

УДК 551.465

В.А. Иванов, А.И. Кубряков, С.П. Любарцева,
Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро

Моделирование гидрофизических процессов в морских прибрежных регионах

В статье обобщаются результаты исследований авторов в области моделирования гидрофизических и экологических процессов в прибрежных регионах различных морей и некоторых замкнутых водоемах. Кратко анализируются разработанные и используемые для расчетов математические модели, а также полученные в ходе численных экспериментов результаты.

1. Введение. Прогресс океанологии на современном этапе обусловлен, наряду с разработкой и созданием новых средств и методов наблюдений, развитием численного моделирования. Поскольку любой эксперимент требует воспроизводимости и, желательно, управляемости, что в натурных исследованиях практически невозможно, преимущества численных экспериментов, дающих возможность имитации процессов, которые нельзя непосредственно наблюдать, становятся очевидными.

Логика развития науки, а также насущные потребности человека объективно обусловили увеличение концентрации усилий научного сообщества на исследованиях динамики вод в прибрежных и шельфовых зонах океанов и морей. Морской шельф занимает примерно 7% акватории Мирового океана, но более половины человечества постоянно живет в пределах узкой, шириной около 200 км, прибрежной полосы. Следствием этого является интенсивная антропогенная нагрузка на прибрежные акватории, стремительно возрастающая в последние десятилетия. Это, в свою очередь, вызывает негативные изменения морских экосистем с беспрецедентной скоростью. Антропогенное воздействие, как следствие экстенсивного, неуправляемого и технологически ущербного развития производственной и сельскохозяйственной инфраструктуры прибрежных территорий, проявляется в привнесении новых видов, количественных и качественных нарушениях циклов обращения питательных веществ, катастрофически изменяющих естественно сложившийся баланс. Перспективы промышленной эксплуатации шельфа моря, и в частности его использования для добычи и транспортировки нефти и газа, с неизбежностью приводят к возрастанию вероятности крупных катастроф с нанесением непоправимого ущерба рекреационным и биологическим ресурсам моря.

В настоящей работе обобщаются результаты исследований, которые проводились авторами применительно к прибрежным регионам различных морей методами математического моделирования с помощью целенаправленных численных экспериментов.

© В.А. Иванов, А.И. Кубряков, С.П. Любарцева, Э.Н. Михайлова, Н.Б. Шапиро, 2004

2. Модели. Основной целью работы авторов являлась разработка междисциплинарных математических моделей, представляющих собой синтез гидродинамической модели, модели переноса загрязняющих примесей и химико-биологической модели, описывающих структуру и изменчивость гидрофизических полей, а также трансформацию основных компонент морской экосистемы.

Гидродинамический блок в таких моделях составляет основную часть, и модели, лежащие в его основе, должны учитывать специфические особенности прибрежных морских зон. Среди них можно отметить: относительно малые глубины, большую неравномерность рельефа дна, речной сток. Эти особенности приводят к изменению роли и значения различных физических процессов по сравнению с открытыми областями глубоководного океана. В частности, придонное трение, которое в открытом океане играет незначительную роль, становится здесь существенным. Ветровые течения испытывают сильное влияние берега — в одних районах это приводит к возникновению апвеллинга, в других — штормовых нагонов. Речной сток служит причиной распреснения морской воды и, как следствие, уменьшения ее плотности. Кроме того, прибрежные области испытывают большие вариации температуры и являются областями с относительно большими градиентами солености, температуры и плотности. Не следует забывать, что прибрежную область нельзя рассматривать вне ее связи с открытыми прилегающими областями моря. Интенсивные течения, проходящие над континентальным склоном, также оказывают большое влияние на прибрежные воды.

Сложность и разнообразие процессов в прибрежной зоне вызывают необходимость разработки и применения при их исследовании разных моделей, поскольку ни одна модель не в состоянии абсолютно точно и полно воспроизвести природное явление или объект, а может лишь с той или иной степенью приближения описать их. При изучении динамики вод в прибрежной зоне в основном использовались модифицированные конечно-разностные численные модели, разработанные авторами ранее для моделирования циркуляции вод в открытом океане. Для учета особенностей циркуляции в шельфовых районах сделан акцент на решении следующих проблем: более точный учет влияния рельефа дна, улучшение параметризации процессов обмена, корректное описание речного стока, правильный учет верхнего перемешанного слоя — слоя первичной биологической активности, более точное описание условий на открытых границах исследуемых акваторий.

Первая модель — многоуровневая [1], основанная на полной системе уравнений термогидродинамики океана в приближениях Буссинеска, гидростатики и несжимаемости. Исходная система дифференциальных уравнений в прямоугольной декартовой системе координат аппроксимируется конечно-разностными аналогами на сдвинутых сетках как по горизонтали (сетка *B*), так и по вертикали на основе консервативной схемы с дозированной схемой вязкостью, обладающей свойством транспортности. Схема двухслойная по времени, неявная при вычислении вертикальных диффузии, вязкости и адвекции, придонного трения и ускорения Кориолиса. Коэффициент вертикального обмена количеством движения задается не

меняющимся по вертикали, но пропорциональным глубине моря на шельфе. Особенностью используемой модели является более точный учет рельефа дна: он аппроксимируется не стандартными горизонтами, а максимально приближен к реальному (с точностью до данных наблюдений и пространственной дискретизации). Толщина нижнего придонного бокса является переменной величиной и определяется как разность между глубиной моря в рассматриваемой точке и глубиной залегания нижней грани вышележащего бокса. Влияние рек на циркуляцию учитывается явно заданием распределенных и точечных источников воды с заданными скоростью, температурой и соленостью. На открытой границе для скорости приняты условия свободного протекания, причем в точках, где течения направлены из внешней области, задаются температура и соленость, а в точках, где вода вытекает из рассматриваемой области, диффузионные потоки тепла и соли полагаются равными нулю. Для сохранения устойчивости схемы и выполнения законов сохранения для массы и количества движения удалось получить аппроксимацию граничного условия для интегральной функции тока (или уровня), согласованную с условиями для скорости и уравнением неразрывности в разностном виде.

Вторая — многослойная квазиизопикническая модель [1] также основана на полной системе уравнений термогидродинамики океана, однако водная толща океана делится не на слои фиксированной толщины, а представляется состоящей из верхнего квазиоднородного слоя (ВКС) и внутренних слоев, толщины которых меняются со временем. Поверхности раздела внутренних слоев представляют собой поверхности залегания априори заданных (базовых) изопикнических поверхностей. Предполагается, что в отличие от ВКС, где плотность может изменяться в достаточно произвольных пределах, плотность во внутренних слоях может меняться в пределах базовой стратификации. Внутренние слои могут исчезать (вырождаться), когда их толщина становится равной нулю, и любой внутренний слой может контактировать с ВКС. Для расчета толщины ВКС используется уравнение баланса турбулентной энергии в ВКС. Явное описание динамики ВКС важно как с физической точки зрения (позволяет правильно описать неадиабатические процессы в верхнем турбулизированном слое моря), так и с экологической точки зрения (многие химические и биологические процессы происходят именно в ВКС). Модель позволяет более наглядно отразить формирование и эволюцию промежуточных водных масс в море.

Применялась также модель океанической циркуляции Принстонского университета (*Princeton Ocean Model – POM*) [2], основанная, так же как и многоуровневая и многослойная модели, упомянутые выше, на полной системе уравнений термогидродинамики океана со свободной поверхностью в приближении Буссинеска, гидростатики и несжимаемости жидкости. Отличительными чертами этой модели являются, во-первых, применение так называемых σ -координат и, во-вторых, описание вертикального перемешивания в рамках дифференциальной модели турбулентности. При конечно-разностной аппроксимации исходных уравнений по пространству используется сетка C .

Кроме того, проводились расчеты циркуляции по модели Фельзенбаума [3], т.е. в рамках линейной теории ветровых установившихся течений в однородном море без учета горизонтального обмена количеством движения. Достоинством модели является относительная простота ее реализации по сравнению с полными моделями.

В системе наук о море математическое моделирование экосистем является относительно новой дисциплиной по сравнению с моделированием гидродинамических процессов. Экологическое моделирование предполагает решение уравнений класса адвекция – диффузия – реакция относительно компонент характеристического вектора экосистемы. Конкретный вид характеристического вектора, начальные и граничные условия определяются задачей исследования. Необходимо отметить, что для моделирования прибрежные экосистемы являются, пожалуй, самыми сложными. Как правило, эти экосистемы отличаются богатством природных ресурсов и биологических сообществ, высокой степенью антропогенного влияния на них, а также значительной экономической ценностью. Они получают, трансформируют и переносят как аллохтонное, так и автохтонное вещество.

3. Динамика вод на северо-западном шельфе Черного моря. Северо-западная часть Черного моря представляет собой яркий пример шельфовой зоны с существенно трехмерной структурой циркуляции, где большое влияние оказывают конфигурация береговой линии и наличие материкового склона, вдоль которого распространяется меандрирующее Основное Черноморское течение (ОЧТ). В силу мелководности важнейшую роль в формировании поля течений играет ветровое воздействие, а также значительный речной сток. В этом разделе обсуждаются результаты проведенных авторами исследований по моделированию гидрофизических процессов на северо-западном шельфе. Работа проводилась в трех направлениях. Первое — теоретическое моделирование, направленное на изучение процессов и их механизмов (см. пп. 3.1, 3.2, 3.3). Второе — модели прикладного характера, диагностические и адаптационные, в которых используются данные наблюдений за параметрами морской среды для восстановления картины циркуляции (см. п. 3.4). Третье перспективное направление — прогностические модели, позволяющие воспроизводить реальную структуру гидрофизических полей в море по известным из наблюдений внешним воздействиям (см. п. 3.5).

3.1. Ветровые и стоковые течения в баротропном море. В рамках многоуровневой модели рассчитывалась ветровая циркуляция в зимний сезон, когда жидкость можно считать баротропной, на шельфе [4] в районе к северу от 44° с.ш. и к западу от 34° в.д. При этом учитывался динамический эффект стока рек Дунай, Днестр, Днепр и Южный Буг. Моделировалась генерация течений: при северо-восточном и юго-западном ветрах различной интенсивности (без речного стока); обусловленных только стоком рек; при учете обоих факторов. Расчеты показывают, что циркуляция устанавливается очень быстро (за 6 – 8 ч) и с большой точностью выполняется приближение «твердой крышки». Существенную роль в формировании циркуляции играет рельеф дна. Так, из-за рельефа дна над свалом глубин возникает противотечение в поверхностных слоях в случае, когда циркуляция формируется за

счет втекания речных вод на шельф. При учете ветра эффект речного стока практически не проявляется в интегральной циркуляции, однако течения на поверхности в основном определяются реками.

Аналогичные исследования были проведены для зал. Донузлав [5] с учетом характерных особенностей рельефа дна (глубокого и узкого фарватера), орографии берегов и водообмена с открытым морем через узкий пролив. Циркуляция в заливе и прилегающем участке моря приспосабливается к ветру менее чем за сутки, причем в начальной, переходной, стадии происходят сейшеобразные колебания. При различных ветровых ситуациях в проливе и в самом заливе реализуется, как правило, двухслойная система течений, структура которых существенно связана с рельефом дна. В верхнем слое преобладают течения, вызванные непосредственным действием напряжения трения ветра. В центральной части залива поверхностные дрейфовые течения ослабляются геострофическими течениями, и результирующее течение может быть направлено против ветра. Относительно глубокие котловины обуславливают частое возникновение здесь круговоротов. В нижнем слое течения меняют направление и ориентированы преимущественно вдоль оси залива, где формируются струйные течения. На мелководье течения ориентированы по ветру.

Большие экологические проблемы в связи с интенсивной антропогенной нагрузкой существуют в системе севастопольских бухт (собственно Севастопольская бухта, бухты Южная, Карантинная, Песочная, Стрелецкая, Омега, Камышовая, Казачья и ряд других более мелких бухт). Для расчета ветровой циркуляции [6] использовалась модель Фельзенбаума [3]. Рассматривалась область побережья от Голубой бухты на юге до устья р. Бельбек на севере. Расчеты выявили наличие ряда особенностей течений, характерных для данной области. Показаны определяющая роль рельефа дна и направления ветра в формировании циркуляции и существенно трехмерный характер течений в изучаемом районе моря. При северо-восточном ветре образуется струйное вдольбереговое течение, втекающее через северную границу области и распространяющееся до м. Херсонес. В бухтах образуется вихревая структура интегральной циркуляции с зонами интенсивного подъема и опускания вод. При северо-западном ветре вдольбереговое течение существует только от м. Херсонес до южной границы области, в бухтах имеют место те же особенности движения вод, что и для северо-восточного ветра, но их пространственное распределение является иным.

3.2. Трансформация речных вод. Одной из главных особенностей гидродинамики вод в северо-западной части Черного моря является наличие значительного речного стока. Его распресняющий эффект вносит дополнительный вклад в формирование трехмерного поля скорости течений. Для исследования трансформации и распространения речных вод на северо-западном шельфе и их влияния на циркуляцию применялась многоуровневая модель. Имитировалась ситуация весеннего половодья, когда доминирующий вклад в стратификацию вносят халинные эффекты. Решалась задача о втекании речных вод с нулевой соленостью в покоящееся в начальный момент море с заданным распределением солености в условиях штиля [7, 8]. Расчеты позволили описать динамику распресненных вод и изучить роль различных физических механизмов, влияющих на циркуляцию. В частности, удалось

описать образование и эволюцию антициклонического вихря в районе устья р. Дунай, регулярно наблюдаемого на спутниковых снимках.

Для исследования процесса последующего распространения распресненных вод в открытое море был разработан метод сквозного счета на двух сетках (или по-другому — метод вложенных сеток [9]). Для части Черного моря южнее 44° с.ш. и восточнее 34° в.д. использовалась более крупная сетка. Решалась задача о формировании халинной циркуляции при втекании речных вод в море с заданным горизонтально-однородным распределением плотности под воздействием ветров различных направлений. В проливе Босфор задавалось вертикальное распределение скорости во всей толще, и в нижнем слое, где вода втекает, задавались температура и соленость, а в верхнем слое, где вытекает, ставилось условие отсутствия диффузионных потоков тепла и соли. Расчеты показали, что для области с мелкой сеткой в течение первого месяца результаты достаточно хорошо согласуются с результатами расчетов, проведенных только для одной северо-западной части моря. Таким образом, при расчетах на сроки порядка месяца достаточно ограничиться только шельфовой областью. С течением времени влияние глубоководной части моря на циркуляцию на шельфе оказывается значительным. В то же время влияние ветра на динамику распресненных вод существенно с самого начала расчетов. При отсутствии ветра речные воды распространяются вдоль западного берега моря, опускаясь и образуя распресненный слой. Северо-восточный ветер прижимает этот поток к берегу и усиливает его, так что на шельфе распресненных вод практически не остается, они концентрируются в западной части открытого моря, образуя здесь квазиоднородный слой, со временем доходящий до Босфора. Под действием северо-западного ветра речные воды распространяются вглубь шельфа и далее начинают двигаться к югу в открытое море, смешиваясь с поднимающимися из глубинных слоев более солеными водами и образуя язык относительно пресных вод в центральной части западной половины моря.

3.3. Апвеллинг. Одним из распространенных явлений в северо-западной части Черного моря является апвеллинг, возникающий у берегов и в открытой части моря при определенных гидрометеорологических условиях. Анализ данных наблюдений показывает, что апвеллинги здесь имеют преимущественно ветровой характер, обусловленный сгоном вод от берега в сторону открытого моря и выходом на поверхность глубинных вод. Для исследования процессов генерации апвеллингов при действии ветров различных направлений была использована многоуровневая модель [10, 11]. Расчеты позволили подробно описать положение, интенсивность и вертикальную структуру зон апвеллингов/даунвеллингов. При ветрах северо-восточного, северного и северо-западного направлений возникают зоны интенсивного апвеллинга у берегов Крыма. При северо-восточном ветре интенсивный апвеллинг развивается у западного берега Крыма в Каламитском заливе, в районе м. Тарханкут и на подветренной стороне Тендровской косы. При повороте вектора скорости ветра от восточного к западному направлению зона апвеллинга смещается из Каламитского залива к южной оконечности Крыма — м. Айя и далее к востоку до м. Меганом. При этом усиливается интенсивность апвеллинга. При северо-западном ветре апвеллинг происходит практически вдоль всего

побережья северо-западной части моря, т. е. происходят интенсивный подъем вод из глубинных слоев моря и вынос вод с мелководья в открытое море. Таким образом, подтверждается известный факт, что летом такой ветер приводит к понижению температуры воды на поверхности моря около Ялты до 8 – 12°C. При ветрах западного и юго-западного направлений характер апвеллинга меняется: мощная зона образуется у Болгарского побережья в районе м. Калиакра. У берегов Крыма интенсивный подъем вод у поверхности при западном ветре сохраняется лишь в районе от м. Сарыч до м. Меганом, а все западное побережье Крыма и западный берег шельфа заняты зоной опускания вод. При восточном ветре зоны относительно сильного апвеллинга есть лишь в Каламитском заливе и у северного берега м. Тарханкут. На южном крае м. Тарханкут, у южного побережья Крыма и вдоль всего западного края шельфа возникают зоны достаточно сильного опускания вод. Наконец, при ветрах южного и юго-восточного направлений вдоль всего побережья Крыма и в Джарылгачском заливе происходит опускание вод.

Расчеты на более мелкой сетке позволили описать локальную структуру апвеллингов. В частности, удалось исследовать положение и размеры зон апвеллингов/даунвеллингов, обусловленных сгоном/нагоном вод в зависимости от направления ветра в окрестности о. Змеиный [12]. Здесь структура вертикальных движений тесно связана с наличием острова и состоит из чередующихся зон подъема и опускания вод. В окрестности острова при всех ветрах возникают апвеллинги, положение и интенсивность которых зависят от направления ветра, что свидетельствует о постоянной вентиляции вод в этом районе и что очень существенно для состояния экосистемы в регионе.

Исследовались региональная структура зон апвеллингов/даунвеллингов в двух акваториях, расположенных рядом, но отличных по физико-географическим характеристикам. Первый район мелководный и включает Каркинитский залив и заливы, примыкающие к Днепровско-Бугскому лиману и ограниченные с юга Тендровской косой. Индикатором апвеллинга в этом районе служит температура (что, кроме того, очень удобно для сравнения результатов расчетов с натурными данными по спутниковым наблюдениям). Второй район — Каламитский залив, где к берегу подходит район свала глубин. Индикатором апвеллинга здесь служит не только температура, но и соленость, которая характеризует особенности подъема и опускания вод в глубинных слоях моря. Проведенные расчеты показали, что в прибрежных районах очень быстро формируются достаточно резкие температурные фронты, структура и положение которых зависят от направления и интенсивности ветра и тесно связаны с особенностями рельефа дна.

Помимо ветровых на шельфе возникают апвеллинги, связанные с эволюцией струи ОЧТ, а именно с ее проникновением на шельф. Моделирование образования апвеллинга [13], обусловленного трансформацией струи ОЧТ, распространяющейся вдоль материкового склона, показало, что этот апвеллинг может являться причиной выхолаживания вод северо-западного шельфа. Действительно, при развитии апвеллинга холодные воды поднимаются из глубины и замещают прогретые теплые воды приповерхностного слоя моря. Поскольку поток поверхностных вод направлен на юг, теплые воды сгоняются также в эту сторону. В то же время апвеллинг в мелководной части моря,

например в районе Тендровской косы, где глубина составляет 7 – 9 м, поддерживается не просто подтоком глубинных вод, а подтоком воды в придонном слое. В результате холодные воды с более глубокой части шельфа перемещаются в мелководную (северную) часть, где температура воды падает. Особенно ощутимым этот эффект может оказаться в осенний период, когда поток тепла на границе вода – воздух направлен в атмосферу.

3.4. Диагностические и адаптационные расчеты течений. Для получения реальной картины циркуляции в прикладных задачах применяются диагностический и адаптационный методы расчета, в которых используются полученные из наблюдений трехмерные поля температуры и солёности. В диагностическом расчете поля температуры и солёности считаются заданными и вычисляется поле скорости течения. В адаптационном расчете наряду с полем скорости вычисляются согласованные с ним поля температуры и солёности. При проведении адаптационных расчетов применяются два подхода. В первом подходе исходные поля температуры и солёности используются только в качестве начальных полей, а расчет выполняется на некоторый конечный интервал времени, в течение которого средняя по объёму кинетическая энергия выходит на квазиустановившийся режим. Во втором подходе расчет проводится при тех же начальных условиях, но теперь в уравнения для температуры и солёности вводятся дополнительные члены типа источников, пропорциональные разности исходных и рассчитываемых полей температуры и солёности. В такой постановке особенности, присущие исходным полям температуры и солёности, сохраняются в течение всего расчета.

С использованием квазиизопикнической модели проведены адаптационные расчеты климатических течений (для каждого месяца) на северо-западном шельфе [14 – 16]. В этих расчетах применялся второй подход, при этом члены типа источников вводились и в уравнения эволюции толщин слоев. Была исследована роль условий на открытой границе, для чего проведены расчеты отдельно для шельфа и для всего Черного моря. Показано, что при наличии открытой границы целесообразно использовать модель в приближении «твёрдой крышки». В этом случае не происходит нереального роста уровня моря.

3.5. Эволюция вертикальной термохалинной структуры вод в Севастопольской бухте. Севастопольская бухта представляет собой водоем эстуарного типа, имеющий ограниченный водообмен с открытым морем. Основными факторами, определяющими структуру вод в бухте, являются взаимодействие с атмосферой, сток пресных вод р. Черной в восточную часть бухты и приток солёных морских вод через пролив в ее западной части. Модель [17], направленная на воспроизведение перестройки вертикальной структуры полей температуры и солёности в бухте, представляет собой одномерный вариант многослойной квазиизопикнической модели. При этом описывается динамика ВКС и учитывается диапикнический обмен массой, теплом и солью с коэффициентами диффузии, выбранными согласно теории двойной диффузии. Для расчета используются данные о скорости ветра,

температуре воздуха, уровне моря на гидрометеорологической станции, относительной влажности, осадках, расходе р. Черной и облачности. Поток падающей коротковолновой радиации (с учетом суточной изменчивости) и альбедо рассчитывались по полуэмпирическим формулам. Данные об уровне моря используются для определения из интегрального уравнения баланса массы тотального расхода воды через пролив, соединяющий бухту с морем, а вертикальная структура скорости здесь вычисляется с помощью двухслойной модели.

Рассчитанные интенсивность и изменчивость «верхнего» и «нижнего» течений в проливе зависят от интенсивности и изменчивости ветра и значительно превышают суммарный расход. Благодаря именно этим потокам происходит вентиляция воды в бухте за время (≈ 1 сут), которое можно оценить как отношение объема бухты к величине расхода «верхнего» течения. Расчеты показывают, что изменчивость температуры главным образом обуславливается процессами теплообмена с атмосферой. Существует также тесная зависимость поверхностной солености и расхода р. Черной: интенсификация речного стока сразу приводит к существенному распреснению морской воды и уменьшению ее плотности.

Модель правильно воспроизводит эволюцию вертикальной структуры температуры и солености в ситуации, когда происходит полное перемешивание воды по вертикали. Показано, что важен учет в этом мелководном бассейне сравнительно большой фоновой диссипации энергии турбулентности в ВКС и диапикнического перемешивания, сопоставимого по интенсивности с обменом в океанических бассейнах. Принципиальным является учет речного стока, водообмена с открытым морем и теплообмена с атмосферой.

4. Циркуляция в замкнутых и полужамкнутых водоемах. Кроме прибрежных районов Черного моря моделирование гидродинамических процессов проводилось для других водоемов, причем исследования проводились также в трех направлениях, описанных в разделе 3.

4.1. Озеро Киннерет. Озеро Киннерет (море Галилейское) расположено в тектонической впадине на 209 м ниже уровня моря, пресноводное, площадь около 170 км², глубина 45 м. Имитация изменчивости трехмерных полей температуры и скорости течения в озере, вызванной сезонной изменчивостью солнечной радиации, атмосферной циркуляции, осадков, испарения, стока р. Иордан и водозабора на нужды населения, проводилась на основе многослойной квазиизопикнической модели [18]. В расчете использовались заданные по наблюдениям среднемесячные поля скорости ветра, температуры воздуха, солнечной радиации, облачности, альбедо, давления водяного пара в атмосфере и осадков. Результаты расчетов качественно соответствуют известным данным наблюдений, за исключением циркуляции в летний сезон, когда озеро является стратифицированным и имеет место четко выраженная циклоническая циркуляция. Были проведены расчеты для проверки гипотезы [19] о возникновении циклонического течения в озере, обусловленного со-

вместным влиянием нелинейности и трения на вынужденную внутреннюю волну Кельвина при суточной изменчивости ветра (бриза). Расчеты [20] показали, что в данной модели этот механизм не проявляется. Была выдвинута гипотеза о том, что генерация циклонической циркуляции, несмотря на малый горизонтальный размер озера, обусловлена пространственной неоднородностью суточного ветра, а именно его циклонической завихренностью. Учет завихренности ночного бриза влияет на структуру циркуляции. Даже при слабом ночном ветре появляется заметная циклоническая циркуляция, а усиление ночного бриза приводит к интенсификации циклонических круговоротов и к их доминированию в течение всего дня. Таким образом, показано, что механизм генерации циклонической циркуляции в озере за счет остаточного переноса в волне Кельвина не столь эффективен, а доминирующая в течение суток циклоническая завихренность ветра может быть основным фактором, приводящим к интенсивной циклонической циркуляции в озере.

4.2. Мертвое море. Мертвое море — это большое глубокое соленое бессточное озеро, находящееся в рифтовой зоне с очень сухим климатом. Для имитации процессов в Мертвом море [21], происходивших в 1992 – 2000 гг., применялся (как в п. 3.5) одномерный вариант квазиизопикнической многослойной модели. Для расчета использовались достаточно подробные данные измерений гидрометеорологических характеристик в 1992 – 2000 гг.: скорости ветра, температуры воздуха, потока коротковолновой радиации, относительной влажности, а также климатические данные об облачности. Модель достаточно полно отражает специфику Мертвого моря, а именно: выбрано соответствующее уравнение состояния; учтено влияние солености воды на ее теплоемкость и на давление насыщающего пара у поверхности моря, т. е. на испарение; учтены осаджение соли, «механическое» испарение, речной сток и водообмен с южным заливом. Данные об уровне моря использовались для косвенного определения осадков, расхода р. Иордан и стока в южный залив с помощью интегрального уравнения неразрывности. Показано, что построенная модель достаточно точно описывает перестройку термохалинной структуры вод.

4.3. Измирский залив. Измирский залив, как и прибрежные регионы Черного моря, подвергается интенсивной антропогенной нагрузке. В рамках многоуровневой модели выполнены расчеты циркуляции в заливе с целью исследования влияния на нее различных внешних факторов [22], а также диагностический и адаптационный расчеты скорости течения по результатам трех гидрологических съемок, проведенных в различные сезоны [23]. Они позволили проинтерпретировать данные наблюдений, объяснить сезонную изменчивость термохалинной структуры вод в заливе. Сопоставление с данными других измерений (например оптических) показало, что даже второй адаптационный подход может приводить к сглаживанию полей температуры и солености и «исчезновению» реально существующих мелкомасштабных

особенностей в этих полях. Это означает, что для расчета течений на гидрологических полигонах достаточно проводить диагностические расчеты либо при проведении адаптационных расчетов подбирать более адекватные рассматриваемым пространственно-временным масштабам параметризации турбулентного обмена.

4.4. Персидский залив. Персидский залив представляет чрезвычайный интерес как район наиболее интенсивной добычи и транспортировки нефти. Исследования изменчивости гидрологической структуры и региональной циркуляции вод в заливе особенно актуальны в связи с большой вероятностью разливов нефти и нефтяных продуктов вследствие аварий и многочисленных войн в этом регионе. Расчет сезонной циркуляции [24] производился с помощью модели РОМ диагностическим методом с использованием данных измерений температуры и солености, полученных в 1992 г. во время гидрологических съемок экспедиции на судне NOAA «*Mt. Mitchell*». При задании поля напряжения трения ветра использовались данные реанализа о скорости приповерхностного ветра, полученные Национальным центром прогноза окружающей среды США. Расчеты позволили существенно уточнить и детализировать картину сезонной циркуляции в Персидском заливе, особенно в придонных и поверхностных слоях. Кроме того, были проведены сценарные расчеты распространения загрязняющей примеси в заливе в результате возможных аварийных разливов нефти.

5. Динамика морской экосистемы и транспорт загрязнений. Моделирование прибрежных экологических систем развивается в трех направлениях. Первое — моделирование биогеохимических циклов (см. пп. 5.1, 5.2). Оно позволяет описать состояние экосистемы и определить основные тренды, связанные с климатической и антропогенной изменчивостью. В рамках такого подхода оцениваются основные потоки вещества, способность экосистемы накапливать его, трансформировать и переносить. Общественная ценность таких моделей, как правило, превышает практическую значимость. Второе направление — процесс-ориентированное моделирование (см. пп. 5.3, 5.4). В основу модели второго типа закладывается причинно-следственная схема явления. Сравнение результатов расчета с натурными данными дает основания для оценки качества схемы и ее дальнейшего совершенствования. Модели этого класса обладают в равной мере как академической, так и практической ценностью. Третье — моделирование экологических последствий возможных техногенных аварий (см. пп. 5.5, 5.6, 5.7). В этой области математическое моделирование является практически единственным рабочим инструментом. Модели такого рода обладают максимальной практической ценностью.

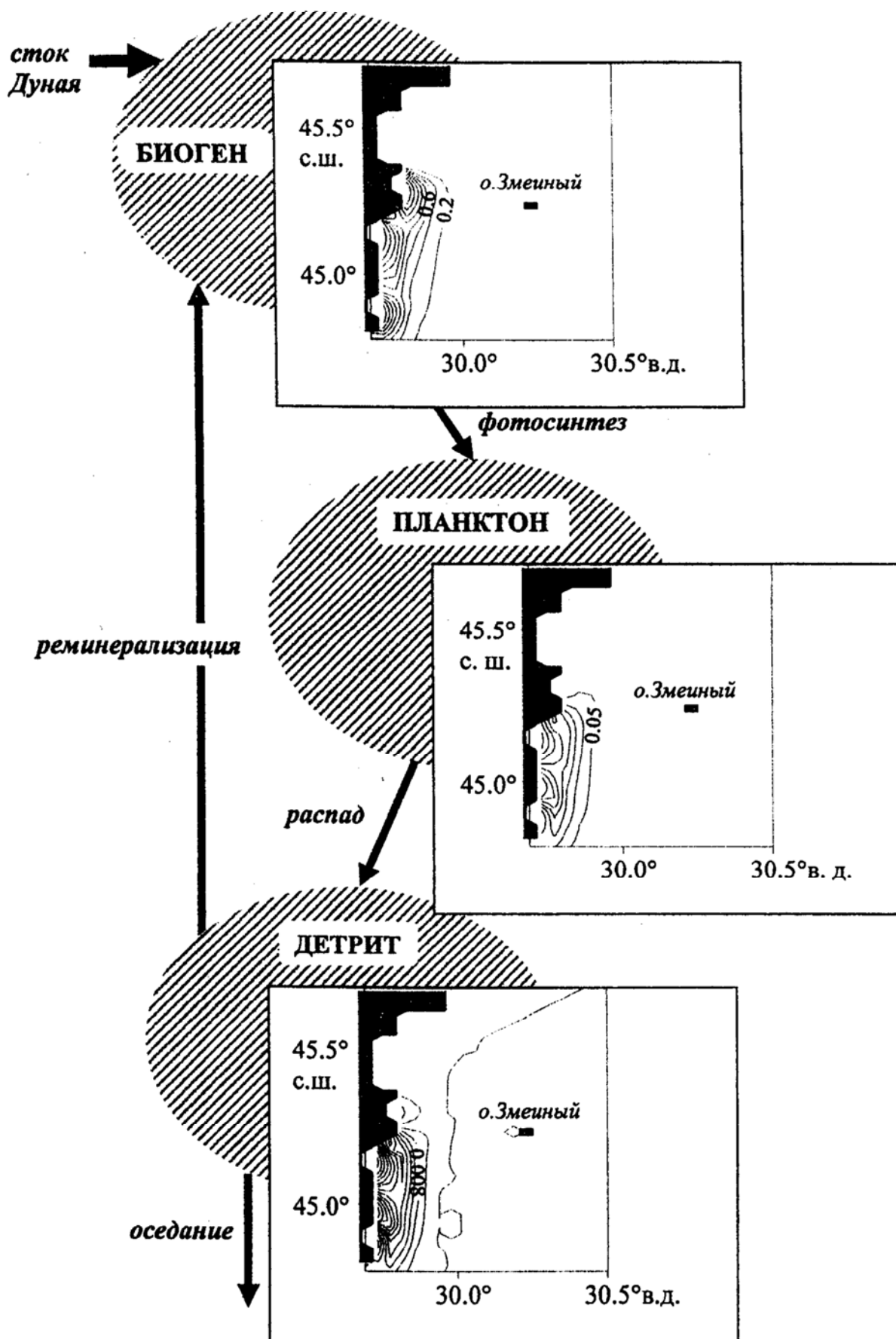
5.1. Эволюция экосистемы в приустьевой зоне Дуная. Проведена серия экспериментов по моделированию экосистемы черноморского шельфа приустьевой зоны Дуная [25], исследовалось влияние стока Дуная и ветрово-

го режима на эволюцию экосистемы. Особенностью экосистемы данного района является то, что она функционирует за счет поступления биогенных элементов в море с речным стоком, а традиционный для открытой части моря приток биогенов из глубинных слоев играет гораздо меньшую роль. Если в глубоководной части моря обогащение верхнего слоя биогенными элементами происходит во время зимней конвекции, то в интересующий нас район поступление биогенов происходит с разной интенсивностью практически круглый год.

Многоуровневая модель была дополнена трехкомпонентным биогеохимическим блоком — системой транспортных уравнений, описывающих трансформацию вещества (азота) компонентами характеристического вектора экосистемы: планктоном, детритом и биогеном (нитраты). Были учтены (рис. 1) следующие процессы трансформации вещества: фотосинтез, естественная смертность планктона, реминерализация и гравитационное оседание детрита. Для моделирования был выбран летний период.

В соответствии со среднегодовой повторяемостью ветра в регионе было проведено три численных эксперимента: в отсутствии ветра, при относительно слабом (5 м/с) северо-восточном ветре и при таком же северо-западном. Цветение планктона на поступающих с дунайским стоком биогенах в начальный момент развивается непосредственно у источника, постепенно захватывая глубоководные районы шельфа. К пятым суткам (рис. 1) биогены распространяются в открытое море в поверхностном слое, вызывая увеличение в процессе фотосинтеза концентрации планктона. К десятым суткам планктона в верхнем слое становится настолько много, что он ассимилирует практически все биогены, поступающие со стоком, и, разлагаясь, обеспечивает образование детрита. Ветровой режим значительно влияет на пространственные распределения компонент экосистемы. При отсутствии ветра пятно планктона и детрита распространяется в открытое море вплоть до о. Змеиный и к северу вследствие циркуляции, обусловленной стоком Дуная. Под действием северо-восточного ветра пятно планктона сносится к западному краю шельфа и вдоль берега к югу — в открытое море. Северо-западный ветер вызывает распространение планктона и детрита на восток. Фотосинтез в глубинных слоях лимитируется освещенностью.

Для детального исследования особенностей трехмерной структуры биогеохимических полей были рассчитаны потоки вещества в замкнутой дунайской приустьевой области [26]. Анализ потоков позволил заключить, что экосистема дунайской приустьевой акватории представляет собой буферную зону между прессом дунайских биогенных загрязнений и прилегающими районами шельфа и открытого моря. Трансформация вещества в этой зоне определяется мощностью источника и ветровым режимом над морем. В случае безветрия и слабого северо-западного ветра система полностью ассимилирует биогены. Северо-восточный ветер приводит к переносу ослабленного потока вещества в открытую часть моря.



Р и с. 1. Блок-схема модели экосистемы приустьевой зоны Дуная и рассчитанные распределения компонент (мкМ) на горизонте 0,5 м на пятые сутки в случае северо-восточного ветра

5.2. Сезонная изменчивость морской экосистемы на северо-западном шельфе Черного моря. При моделировании сезонной изменчивости экосистемы эвфотической зоны Черного моря [27] многослойная квазиизопикническая модель была объединена с 7-компонентной моделью азотного цикла Фэшема – Даклоу [28]. На входе модели задавались сезонный ход солнечной радиации, атмосферной циркуляции, стока рек, водообмена через пролив Босфор. На выходе генерировались трехмерные поля гидротермодинамических переменных и концентрации компонент экосистемы (фито-, зоо-, бактериопланктона, растворенного органического вещества (РОВ), аммония, нитратов, детрита). Следующие биогеохимические процессы в ВКС были формализованы: фотосинтез как функция освещенности и концентрации нитратов и аммония; естественная смертность фитопланктона; убыль фитопланктона в ходе его потребления зоопланктоном; рост биомассы зоопланктона за счет потребления фитопланктона, бактерий и детрита; рост биомассы бактерий за счет потребления ими аммония и РОВ; образование РОВ за счет распада детрита и экссудации фитопланктона; накопление аммония в результате естественной смертности зоопланктона и бактерий; образование детрита в процессе жизнедеятельности зоопланктона и естественной смертности фитопланктона; гравитационное оседание детрита.

Основным источником нитратов на шельфе в зимне-весенний период является речной сток. Поэтому в зимний сезон, когда освещенность недостаточна для поддержания высоких скоростей фотосинтеза, нитраты переносятся как пассивная примесь, и здесь формируется их распределение, подобное распределению солёности. С ростом освещенности нитраты к лету практически полностью потребляются фитопланктоном. С июля по август в Каркинитском заливе возникает апвеллинг, который обеспечивает транспортировку в ВКС нитратов из глубинных слоев. Этот механизм поступления нитратов в шельфовую зону превышает по мощности поступление их с речным стоком. К осени поступившие в результате апвеллинга нитраты полностью усваиваются фитопланктоном. Одновременно ослабляется фотосинтез и восстанавливается подобное солёности распределение нитратов. Цветение фитопланктона на шельфе «стартует» в марте и обеспечивается потреблением аммония. К апрелю цветение ослабевает. В мае, июне фитопланктон развивается лишь в узких приустьевых районах. Зоопланктон запаздывает в своем развитии относительно фитопланктона на месяц. В достаточно высокой концентрации бактерии присутствуют в ВКС на шельфе всегда. Весенний пик концентрации фиксируется здесь в апреле. В ноябре имеет место второй локальный максимум концентрации. Концентрации РОВ в ВКС минимальные в январе, феврале. В марте его концентрация возрастает в результате экссудации фитопланктона. Максимум РОВ на шельфе достигается в мае. Зимний период характеризуется максимальными концентрациями аммония. В марте из-за потребления фитопланктоном его концентрация уменьшается. Концентрация

детрита зимой незначительная. С марта она возрастает, достигая своего максимума в апреле. Май характеризуется уменьшением концентрации детрита.

5.3. Придонная гипоксия на северо-западном шельфе Черного моря. Придонная гипоксия (дефицит кислорода $< 2 \text{ мг/л}$) и ее биологические последствия в виде заморов донной флоры и фауны приняли угрожающий размах на северо-западном шельфе в 70-е годы, охватив до 80% его площади. Кроме несомненного практического значения, понимание природы гипоксии важно в общенаучном плане. Гипоксия сопровождается сменой окислительных условий на восстановительные и наоборот в течение примерно трех месяцев. Это дает основание рассматривать гипоксию как действующую модель геологического прошлого Земли, в котором имели место переходы от аэробных условий к анаэробным, смена «нитратного» и «сульфатного» дыхания микроорганизмов «кислородным» и обратно. Использовалась двухмерная модель [29] с трансляционной симметрией, описывающая изменение в пространстве и времени концентрации кислорода, сероводорода, углерода органического вещества, сульфатредуцирующих и тионовых бактерий, молекулярной серы. Для исследования заморов исходная система уравнений была дополнена уравнением относительно концентрации органического углерода, содержащегося в живых придонных малоподвижных и прикрепленных организмах. Заложенная в модель причинно-следственная схема процесса включает внешние факторы – солнечную радиацию и сток рек, которые повышают в весенне-летний период устойчивость водной толщи. Ослабление турбулентной диффузии и адвекции ниже термоклина и вынос биогенов и органики стоком приводят к увеличению скорости потребления растворенного кислорода в процессе окисления органического вещества. У дна начинается ощущаться дефицит кислорода, это угнетает донную флору и фауну. Смена окислительных условий в придонном слое на восстановительные вызывает появление сероводорода. Массовая гибель прикрепленных и малоподвижных организмов ведет к полной утилизации кислорода и накоплению восстановленных соединений у дна, замыкая цепь положительной обратной связи. Процесс прерывается во время осенней конвекции, которая обеспечивает поток кислорода в придонные слои, установление окислительных условий и постепенное восстановление бентоса. Расчеты показали, что гипоксия зарождается на глубинах 30 – 40 м, распространяясь затем на мелководье. Гипоксия начинается примерно через полтора месяца после установления летнего скачка плотности и достигает максимального развития за 8 – 10 дней. Были получены пространственные и временные распределения компонент экосистемы.

5.4. Моделирование кислородного и термического режимов озера Киннерет. Экологическая модель [30] кислородного и термического режимов была реализована с максимальным использованием данных мониторинга на стадии постановки задачи. С ее помощью удалось достаточно точно имитировать сезонную изменчивость вертикальных профилей температуры и концентрации кислорода. Озеро характеризуется сезонной анаэробностью гипо-

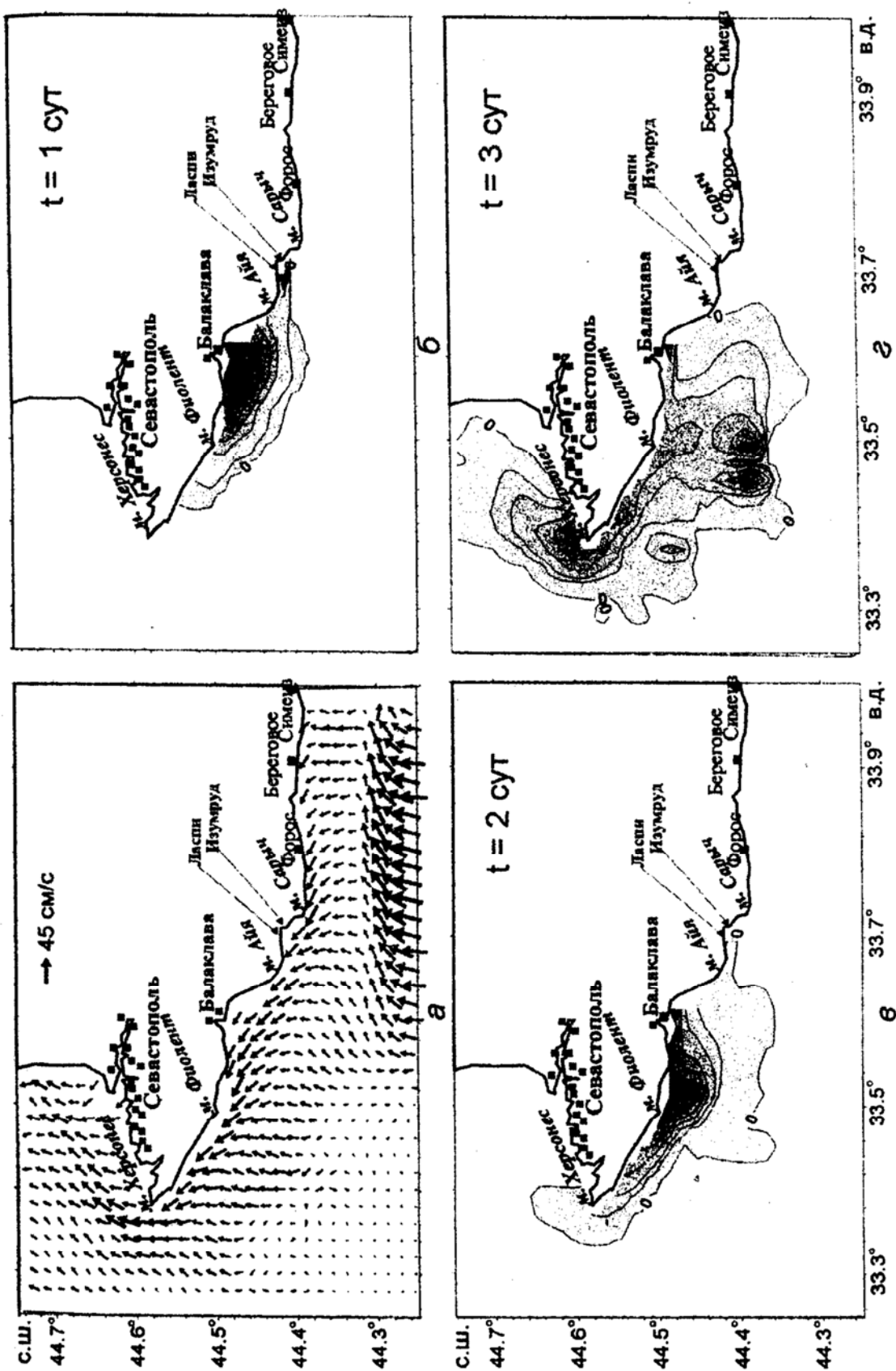
лимниона. В рамках одномерной модели рассчитывались сезонный ход температуры (с учетом ВКС) и концентрации растворенного кислорода. При трансформации кислорода учитывались внутренние источники и стоки, описывающие поступление кислорода в ходе фотосинтеза и его расход на окисление лабильного органического вещества в водной толще и на дне. С января по вторую декаду февраля формируется однородное распределение кислорода. В этот период имеет место мощная атмосферная аэрация водной толщи, незначительный вклад биологической аэрации и максимальное в году поглощение кислорода осадками. С середины февраля по май в эпилимнионе происходит цветение фитопланктона, которое вызывает значительную биологическую аэрацию этого слоя озера. В этот период система отдает кислород в атмосферу. Оформившийся к данному моменту термоклин, препятствует проникновению кислорода в гипolimнион, поэтому там возникает гипоксия. Она продолжается до полного разрушения термоклина в декабре. Были рассчитаны и проанализированы потоки тепла и кислорода через поверхность озера.

5.5. Распространение примеси в Севастопольской бухте. Течения в Севастопольской бухте, рассчитанные для случаев северо-восточного и северо-западного ветров (см. п. 3.1), использовались для расчета распространения возможного загрязнения сточными водами в системе севастопольских бухт [31] со стационарным источником в Карантинной бухте, в которой неоднократно происходил аварийный сброс. Были получены особенности пространственно-временного распределения загрязнения, обусловленные трехмерным характером циркуляции. При северо-восточном ветре в поверхностном слое моря загрязнение распространяется в открытое море в западном направлении благодаря наличию струйного вдольберегового течения. Из-за этого загрязняются бухты Песочная, Стрелецкая и Круглая. Проникновение загрязнения в поверхностные слои Севастопольской бухты происходит вследствие имеющего место подъема вод в ее северной части, опускания вод в Карантинной бухте и глубинных горизонтальных течений, направленных в Севастопольскую бухту. При северо-западном ветре загрязнение в поверхностном слое блокируется в Карантинной бухте. При этом следует особо отметить появление загрязнения в поверхностном слое Севастопольской бухты, что, как и в случае северо-восточного ветра, вызвано наличием в ней зоны подъема вод и глубинным потоком вод из Карантинной бухты.

5.6. Транспорт нефтяных загрязнений в прибрежной зоне Севастополя. Был рассчитан перенос нефтяного пятна, образовавшегося в результате возможного аварийного выброса в районе Камышовой и Казачьей бухт [32]. Течения рассчитывались в рамках модели Фельзенбаума [3]. Были рассмотрены три варианта расположения пункта перекачки нефтепродуктов: 1 — в открытом море, 2 — на изобате 20 м, 3 — в бухте у оконечности мола. В 1-м варианте ветры северного, северо-восточного, восточного, юго-восточного и южного направлений приводят к сносу нефтепродуктов в от-

крытое море. Юго-западный и западный ветеры сносят нефть в сторону Севастопольской бухты. При северо-западном ветре весь выброс поступает в Казачью бухту. Расчеты не показали ощутимой разницы между 2-м и 3-м вариантами расположения источника. В этом случае восточный, юго-восточный и южный ветры уносят пятно в открытое море. При северо-восточном и северо-западном направлениях нефтепродукты накапливаются в Казачьей и Камышовой бухтах. Западный и юго-западный ветры приводят к вдольбереговому загрязнению в направлении Севастопольской бухты. Был сделан вывод о возможном наибольшем ущербе при западном и юго-западном ветрах с точки зрения накопления нефти в бухтах и попадания ее в рекреационную зону.

5.7. Распространение техногенных загрязнений у Южного берега Крыма. Примером модельных расчетов в русле третьего направления могут служить сценарные расчеты переноса течениями нефтяного загрязнения, возникшего в результате крушения в бухте Ласпи теплохода «Кристина» 4 сентября 1999 г. [33]. В качестве гидродинамического блока применялась модель РОМ. Циркуляция рассчитывалась диагностическим методом, использовались среднеклиматические поля температуры и солености для сентября. Исследовался транспорт нефтяного пятна в условиях умеренного (6 – 9 м/с) равномерного по пространству ветра, направление которого варьировалось. Проводилась оценка степени распространения загрязнения в течение нескольких суток после аварии, поэтому рассчитывалась эволюция пятна нефтяных углеводородов как консервативной примеси (без детального описания трансформации нефтяного пятна, обусловленной испарением, эффектами поверхностного натяжения и химическими и биологическими процессами). При северо-западном ветре через сутки после разлива пятно достигало пляжей пос. Форос и частично пос. Береговое. Его ядро смещалось к югу, практически отрываясь от берега к концу вторых суток. Юго-западный ветер приводил в первые сутки к загрязнению побережья у пос. Береговое, почти достигавшему пос. Симеиз. Ядро находилось у береговой черты. Под воздействием ветров восточных румбов под угрозой загрязнения оказывалось побережье к западу от м. Айя. Через сутки пятно распространилось далеко за м. Фиолент вплоть до долготы м. Херсонес. Максимум имел место в Балаклавской бухте. При воздействии юго-восточного ветра, наиболее близкого к наблюдаемому на ближайших к месту аварии гидрометеорологических станциях, циркуляция в южной части рассматриваемой акватории носила циклонический характер (рис. 2, а). Течения на поверхности моря у южной границы бассейна были направлены на север и имели максимальные (до 50 см/с) значения скорости. Затем, при движении к берегу, они разворачивались на запад и после м. Херсонес поворачивали на северо-восток. Через сутки после разлива нефтяное пятно касалось краем м. Фиолент, концентрируясь в основном в районе Балаклавской бухты (рис. 2, б). По истечении вторых суток пятно, распространяясь в непосредственной близости от берега, достигало м. Херсонес (рис. 2, в). Далее оно не направлялось в открытое море, а, обогнув м. Херсонес, переносилось в Каламитский залив и севастопольские бухты (рис. 2, г).



Р и с. 2. Поле поверхностных течений при юго-восточном ветре (а) и положение нефтяного пятна через одни (б), двое (в) и трое (г) суток после разлива в бухте Ласпи

Закключение. Полученные в разные годы результаты не потеряли актуальности и являются полезным вкладом в теоретико-прикладное направление геофизической гидродинамики — моделирование гидрофизических процессов в прибрежных морских регионах. Кроме того, полученный опыт создания и эксплуатации математических моделей разного уровня сложности позволяет надеяться на успех при разработке комплексных моделей динамики морских экосистем как части создаваемых в настоящее время глобальных систем оперативной океанографии. Дальнейшее развитие экологического моделирования первого и второго типов видится, прежде всего, в разработке блока, описывающего обмен веществом на границе вода — донные осадки. Наиболее перспективным является использование для этой цели проинтегрированных по толще осадков моделей диагенеза. Они относительно простые, позволяют параметризовать основные биогеохимические процессы и обеспечивают сохранение массы. Важное поле деятельности для разработчиков моделей экологических последствий выбросов нефтепродуктов будет представлять решение задачи для различных нефтяных фракций, а также детализация процессов на границах. Для начала целесообразно представление нефти в виде трех не взаимодействующих фракций — пленки на поверхности моря; диспергированной и растворенной фракции в толще моря; моноразмерной взвеси. На границе вода — воздух необходимо учесть испарение нефти, а на границе вода — донные осадки — осаждение и повторное возвращение в суспензию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шапиро Н.Б.* Численные модели крупномасштабной циркуляции в Черном море и динамики вод на шельфе // Диагноз состояния морской среды Азово-Черноморского бассейна. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 1994. — С. 110 — 120.
2. *Blumberg A.F., Mellor G.L.* A description of a three-dimensional coastal ocean model // Three Dimensional Shelf Models. Coastal Estuarine Sci. / Ed. N. Heaps. — Washington, D.C.: AGU, 1987. — P. 1 — 16.
3. *Фельзенбаум А.И.* Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. — М.: Изд-во АН СССР, 1960. — 128 с.
4. *Андросович А.И., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Численная модель и расчеты циркуляции вод северо-западной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. — 1994. — № 5. — С. 28 — 42.
5. *Андросович А.И., Иванов В.А., Михайлова Э.Н. и др.* Моделирование ветровых течений в озере Донузлав // Там же. — 1996. — № 2. — С. 15 — 26.
6. *Шапиро Н.Б., Ющенко С.А.* Моделирование ветровых течений в севастопольских бухтах // Там же. — 1998. — № 6. — С. 28 — 42.
7. *Иванов В.А., Кубряков А.И., Михайлова Э.Н. и др.* Формирование и эволюция вихревых образований, обусловленных стоком рек на северо-западном шельфе Черного моря // Исследования шельфовой зоны Азово-Черноморского бассейна. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 1995. — С. 147 — 167.
8. *Иванов В.А., Кубряков А.И., Михайлова Э.Н. и др.* Моделирование распресняющего эффекта речного стока во время весеннего половодья на северо-западном шельфе Черного моря // Изв. РАН. ФАО. — 1996. — 32, № 1. — С. 152 — 160.
9. *Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б.* Моделирование распространения и трансформации речных вод на северо-западном шельфе и в глубоководной части Черного моря // Морской гидрофизический журнал. — 1996. — № 3. — С. 30 — 40.
10. *Михайлова Э.Н., Иванов В.А., Коснырев В.К.* Апвеллинг в северо-западной части Черного моря в период летнего прогрева // Там же. — 1996. — № 4. — С. 26 — 35.

11. Коснырев В.К., Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б. Численное моделирование апвеллинга в северо-западной части Черного моря // Метеорология и гидрология. — 1996. — № 12. — С. 65 – 71.
12. Михайлова Э.Н., Иванов В.А., Кубряков А.И. и др. Особенности циркуляции вод в окрестностях острова Змеиный при воздействии ветров разных направлений // Морской гидрофизический журнал. — 1998. — № 4. — С. 17 – 23.
13. Коснырев В.К., Михайлова Э.Н., Станичный С.В. Апвеллинг в Черном море по результатам численных экспериментов и спутниковым данным // Там же. — 1996. — № 5. — С. 34 – 46.
14. Алаев В.Г., Рябцев Ю.Н., Шапиро Н.Б. Адаптационный расчет скорости течений на шельфе с помощью квазиизопикнической модели // Там же. — 1999. — № 4. — С. 64 – 79.
15. Алаев В.Г. Исследование сезонной изменчивости термогидродинамических полей в северо-западной части Черного моря на основе квазиизопикнической модели // Там же. — 2000. — № 6. — С. 5 – 17.
16. Иванов В.А., Рябцев Ю.Н. Анализ течений на северо-западном шельфе Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2002. — Вып. 1. — С. 8 – 21.
17. Иванов В.А., Михайлова Э.Н., Репетин Л.Н. и др. Модель Севастопольской бухты. Воспроизведение вертикальной структуры полей температуры и солености в 1997 – 1999 годах // Морской гидрофизический журнал. — 2003. — № 4. — С. 15 – 36.
18. Иванов В.А., Любарцева С.П., Михайлова Э.Н. и др. Имитация сезонной изменчивости гидротермодинамических полей в озере Киннерет // Там же. — 2002. — № 2. — С. 12 – 35.
19. Ou H.W., Bennett J.R. A theory of the mean flow driven by long internal waves in a rotating basin, with application to Lake Kinneret // J. Phys. Oceanogr. — 1979. — № 6. — P. 1112 – 1125.
20. Шапиро Н.Б., Иванов В.А., Михайлова Э.Н. О механизме циклонической циркуляции в озере Киннерет в летний сезон // Морской гидрофизический журнал. — 2003. — № 1. — С. 30 – 45.
21. Иванов В.А., Любарцева С.П., Михайлова Э.Н. и др. Модель Мертвого моря. Имитация изменчивости термохалинной структуры вод в 1992 – 2000 годах // Там же. — 2002. — № 5. — С. 3 – 24.
22. Иванов В.А., Кубряков А.И., Михайлова Э.Н. и др. Моделирование циркуляции вод в Измирском заливе // Там же. — 1996. — № 1. — С. 56 – 65.
23. Иванов В.А., Кубряков А.И., Шапиро Н.Б. Термохалинная структура и динамика вод в Измирском заливе // Там же. — 1997. — № 4. — С. 47 – 63.
24. Иванов В.А., Кубряков А.И., Мубарак В.А.-М. Диагностический расчет циркуляции вод в Персидском заливе по данным наблюдений в 1992 году // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001. — Вып. 3. — С. 159 – 167.
25. Иванов В.А., Любарцева С.П., Михайлова Э.Н. и др. Моделирование экосистемы черноморского шельфа приустьевой зоны Дуная // Морской гидрофизический журнал. — 1999. — № 6. — С. 15 – 29.
26. Иванов В.А., Любарцева С.П., Михайлова Э.Н. и др. Влияние ветрового режима на эволюцию экосистемы приустьевой зоны Дуная в летний период // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — С. 261 – 267.
27. Иванов В.А., Любарцева С.П., Михайлова Э.Н. и др. Сезонная изменчивость экологической системы северо-западного шельфа по результатам трехмерного численного моделирования экосистемы Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — С. 251 – 260.
28. Fasham M., Ducklow H., McKelvie S. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the ocean mixed layer // J. Mar. Res. — 1990. — 48. — P. 591 – 639.
29. Беляев В.И., Совга Е.Е., Любарцева С.П. Моделирование придонной гипоксии и возникновения сероводородных линз на северо-западном шельфе Черного моря // Докл. НАН Украины. — 1997. — № 4. — С. 117 – 121.
30. Иванов В.А., Любарцева С.П., Михайлова Э.Н. и др. Моделирование термического и кислородного режимов озера Киннерет (Израиль) // Морской гидрофизический журнал. — 2002. — № 1. — С. 69 – 80.

31. Михайлова Э.Н., Шапиро Н.Б., Ющенко С.А. Моделирование распространения пассивной примеси в севастопольских бухтах // Там же. — 1999. — № 3. — С. 29 – 42.
32. Иванов В.А., Рябцев Ю.Н. Моделирование поверхностных течений и переноса нефти в районе бухт Камышовая и Казачья // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2001. — С. 18 – 30.
33. Еремеев В.Н., Кубряков А.И., Щипцов А.А. Расчет распространения техногенного загрязнения у Южного берега Крыма в результате аварии в Ласпинской бухте // Глобальная система наблюдений Черного моря: фундаментальные и прикладные аспекты. — Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. — С. 45 – 55.

Морской гидрофизический институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 06.02.03
После доработки 27.02.03

ABSTRACT Results of studies in the field of modeling of hydrophysical and ecological processes in the coastal regions of various seas and some closed basins are generalized. The developed and applied mathematical models and also the results of numerical experiments are briefly analyzed.