постоянном движении. Если предположить, что на морскую воду перестали действовать все вынуждающие силы (ветер, приливные силы и т. д.), то со временем океан должен прийти к состоянию равновесия с гравитационным полем Земли, а его поверхность — совпасть с геоидом.

В океанологии аналогом понятия средней топографии океана \bar{h}_{dyn} служит среднеклиматическая или средняя динамическая топография*. Этот термин впервые был введен в динамическом методе (Зубов, Мамаев, 1956).

Помимо высоты морской поверхности h_{ssh} для решения многих задач (Satellite Altimetry..., 2001) используется аномалия высоты морской поверхности h_{ssha} , которая определяется как отклонение от средней высоты морской поверхности h_{mss}

$$h_{ssha} = h_{ssh} - h_{mss},$$

и аномалия уровня h_{sla} , которая определяется соответственно как

$$h_{sla} = h_{ssha} - h_{tide},$$

где h_{tide} — высота морского прилива.

Базы (архивы) альтиметрических данных

Данные альтиметрических измерений независимо от спутников разделяются на несколько типов, а базы данных, в свою очередь, — на не-

* “Средний” применительно к динамической топографии и уровню океана далее понимается как “среднеклиматический”.

сколько способов организации. В зависимости от интервала между временем проведения измерений и временем, когда данные спутниковой альтиметрии становятся доступными для пользователей, различают следующие типы данных: оперативные, промежуточные и окончательные. Скважность поступления информации связана, в первую очередь, с методом расчета высоты орбиты спутника, что влияет на точность ее расчета и, соответственно, точность расчета высоты морской поверхности.

Оперативные данные (Operational Geophysical Data Records — OGDR) формируются через каждые 3—9 ч после поступления информации с борта спутника. Так как время, через которое данные этого типа становятся доступны пользователям, достаточно мало для точного расчета высоты орбиты с применением данных навигационных систем и систем слежения, то в этих данных используется только прогноз высоты орбиты, которой имеет ошибку порядка от 20 см до 1 м. Это ограничивает применение данных этого типа. Отсутствие некоторых поправок, например, поправки на “сухую” атмосферу, в данных этого типа также ограничивает применение OGDR-данных для анализа пространственно-временной изменчивости высоты морской поверхности.

В течение последующих 1—2 недель высота орбиты уточняется с помощью бортовой навигационной аппаратуры, а также с учетом радиальной составляющей ошибки, рассчитываемой по точкам пересечения (уравнивание высот орбит). Орбитальная ошибка на этом этапе обработки спутниковой информации не превышает 10 см. На этом этапе формируются промежуточные данные (Interim Geophysical Data Records — IGDR). Ошибка расчета высоты орбиты в этом случае значительно ниже, что уже позволяет уверенно использовать IGDR-данные для исследований изменчивости уровня морей.

После уточнения высоты орбиты по данным наземных навигационных систем (лазерные станции слежения) и данным GPS точность

расчета орбиты повышается до 2,5 см (для спутников “TOPEX/Poseidon” и “Jason-1/2”). Таким образом, на основании этих расчетов формируется окончательный вариант данных (Geophysical Data Records — GDR). Это повышает точность расчета высоты морской поверхности и позволяет использовать спутниковую альтиметрию для решения не только океанологических, но и геодезических задач. К сожалению, GDR-данные формируются примерно через 1—2 месяца после окончания цикла изомаршрутной программы спутника, поэтому их использование в оперативном режиме невозможно.

Все базы данных спутниковой альтиметрии организуются в виде набора данных о высоте морской поверхности или аномалиях уровня моря вдоль трека. Они различаются между собой форматом записи (числом параметров, включенных в базу) и принципом формирования файловой системы.

Большинство баз данных спутниковой альтиметрии имеют одинаковую структуру. Всю информацию в них условно можно разбить на следующие группы, которые содержат

- пространственно-временное положение спутника (геоцентрические координаты и ошибки их определения, время проведения измерений, результаты расчета высоты орбиты спутника относительно отсчетного эллипсоида);

- высоту спутника над подстилающей поверхностью, полученную в результате обработки времени возврата зондирующего импульса, или высоту поверхности моря относительно отсчетного эллипсоида;

- поправки, влияющие на время возврата зондирующего импульса (поправка на состояние подстилающей поверхности, поправка на влияние окружающей среды: ионосферная поправка, поправка на влажность, “сухая” тропосферная поправка);

- результаты анализа формы отраженного импульса (значимая высота ветровых волн, коэффициент обратного рассеяния, модуль скорости приводного ветра), что существенно

расширяет круг применения спутниковой альтиметрии в научных и прикладных исследованиях;

— дополнительную геофизическую информацию (поправку обратного барометра, высоту геоида и средней морской поверхности, высоту приливов (морского, солнечного, твердой Земли и полюсного), данные батиметрии), необходимую для решения геофизических задач разных классов.

Часть информации получается в результате обработки исходных данных, полученных с борта спутника, другая — как результат модельных расчетов. При этом база данных может содержать несколько вариантов расчета поправок.

По данному принципу организуются все базы OGDR-, IGDR-, GDR-данных. Более подробный перечень параметров и структура записи для каждой базы данных спутниковой альтиметрии представлены в соответствующих руководствах для пользователей. Более подробно с существующими базами данных спутниковой альтиметрии можно познакомиться в работах (Лебедев, Костяной, 2005; Vignudelli et al., 2011).

Особенно следует выделить Интегрированную базу данных спутниковой альтиметрии Каспийского моря (ИБДСА — “Каспий”), которая создана совместно специалистами Геофизического центра РАН и Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН и внесена в Государственный регистр баз данных за № 0220611211 (свидетельство № 10505 от 14 июля 2006 г.).

Методы обработки данных

С 1992 г. по настоящее время регулярные альтиметрические измерения выполняются спутниками “ТОРЕХ/Poseidon”, “GFO-1”, “Jason-1/2” и “Envisat”. Для анализа межгодовой и сезонной изменчивости уровня Каспийского и Черного морей лучше использовать данные спутников “ТОРЕХ/Poseidon” и

“Jason-1/2” (Лебедев, Костяной, 2005; Kouraev et al., 2011). Этот выбор обусловлен следующими причинами.

Точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для этой программы составляет 1,7 см (Fu, Pihos, 1994), а точность расчета самой высоты моря относительно отсчетного эллипсоида для открытого океана — 4,2 см. Это — наилучший показатель по сравнению с другими программами альтиметрических измерений (Chelton et al., 2001). Расположение восходящих и нисходящих треков (внутри каждого 10-суточного цикла) по акватории Каспийского, Черного и Азовского морей оптимально, что позволяет анализировать изменчивость уровня вдоль треков с пространственным разрешением 5—6 км. Временной масштаб повторения измерений вдоль трека — 9,916 сут (т. е. примерно три раза в месяц или шесть раз в месяц в точках пересечения треков) — оптимален для исследования синоптической и сезонной изменчивости уровня морей.

Данные “ТОРЕХ/Poseidon” представляют собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд измерений (с сентября 1992 г. по август 2002 г.). Есть возможность его продления данными спутников “Jason-1” (с января 2002 г. по февраль 2009 г.) и “Jason-2” (с июля 2008 г. по настоящее время), расположение треков которых полностью совпадает с расположением треков спутников “ТОРЕХ/Poseidon” и “Jason-1” до совершения ими маневра коррекции орбиты 19 августа 2002 г. и 2 февраля 2009 г. соответственно.

Примеры результатов альтиметрических измерений уровня, скорости ветра и высоты волн для Каспийского моря

На рис. 11.19—11.21 представлены результаты альтиметрических измерений уровня, скорости ветра и высоты волн для Каспийского моря за период 1993—2009 гг.

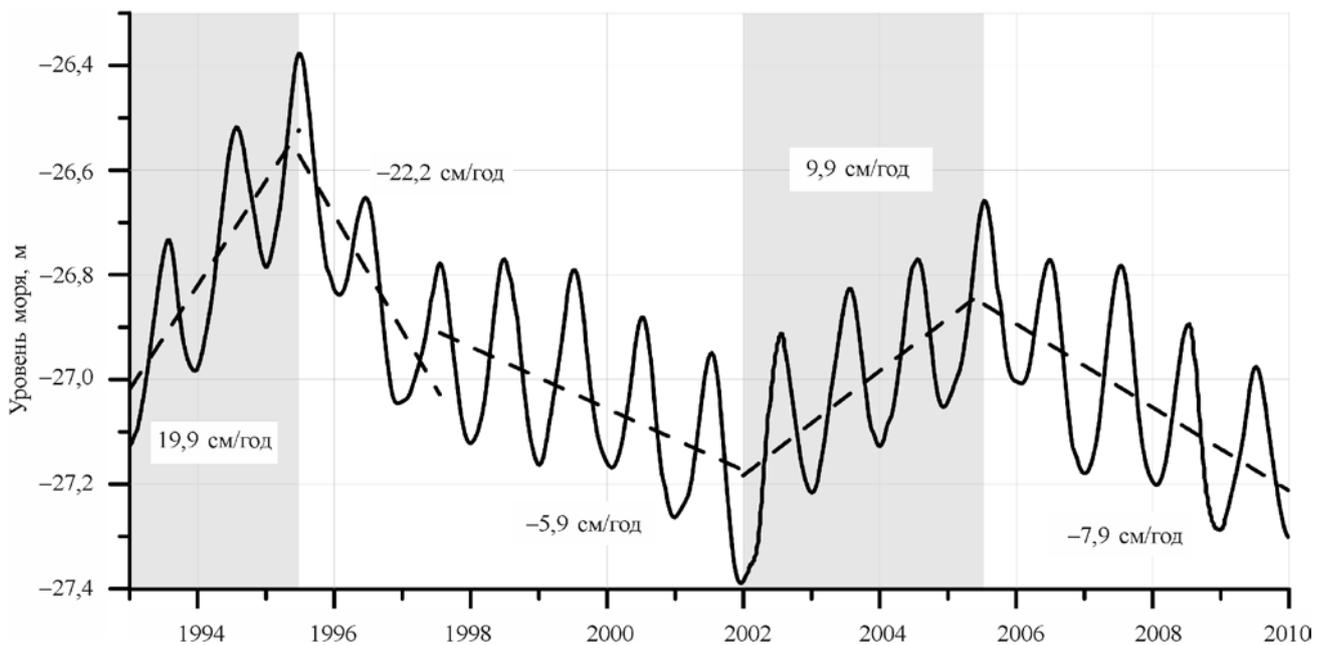


Рис. 11.19. Сезонная и межгодовая изменчивость уровня (м БС) Каспийского моря, оцененного по альтиметрическим данным за 1993—2009 гг. Отрезками показаны линии тренда уровня моря за отдельные периоды времени.

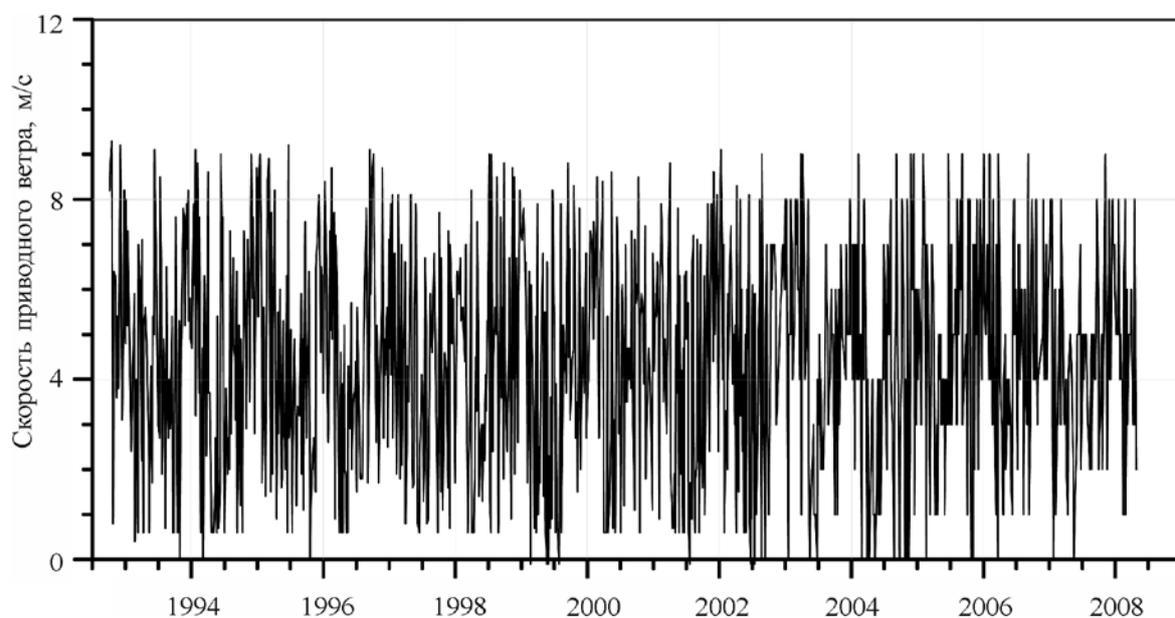


Рис. 11.20. Сезонная и межгодовая изменчивость скорости ветра в юго-восточной части Каспийского моря в 1993—2009 гг., оцененной по альтиметрическим данным.

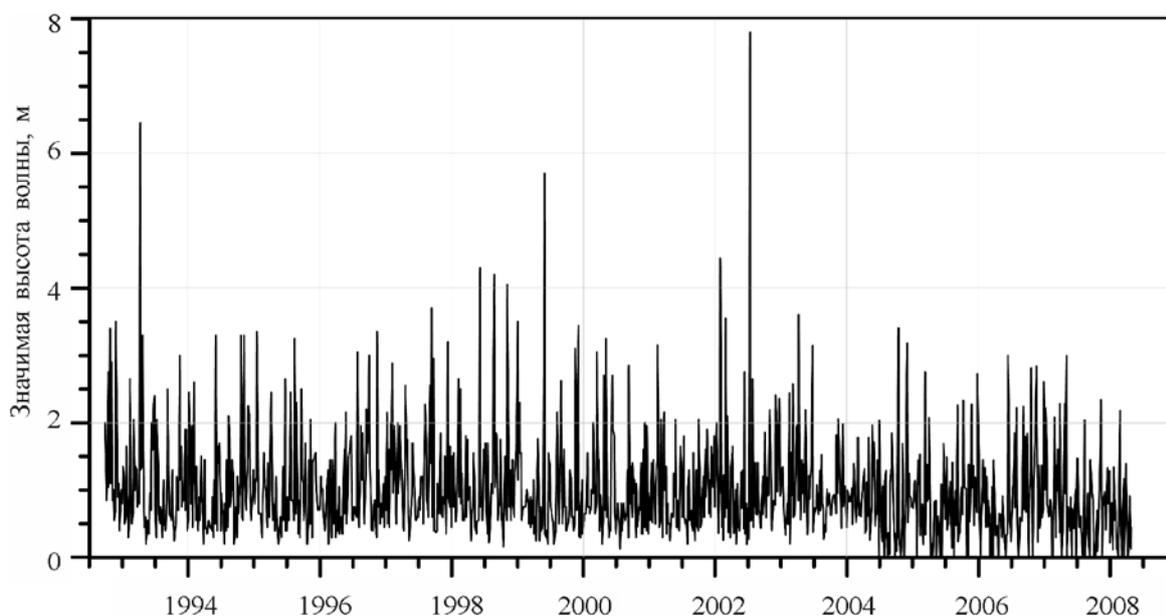


Рис. 11.21. Сезонная и межгодовая изменчивость высоты волн в юго-восточной части Каспийского моря в 1993—2009 гг., оцененная по альтиметрическим данным.

ПОСЛЕДСТВИЯ ВОЗМОЖНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ ДЛЯ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ И СЕКТОРОВ ЭКОНОМИКИ

Подъем уровня Мирового океана может нанести заметный экологический и социально-экономический ущерб России. Наиболее уязвимы дельты рек, впадающих в моря, связанные с океаном. Часть этих дельт имеет высокую плотность населения. Прежде всего, это дельта р. Нева с г. Санкт-Петербург. Строительство дамбы, к сожалению, не решает проблемы защиты этого города от затопления в XXI в. при ожидаемом подъеме уровня Мирового океана (Васильев и др., 2002).

Из других дельт и устьев рек, которым угрожает подъем уровня океана, следует указать дельты Северной Двины, Печоры, Дона, Кубани, устья Преголя, Амура, Охоты и Кухтуя, Анадыря, Камчатки. В число затопляемых природных объектов могут войти крупнейшие

устья рек и значительные прибрежные низменности арктического побережья. Эти объекты могут пострадать от затопления морскими водами и интенсивной волновой и нагонно-приливной эрозии.

Усиление проникновения осолоненных морских вод при подъеме уровня Мирового океана угрожает водоснабжению г. Архангельск, источником которого являются речные воды в дельте Северной Двины. При современных условиях нормальное водоснабжение здесь довольно часто нарушается из-за периодически повторяющихся интрузий морских вод в устье реки. По мере подъема уровня Мирового океана частота возникновения таких опасных ситуаций будет увеличиваться.

Рассмотрим более подробно влияние подъема уровня Мирового океана на наиболее уязвимые южные пограничные моря России. Выше было сказано, что ожидаемый подъем уровня Мирового океана к концу XXI в., согласно Четвертому оценочному докладу МГЭИК (Fourth Assessment Report..., 2007), может со-

ставить 0,20—0,50 м и более до 1 м. Прогноз изменения среднегодового уровня Черного и Азовского морей, выполненный по их тренду за последние 18 лет, дает подъем среднегодового уровня в конце XXI в. около 0,5 м.

Увеличение среднего уровня Азовского моря на 0,5—1 м с учетом стонно-нагонных колебаний приведет к дальнейшему сильному размыву его побережья (рис. 11.22). Под серьезной угрозой затопления будут находиться расположенные в этих зонах города Темрюк, Приморско-Ахтарск, Ейск, а также Мариуполь и Таганрог. Возможен размыв дельты р. Дон с полным разрушением существующих здесь экосистем.

В дельте р. Кубань на подъем уровня океана на 0,5—1 м наложится тектоническое погружение побережья, что может привести к затоплению до 900 км² плавней и прилегающих низменных террас и образованию здесь обширного морского залива (Селиванов, 2001). Будут полностью или в значительной степени размывы косы Тузла, Маркитанская и Рубанова, значительно разрушена коса Чушка. В Бейсугском и Ейском лиманах береговая линия может отступить на 7—10 км. Темпы отступления уступов размыва у г. Приморско-Ахтарск могут составить 4,5—5,5 м/год. Площадь затопления

в дельте р. Дон может достигнуть 200 км². На севере моря также следует ожидать отступления берега, ныне защищенного от волнения грядой кос. Повышение уровня моря приведет также к увеличению потока соленой черноморской воды через Керченский пролив, к разрушению Арабатской Стрелки, в результате чего увеличится соленость, что отрицательно отразится на рыбопродуктивности Азовского моря.

Влияние возможного климатического изменения уровня Каспийского моря на его северную часть показано на рис. 11.23, где приводятся области затопления берега в районе дельты р. Волга при разных отметках уровня моря (Устьевая область Волги..., 1998). С подъемом уровня Каспия до отметки –26,0 м ГВО могут быть разрушены или окажутся под водой многие прибрежные населенные пункты, социальные и производственные объекты в России и других прикаспийских странах.

Для защиты этих объектов потребуются провести комплекс специальных инженерных работ. Степень влияния подъема уровня моря на побережье Северного Каспия увеличивается с севера на юг по мере удаления от аванделты р. Волга. Малые уклоны прибрежной равнины Калмыкии способствуют глубокому

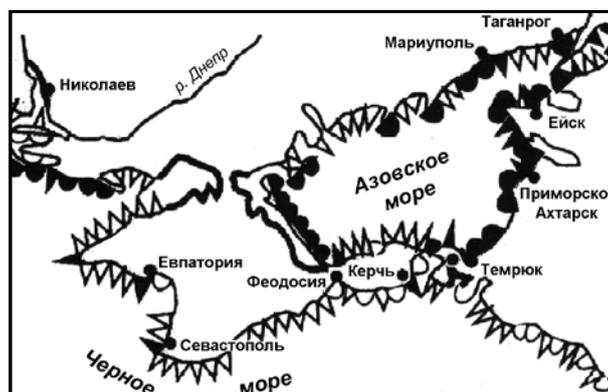


Рис. 11.22. Изменение берегов Северного Причерноморья в условиях повышения уровня моря (Каплин, Селиванов, 1999). Полукруги у берегов здесь означают размыв аккумулятивных берегов, треугольники — размыв и отступление береговых уступов (черные указывают на сильный размыв).

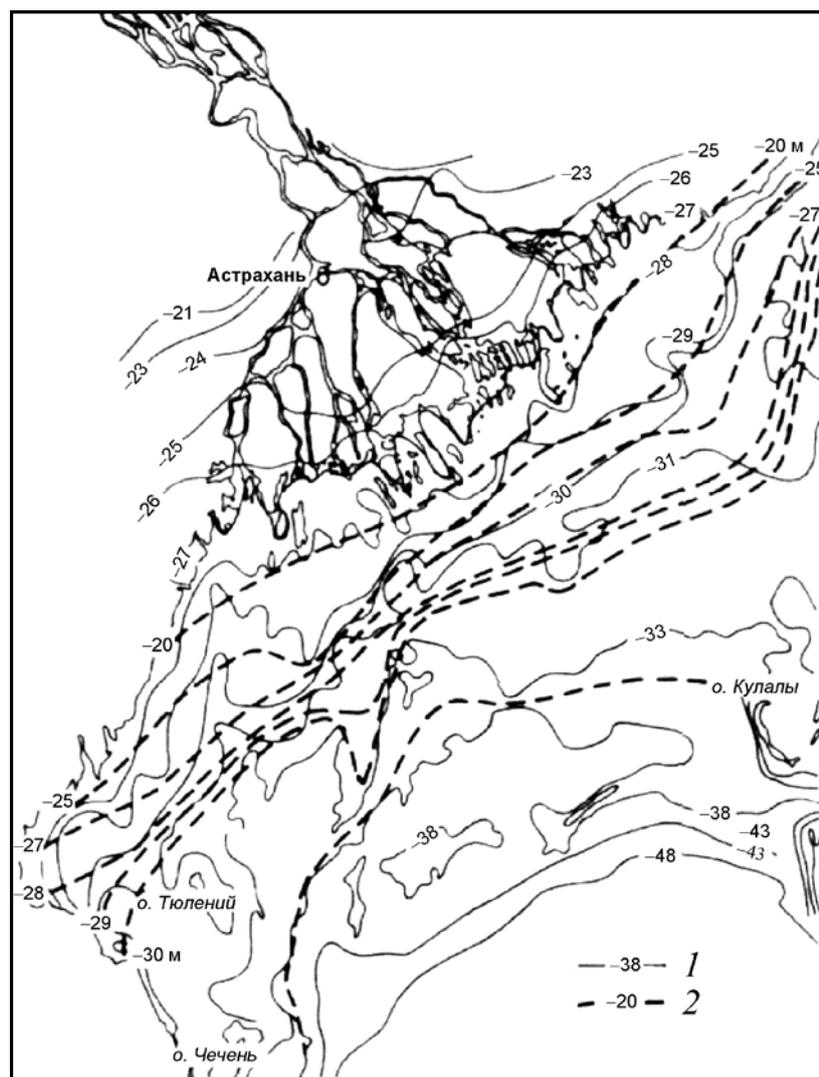


Рис. 11.23. Изогипсы и границы зон транзита волжских вод при разных среднегодовых уровнях Каспия: 1 — изогипсы, 2 — границы зон транзита вод.

проникновению морских вод, особенно во время ветровых нагонов.

Если уровень Каспия достигнет отметки $-26,0$ м ГВО, практически на всем побережье резко интенсифицируются абразионные процессы и начнется размыв голоценовых и более древних аккумулятивных образований. Трансгрессивные изменения в южной части Калмыкии захватят в этом случае зону шириной до 30 км (Лукьянова и др., 1996).

Учитывая современные тенденции климатического изменения уровня морей России, необ-

ходимо предусмотреть комплекс мероприятий по предотвращению негативных последствий этого процесса для морских побережий.

В недавнем прошлом резкий подъем уровня Каспийского моря 1978—1995 гг. привел к затоплению 320 тыс. га ценных земель, повышению уровня грунтовых вод, подтоплению и засолению почв, разрушению жилого фонда (Лаганский район Калмыкии), железных и автомобильных дорог, линий электропередач и телефонной связи, нарушению работы газопроводов, загрязнению морских вод в резуль-

тате затопления нефтяных месторождений. Только в Дагестане 260 тыс. человек оказались в зоне затопления. Экономический ущерб России из-за подъема уровня моря по разным оценкам тогда составил 0,5—1 млрд. долларов США. Суммарный совокупный прямой ущерб для прикаспийских стран, по данным ВМО, к 1995 г. составил около 15 млрд. долларов США.

ЛИТЕРАТУРА

- Абузьяров З. К., 2003.** Технология прогноза тенденций изменения уровня Каспийского моря на перспективу 6 и 18 лет, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеоиздат, с. 351—363.
- Багрова Л. А., Боков В. А., Багров Н. В., 2001.** География Крыма, Киев, Лыбидь, 304 с.
- Белоненко Т. В., Колдунов В. В., Старицын Д. К., Фукс В. Р., Шилов И. О., 2009.** Изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана, СПб, СММО Пресс, 308 с.
- Боровская Р. В., Ломакин П. Д., Панов Б. Н., Спиридонова Е. О., 2008.** Современное состояние ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе на базе спутниковой информации, Севастополь, Препринт МГИ, 42 с.
- Васильев А. С., Лапшин В. Б., Лупачев Ю. В., Медведев П. П., Победоносцев С. В., 2002.** Исследование уровня Каспийского моря по спутниковым альтиметрическим измерениям, Труды ГОИН, Исследования океанов и морей, вып. 208, с. 277—292.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР (проект “Моря СССР”), 1991а.** Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Под ред. А. И. Симонова, Е. Н. Альтмана, СПб, Гидрометеоиздат, 430 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР (проект “Моря СССР”), 1991б.** Т. V. Азовское море. Под ред. Н. П. Гоптерева, Л., Гидрометеоиздат, 237 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей (проект “Моря”), 1992.** Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Под ред. Ф. С. Терзиева, А. Н. Косарева, А. А. Керимова, СПб, Гидрометеоиздат, 359 с.
- Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Шеремет Н. А., 2011.** Черное и Азовское моря: Сравнительный анализ изменчивости температуры поверхностных вод (1982—2009 гг., спутниковая информация), в кн.: Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, т. 8, № 4, с. 209—218.
- Горячкин Ю. Н., 2008.** Современные вертикальные движения земной коры на побережье Черного моря, Геология и полезные ископаемые Мирового океана, № 3, с. 85—89.
- Горячкин Ю. Л., Иванов В. А., Репетин Л. Н., Хмара Т. В., 2002.** Сейши в Севастопольской бухте, Труды УкрНИГМИ, вып. 250, с. 342—353.
- Горячкин Ю. Н., Иванов В. А., 2006.** Уровень Черного моря: прошлое, настоящее и будущее, Севастополь, НАН Украины, Морской гидрофизический институт, 210 с.
- Захаров В. С., 2006.** Современные вертикальные движения земной коры, в кн.: Современные глобальные изменения природной среды, М., Научный мир, т. 1, с. 626—643.
- Зубов Н. Н., Мамаев О. И., 1956.** Динамический метод вычисления элементов морских течений, Л., Гидрометеоиздат, 115 с.
- Израэль Ю. А., 1979.** Экология и контроль состояния природной среды, Л., Гидрометеоиздат, 375 с.
- Ильин Ю. М., Репетин Л. Н., 2002.** Система морских наблюдений гидрометслужбы Украины на пути интеграции в “Black Sea GOOS”, в сб.: Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа, сборник научных трудов, вып. 2(7) (Глобальная океаническая наблюдательная система Черного моря: контактные измерения. Вклад Украины в Black Sea GOOS), отв. ред. Г. К. Коротаев, А. И. Кубряков, Севастополь, НАН Украины, МГИ, ОФ ИнБЮМ, с. 18—30.
- Каплин П. А., Селиванов А. О., 1999.** Изменение уровня морей и развитие берегов (прошлое, настоящее и будущее), М., ГЕОС, 300 с.
- Карта современных вертикальных движений земной коры Восточной Европы, 1971.** 1 : 10 000 000, М., ГУГК при СМ СССР, 18 с.
- Каталог наблюдений над уровнем на Черном и Азовском морях, 1990.** Севастополь, Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, Государственный океанографический институт, Севастопольское отделение, 268 с.
- Каталог уровенных наблюдений гидрометеорологических станций и постов, расположенных на Каспийском море, 1964.** М., Гидрометеоиздат, 132 с.

- Каталог уровенных наблюдений на Черном и Азовском морях, 1965.** Л., Гидрометеиздат, 227 с.
- Китайгородский С. А., 1995.** Введение в физическую океанографию (или пять открытий Харальда Свердрупа), М., Издат. центр “Метеорология и гидрология”, 301 с.
- Лаврова О. Ю., Костяной А. Г., Лебедев С. А., Митягина М. И., Гинзбург А. И., Шерemet Н. А., 2011.** Комплексный спутниковый мониторинг морей России, М., ИКИ РАН, 470 с.
- Лебедев С. А., Костяной А. Г., 2005.** Спутниковая альтиметрия Каспийского моря, М., Издательский центр МОРЕ Международного института океана, 366 с.
- Лилиенберг Д. А., Сетунская Л. Е., Благоволин Н. С. и др., 1972.** Морфоструктурный анализ современных вертикальных движений Европейской части СССР, Геоморфология, № 1, с. 1—18.
- Лукьянова С. А., Никифоров Л. Г., Рычагов Г. И., 1996.** Голоценовые морские аккумулятивные формы северо-западного побережья Каспийского моря, Вестник МГУ, серия География, № 2.
- Медведев П. П. 1980.** Исследование гравитационного поля и фигуры Земли новыми методами космической геодезии. Итоги науки и техники. Серия Геодезия и аэросъемка, т. 17, М., ВИНТИ, 100 с.
- Мещерская А. В., Голод М. П., 2003.** О статистических долгосрочных прогнозах уровня Каспийского моря с использованием крупномасштабных климатических параметров, в кн.: Гидрометеорологические аспекты проблемы Каспийского моря и его бассейна, СПб, Гидрометеиздат, с. 278—294.
- Нелепо Б. А., Терехин Ю. В., Коснырев В. К., Хмыров Б. Е., 1983.** Спутниковая гидрофизика, М., Наука, 254 с.
- Основные гидрометеорологические сведения о морях СССР, 1940.** Т. 2, Каспийское море, вып. 1 (водный кадастр), Л., Гидрометеиздат, 320 с.
- Остроумов В. З., Остроумов Л. В., 2007.** Разработка системы геодезического обеспечения высот морской прибрежной наблюдательной уровенной сети России на основе применения глобальной навигационной спутниковой аппаратуры GPS/ГЛОНАСС, Труды ГОИН, Исследования океанов и морей, вып. 210, с. 182—194.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2008а.** Т. I. Изменения климата, М., Росгидромет, 227 с.
- Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, 2008б.** Т. II. Последствия изменений климата, М., Росгидромет, 288 с.
- Пеллинен Л. П., 1985.** Высшая геодезия, М., Недра, 128 с.
- Победоносцев С. В., 1972.** Современные вертикальные движения побережий морей, омывающих Европейскую территорию СССР, Океанология, т. 12, № 4, с. 741—745.
- Победоносцев С. В., Абузьяров З. К., Копейкина Т. Н., 2004.** О качестве наблюдений за уровнем Каспийского моря, Труды Гидрометцентра России. Морские и речные гидрологические расчеты и прогнозы, вып. 339, с. 22—31.
- Радиолокационные методы исследования Земли, 1980.** Под ред. Ю. А. Мельника, М., Советское радио, 262 с.
- Рева Ю. А., 1997.** Межгодовые колебания уровня Черного моря, Океанология, т. 37, № 2, с. 211—219.
- Селиванов А. О., 2001.** Береговая катастрофа на Азовском море. Миф или реальная угроза?, М., ГЕОС, 83 с.
- Устьевая область Волги: гидролого-морфологические процессы, режим загрязняющих веществ и влияние колебаний уровня Каспийского моря, 1998.** М., ГЕОС, 279 с.
- Филиппов Ю. Г., 2009.** Изменчивость уровня Азовского моря на современном этапе, Труды ГОИН, Исследования океанов и морей, вып. 212, с. 107—115.
- Фукс В. Р., 2005.** Уровень Мирового океана как индикатор глобального потепления, в сб.: География и современность, СПб, Изд-во СПбГУ, вып. 10, с. 73—93.
- Ando K., Matsumoto T., Nagahama T., Ueki I., Takatsuki Y., and Kuroda Y., 2005.** Drift characteristics of a moored conductivity-temperature-depth sensor and correction of salinity data, J. Atmos. and Oceanic Techniques, vol. 22, No. 4, pp. 282—291, doi: 10.1175/JTECH1696.1.
- Antonov J., Levitus S., and Boyer T. P., 2005.** Thermosteric sea level rise, 1955—2003, Geophys. Res. Lett., vol. 32, L12602, doi: 10.1029/2005GL023112.
- Boyer T. P., Antonov J. I., Garcia H. E., Johnson D. R., Locarnini R. A., Mishonov A. V., Pitcher M. T., Baranova O. K., and Smolyar I. V., 2006.** World Ocean Database 2005, S. Levitus

- (ed.), Washington, D. C., U. S. Government Printing Office, 190 p. (NOAA Atlas NESDIS 60).
- Cazenave A., Bonnefond P., Mercier F., Dominh K., and Toumazou V., 2002.** Sea level variations in the Mediterranean Sea and Black Sea from satellite altimetry and tide gauges, *Global and Planetary Change*, vol. 34, No. 1, pp. 59–86(28), doi: 10.1016/S0921-8181(02)00106-6.
- Chambers D. P., 2006.** Observing seasonal steric sea level variations with GRACE and satellite altimetry, *J. Geophys. Res.*, vol. 111, C03010, doi: 10.1029/2005JC002914.
- Chelton D. B., 1988.** WOCE/NASA Altimeter Algorithm Workshop. U.S. WOCE Technical Report No. 2, U.S. Planning Office for WOCE, College Station, 70 p.
- Chelton D. B., Ries J. C., Haines B. J., Fu L.-L., and Callahan P. S., 2001.** Satellite altimetry, in: *Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications*. L.-L. Fu and A. Cazenave (eds.), Academic Press, pp. 1–131.
- CLIVAR Scientific Steering Group, 1998.** CLIVAR Initial Implementation Plan, World Climate Research Program, 313 p.
- Davis R. E., Sherman J. T., and Dufour J., 2001.** Profiling ALACEs and other advances in autonomous subsurface floats, *J. Atmos. and Oceanic Technology*, vol. 18, No. 2, pp. 982–993, doi: 10.1175/1520-0426(2001)018<0591:FAEAO>2.0.CO;2.
- Davis R. E., Webb D. C., Reiger L. A., and Dufour J., 1992.** The Autonomous Lagrangian Circulation Explorer (ALACE), *J. Atmos. and Oceanic Technology*, vol. 9, No. 3, pp. 264–285, doi: 10.1175/1520-0426(1992)009<0264:TALCE>2.0.CO;2.
- Delcroix T. and Picaut J., 1998.** Zonal displacements of the western equatorial Pacific fresh pool, *J. Geophys. Res.*, vol. 103, pp. 1087–1098.
- Delcroix T., McPhaden M., Dessier A., and Gouriou Y., 2005.** Time and space scales for sea surface salinity in the tropical oceans, *Deep Sea Res.*, vol. 52, No. 5, pp. 787–813, doi: 10.1016/j.dsr.2004.11.012.
- Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, 2007.** M. Parry, O. Canziani, J. Paluticof, et al. (eds.), Cambridge University Press, 976 p.
- Fu L.-L. and Pihos G., 1994.** Determining the response of sea level to atmospheric pressure forcing using TOPEX/Poseidon data, *J. Geophys. Res.*, vol. 99, No. C12, pp. 24633–24642.
- Garcia D., Ramillien G., Lombard A., and Cazenave A., 2007.** Steric sea-level variations inferred from combined Topex/Poseidon altimetry and GRACE gravimetry, *Pure Appl. Geophys.*, vol. 164, No. 4, pp. 721–731, doi: 10.1007/s00024-007-0182-y.
- Henin C. and Grelet J., 1996.** A merchant ship thermo-salinograph network in the Pacific Ocean, *Deep-Sea Res.*, vol. 43, No. 11, pp. 1833–1855, doi: 10.1016/S0967-0637(96)00084-2.
- IOC, 2006.** Manual on Sea-level Measurements and Interpretation, vol. IV: An Update to 2006. Paris, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. IOC Manuals and Guides, No. 14, vol. IV, JCOMM Technical Report No. 31, WMO/TD No. 1339, 78 p.
- Ishii M., Kimoto M., Sakamoto K., and Iwasaki S. I., 2006.** Steric sea level changes estimated from historical ocean subsurface temperature and salinity analyses, *J. Oceanogr.*, vol. 62, No. 2, pp. 55–70, doi: 10.1007/s10872-006-004-y.
- Johnson G. C., 1995.** Revised XCTD fall-rate equation coefficients from CTD data, *J. Atmos. and Oceanic Technology*, vol. 12, No. 6, pp. 1367–1373.
- Kouraev A. V., Crétaux J.-F., Lebedev S. A., Kostianoy A. G., Ginzburg A. I., et al., 2011.** Satellite altimetry applications in the Caspian Sea, in: *Costal Altimetry*, S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, and J. Benveniste (eds.), Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 331–366.
- Lawson K. and Larson N. G., 2001.** CTD, in: *Encyclopedia of Ocean Sciences*, J. H. Steele, K. K. Turekian, and S. A. Thorpe (eds.), Academic Press, pp. 579–588, doi: 10.1006/rwos.0324.
- Levitus S., 1982.** *Climatological Atlas of the World Ocean*, Wash., DC, NOAA Prof. Paper No. 13, U. S., Gov. Printing Office, 173 p.
- Mizuno K. and Watanabe T., 1998.** Preliminary results of in situ XCTD/CTD comparison test, *J. Oceanogr.*, vol. 54, No. 4, pp. 373–380.
- Observing the Oceans in the 21st Century, 2001.** C. J. Koblinsky and N. R. Smith (eds.). Melbourne, Australia, GODAE Project Office and Bureau of Meteorology, 604 p.
- Pankajakshan T., Reddy G. V., Ratnakaran L., Sarupria J. S., and Babu V. R., 2003.** Temperature error in digital bathythermograph data, *Ind. J. Mar. Sci.*, vol. 32, No. 3, pp. 234–236.
- Prien R. D., 2001.** Electrical properties of sea water, in: *Encyclopedia of Ocean Sciences*, J. H. Steele, K. K. Turekian, and S. A. Thorpe (eds.), Academic Press, pp. 832–839, doi: 10.1006/rwos.2001.0328.
- Rapp R. H., 1998.** Past and future developments in geopotential modelling, in: *Geodesy on the*

- Move, Gravity, Geoid, Geodynamics and Antarctica, R. Forsberg, M. Feissel, and R. Dietrich (eds.), IAG Symposia, vol. 119, Berlin, Springer, pp. 58–78.
- Rees W. G., 2001.** Physical Principles of Remote Sensing. 2nd Edition, Cambridge University Press, 372 p.
- Remote Sensing Using Microwaves, 2003.** J. Askne (ed.), Goteborg, Sweden, Chalmers University of Technology, Department of Radio and Space Science, 253 p.
- Satellite Altimetry and Earth Sciences, 2001.** A Handbook of Techniques and Applications. L.-L. Fu and A. Cazenave (eds.), Academic Press, 463 p.
- Seelye M., 2004.** An Introduction to Ocean Remote Sensing, Cambridge University Press, 454 p.
- Stewart R. H., 1985.** Methods of Satellite Oceanography, Berkeley, University of California Press, 360 p.
- Stewart R. H., 2006.** Introduction to Physical Oceanography, Department of Oceanography Texas A&M University, 352 p.
- Tapley B. D. and Kim M.-C., 2001.** Applications to geodesy, in: Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications, L.-L. Fu and A. Cazenave (eds.), San Diego, Academic Press, pp. 371–406.
- Trifonova E. and Demireva D., 2003.** An investigation of sea level fluctuations in Varna and Bourgas, Трудове на Института по океанология Българска академия на науките, т. 4, Варна, pp. 3–8.
- Tsimplis M. N. and Spencer N. E., 1997.** Collection and analysis of monthly mean sea level data in the Mediterranean Sea and the Black Sea, J. Coast. Res., vol. 13, No. 2, pp. 534–544.
- Vignudelli S., Kostianoy A. G., Cipollini P., and Benveniste J. (eds.), 2011.** Coastal Altimetry, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 578 p., doi: 10.1007/978-3-642-12796-0.
- Wallace W. J., 1974.** The Development of the Chlorinity/Salinity Concept in Oceanography, Elsevier Oceanography Series, vol. 7, New York, Elsevier, 227 p.
- Worley S. J., Woodruff S. D., Reynolds R. W., Lubker S. J., and Lott N., 2005.** ICOADS release 2.1 data and products, Int. J. Climatology, vol. 25, No. 7, pp. 823–842, doi: 10.1002/joc.1166.