

Источник: Вехи Таганрога

Дата выпуска: 2017

Номер выпуска: 67-68

Заглавие: Экосистема «Море – Человек»: научный взгляд

Автор: В. Г. Захаревич, А. И. Сухинов

При всем разнообразии методов научного исследования экосистемы «Море - человек» в наше время широко используется математическое моделирование. Необходимость в нем обусловлена невероятной сложностью и гигантскими масштабами объекта. Разработка и изучение его математической модели позволяют анализировать поведение экосистемы, сделать научно обоснованные прогнозы ее будущего. Стремление ученых Таганрогского радиотехнического университета(ныне Технологического университета ЮФУ), работающих в приморском городе, исследовать Азовское море и Таганрогский залив вполне логично. Итоги комплексного исследования опубликованы в «Известиях ТРТУ», в «Известиях ЮФУ» (2000-2011 гг.). Представляем вниманию читателей альманаха одну из статей ученых, наиболее полно отражающую этапы и тематику исследований экосистемы методами математического моделирования.

В ближайшие десятилетия ожидается усиление антропогенного воздействия на морские экологические системы. Связано это с исчерпанием многих минеральных ресурсов, удовлетворением все возрастающих потребностей в белковой пище, интенсификацией морских перевозок, строительством портов и других инженерных сооружений. В этой связи следует отметить ключевое значение экосистем шельфа и в особенности «внутренних» мелководных морей. Объясняется это тем, что многие продукты жизнедеятельности человека рано или поздно поступают со стоками в море. В концентрируются, в первую очередь, в прибрежных мелководных районах, которые наиболее ранимы в экологическом отношении.

Уникальной является экологическая система Таганрогского залива и Азовского моря в целом. Наш залив является одним из наиболее рыбопродуктивных естественных водоемов, что объясняется благоприятными природно-климатическими условиями, малосоленостью, обилием корма. В то же время море, в особенности залив, подвергается мощному антропогенному воздействию, вызванному ухудшением качества речного стока, усиливающимся загрязнением надводного слоя атмосферы, неконтролируемым выловом рыбы, ухудшением состояния морского флота. К нежелательным экологическим последствиям могут привести неудачные, с точки зрения изменения Гидрологического режима, проекты сооружения Портов и других гидротехнических сооружений. Сказанное выше и обуславливает актуальность анализа и прогноза развития экологической системы Таганрогского залива и Азовского моря.

Экологическая система моря представляет собой сложную многопараметрическую систему. Процессы, протекающие в ней, являются нестационарными и имеют существенно нелинейный характер. Поэтому даже относительно простые натурные эксперименты по анализу морской экосистемы являются чрезвычайно трудоемкими и дорогостоящими. В качестве примера следует назвать проведенный на северо-западе России эксперимент «Онего-89», в котором в течение месяца были задействованы три научно-исследовательских судна, самолет-лаборатория, а также искусственный спутник Земли. Не преуменьшая роли натурных экспериментов, следует все же отметить, что наиболее оптимальным в смысле затрат и достоверности полученных результатов представляется подход, основанный на сочетании относительно дешевых и простых натурных измерений и математического моделирования исследуемых процессов. В еще большей мере сказанное становится справедливым в отношении прогнозирования экосистемы моря. В этом случае математическое моделирование является, по сути дела, единственно надежным средством получения результатов.

Правильность такого подхода к прогнозу развития водных экосистем была осознана научным сообществом достаточно давно. Однако только в конце 70-х годов были созданы реальные предпосылки внедрения методологии математического моделирования в экологию.

В настоящее время многие крупные внутренние водоемы, заливы и шельфовые системы Западной Европы и Северной Америки имеют программно-реализованные математические модели, которые позволяют предсказывать гидродинамические, химические и биологические изменения в экосистемах. Здесь следует назвать модели: Т. Саймонса, построенные для Великих озер Америки, В. Касулли и Р. Ченга - для залива Сан-Франциско и Венецианской лагуны, С. Съеберга, Ф. Вульфа и П. Венльстрема - для северо-западной части Балтийского моря и т.д. Среди исследований отечественных ученых необходимо отметить работы Г.И. Марчука, А.С. Саркисяна, В.П. Дымникова, М.П. Айвазяна, В.Б. Залесного, В.П. Кордзадзе, В.М. Бубнова, Е.А. Цветовой, Р.А. Ибраева, Н.Н. Филатова.

Особое место в ряду исследований водных экосистем занимает «Имитационная система «Азовское море» (ИСАМ), созданная коллективом ученых Ростовского госуниверситета под руководством И.И. Воровича и Ю.А. Жданова [1]. В основу построения этой системы, которая создавалась в 1970-1980-е годы, положен длительный диалог между «специалистом-естественником» и «математиком-модельером», в ходе которого проводилась подробная дискуссия о выборе процессов, подлежащих моделированию, компонентов вектора состояния, областей однородности экосистемы. Одновременно формировались экспертные оценки параметров модели. В первой версии ИСАМ Азовское море было разделено на 7 районов (камер), затем их количество было увеличено до двух десятков и более. Это деление обусловлено отличием химико-биологических характеристик указанных камер, а также предполагаемой однородностью самих камер. Состояние экосистемы в каждой камере описывается вектором состояния, компоненты которого являются значениями концентраций различных веществ в воде и биомасс популяций. Размерность вектора состояний для каждой из камер 151, из которых используются только 120, а остальные являются резервными. Компоненты вектора состояний, называемые ингредиентами, моделируются в ИСАМ с временным шагом, равным 5 суткам. ИСАМ состоит из 16 основных блоков, перейдем к краткому описанию некоторых.

Блок «Внешние факторы». На каждом временном шаге, равном 5 дням, этот блок выдает информацию о трех группах факторов, учитываемых в ИСАМ:

- климатообусловленных (ветер, осадки, температура воды, интенсивность солнечной радиации, объем испарения, поступление азота и фосфора);
- гидрометеорологических, испытывающих антропогенное воздействие (объем стока и его минерализация).

Блок оперативного управления (планы по вылову рыбы и выпуску в море молоди, параметры, описывающие водообмен через Керченский пролив).

Этот блок извлекает необходимую информацию из базы данных, выполняет ее обработку и обеспечивает необходимой информацией остальные блоки. Возможны несколько режимов работы этого блока, в частности ретроспективный и прогнозный.

Блок «Динамика вод» предназначен для описания процесса переноса растворенных и взвешенных в воде ингредиентов и изменения их концентраций в различных районах моря (камерах). Входными данными блока являются скорость и направление ветра, а также величины стоков Дона и Кубани. По заданным внешним условиям вычисляются объемы водной среды, перетекающие из одной камеры в другую в течение 5 дней. При этом используются простые балансовые соотношения, учитывающие, кроме перетоков, испарение и выпадение осадков, на основе которых оценивается также изменение уровня, вызванное ветром. На заключительной фазе работы этого блока производится вычисление концентраций рассматриваемых веществ.

Блок «Кислород» позволяет моделировать обогащение воды кислородом при фотосинтезе и атмосферной аэрации, а также усредненное по камере распределение кислорода между приповерхностными и придонными слоями и его потребление. В силу сильной пространственной неоднородности в этом блоке производится разбиение отдельных камер на более мелкие секции. В этом блоке для математического описания используются системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

Блок «Биогенные элементы» описывает круговорот в ИСАМ соединений азота и фосфора с учетом процессов распада, переноса, изъятия, потребления и абразии берегов. Превращение фосфор- и азотосодержащих соединений описывается в виде трех последовательно идущих процессов: их поступление извне, превращение одних форм азота в другие за счет «внутренних» биохимических процессов, оседание фосфор- и азотосодержащих соединений на дно. Для описания этих процессов используется как аппарат обыкновенных дифференциальных уравнений, так и балансовые соотношения.

Блок «Качество вод» определяет изменения в концентрациях "загрязняющих веществ (ЗВ) за пятидневку. Учитываются процессы распада, а также новые поступления этих веществ. В блоке рассматриваются 4 группы ЗВ: фенолы, пестициды, детергенты, нефтепродукты. Для консервативных ЗВ изменение концентрации в блоке определяется седиментацией и разбавлением, а для неконсервативных - к этим изменениям добавляются химические реакции, адсорбция, биохимические превращения и т.д. Для математического описания в этом блоке используются балансовые соотношения между отдельными камерами.

Блок «Фитопланктон» учитывает динамику более 20 видов, среди которых могут быть выбраны 10, являющиеся доминантными при данных внешних условиях. Используемый аппарат – системы обыкновенных дифференциальных уравнений и балансовые соотношения.

Блок «Зоопланктон» моделирует процессы питания, роста, метаболизма, перехода по стадиям роста и гибели зоопланктона. В блоке используются следующие переменные: средняя соленость, средняя температура, средняя глубина каждой камеры, удельные биомассы групп видов зоопланктона.

Блок «Бентос» моделирует динамику семи ведущих видов донных беспозвоночных, в том числе процессы питания, роста, метаболизма, гибели бентоса, изменение пространственной структуры биоценозов.

Блоки моделирования рыбных популяций. В эту группу входят блоки «Бычок», «Судак», «Лещ», «Тарань», «Осетровые», «Тюлька», «Хамса», «Прочие рыбы».

В блоках учитываются процессы питания, дыхания, отмирания, размножения, миграции, промышленного воздействия. Ввиду важности процесс питания популяций, с учетом принадлежности к определенным возрастным группам, моделируется автономно. Для этого в рамках ИСАМ используется, в частности, аппарат имитационного моделирования (обучающие выборки), программно-реализованный в виде процедуры «Корм».

Была выполнена большая серия экспериментов, которая подтвердила работоспособность ИСАМ и позволила сделать правильный качественный прогноз развития экосистемы Азовского моря при различных вариантах управляющих воздействий, к числу которых относятся общий сток Дона и Кубани, водообмен через Керченский пролив, качество сточных вод, нормы отлова и пополнения рыбных запасов и т.д. ИСАМ содержит хорошо продуманную систему перекрестных и обратных связей, позволяющих достаточно полно учитывать трудно формализуемые биологические законы функционирования рыбных популяций.

Однако за время, прошедшее с начала эксплуатации ИСАМ, произошли изменения, требующие пересмотра подхода к моделированию и прогнозу экосистемы Азовского моря. Такой пересмотр должен предусматривать максимальную преемственность создаваемой системы моделирования по отношению к ИСАМ.

Анализ показывает, что блоки ИСАМ, ответственные за динамику рыбных популяций, соответствуют в основе современным знаниям о закономерностях их протекания; модификации требует, в основном, используемая база данных. В то же время остальные блоки нуждаются в существенной модернизации. Причинами этого являются: изменение экологической ситуации в регионе Азовского моря и постановка новых задач прогнозирования его экосистемы, прогресс в области создания математических моделей гидротермодинамики мелководных протяженных водоемов, распространения загрязнений и динамики фитопланктона и численных методов, появление высокопроизводительных вычислительных систем, в том числе многопроцессорных.

Наметившиеся изменения в экосистеме Азовского моря обусловлены следующими

факторами.

В последнее десятилетие в связи с падением промышленного и сельскохозяйственного производства изменилась структура источников загрязнения Азовского моря - начали преобладать бытовые стоки над промышленными, возросла доля загрязнений, выпадающих из атмосферы на водную поверхность, особенно в прибрежных районах. В 2000 году силами трех ведущих университетов юга России (ТрГУ, РГУ и КубГУ) в рамках работы по совместному проекту НОЦ юга России была проведена краткосрочная экспедиция по Азовскому морю, результаты которой показали изменения в режиме функционирования экосистемы, происшедшие в минувшее десятилетие. Изменился химический состав азовских вод, в первую очередь уменьшилось содержание азото- и фосфоросодержащих соединений в Таганрогском заливе, и, несмотря на некоторые колебания, продолжается уменьшение солености Азовского моря. Наблюдается изменение численности и видового состава фитопланктонных популяций. Следствием указанных изменений, а также увеличения неконтролируемого вылова стало снижение численности ценных пород рыб, в первую очередь осетровых.

В связи с утратой Россией большинства азовских портов, отошедших к Украине, в Таганрогском заливе начаты работы по расширению существующих портов и строительству новых, а также работы, связанные с углублением дна и прокладкой судоходных каналов. Работы, приводящие к крупномасштабным изменениям рельефа дна, несомненно приведут к изменению характера и структуры течений и могут иметь для экосистемы Таганрогского залива и Азовского моря серьезные последствия. Также важно не только отследить возможные изменения в картине течений, но и то, как изменится характер распространения загрязнений, попадающих со стоком Дона в Таганрогский залив, а также как изменится воспроизводство первичной биопродукции моря. Наиболее естественно это делать, опираясь на приближение сплошной среды для основных гидротермодинамических процессов, описывая эти процессы начально-краевыми задачами для уравнений с частными производными.

В 1990-х годах объем экспедиционных исследований на акватории Азовского моря резко сократился, что привело, в свою очередь, к отсутствию надежных экспериментальных данных, полно характеризующих поведение экосистемы Азовского моря в изменившихся условиях.

Наметившиеся изменения в режиме функционирования экосистемы Азовского моря требуют возобновления систематических экспедиционных исследований.

Авторы полагают, что пространственно-трехмерные математические модели, построенные и откалиброванные на основе гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических исследований применительно к Азовскому морю, могут стать действенным инструментом изучения и прогноза развития его экосистемы, дадут возможность предсказать заранее последствия крупномасштабных гидротехнических проектов, влияние изменения химического состава вод и эволюции климатических условий.

В Таганрогском государственном радиотехническом университете с конца 80-х годов XX века ведутся работы по построению математических моделей гидротермодинамики, распространения загрязнений и динамики фитопланктона. Были построены пространственно-двумерные гидродинамики мелких водоемов, отличающиеся от известных моделей (А.С. Саркисяна, Н.Е. Вольцингера и других) тем, что для них более точно выполняется закон сохранения импульса. В данных моделях наряду с традиционными факторами (рельефом дна, силами тяжести и Кориолиса, сложной формой береговой линии, наличием речного стока, водообмена, ветрового напряжения и трения о дно, перепада давлений) учитываются испарение и выпадение осадков [2-10].

Как правило, акватории реальных водоемов имеют весьма сложную форму, с далеко выступающими в открытое море косами и заливами, простирающимися вглубь суши. Использование прямоугольных сеток в большинстве случаев ведет к неоправданному увеличению числа используемых узлов (размерностей сеток), которое может составить десятки раз по сравнению со случаем применения криволинейных сеток. Анализ существующих методов построения криволинейных сеток показал, что для большинства реальных водоемов они да-

ют неудовлетворительные результаты - не удается построить невырожденные сетки за приемлемое время. В связи с этим был предложен и исследован метод построения оптимальных криволинейных гранично-адаптивных сеток, составленных из выпуклых четырехугольников.

С этой целью было построено обобщение известных функционалов качества сеток (Дирихле, Брэкбилла-Зальцмена и др.), а также метод минимизации функционала. Данный подход показал обнадеживающие результаты на ряде тестовых областей, являющихся трудными для известных методов - областей типа «мальтийский крест», «2-образных». В качестве реальных применений предложенного метода можно назвать построение сеток для Таганрогского залива и Азовского моря в целом, а также для Мобилского залива, расположенного на юго-востоке США.

Была разработана технология проведения вычислительного эксперимента для реальных акваторий на основе предложенных пространственно-двумерных моделей, аппроксимированных на оптимальных сетках. В связи с тем, что данные о глубинах известны для точек, не совпадающих с узлами сетки, и количество этих точек значительно меньше числа узлов, рассмотрена эффективная процедура интерполяции, которая оказалась весьма работоспособной для плавно меняющихся профилей дна. Процедура основана на минимизации специального функционала качества и не приводит к образованию фиктивных источников энергии и импульса в дискретной модели. Были проведены детальные численные эксперименты на основе построенных моделей для различных нестационарных режимов течений в Азовском море, вызванных ветрами восьми румбовых направлений. Данные моделирования хорошо согласуются с результатами многолетних наблюдений. На созданной математической и алгоритмической базе был построен комплекс программ для моделирования ветровых течений в Азовском море в приближении мелкой воды.

Дальнейшее направление работ, начиная с 1996 года, связано с построением нового семейства пространственно-трехмерных моделей гидродинамики. Были построены и исследованы пространственно-неоднородные модели динамики фитопланктона, учитывающие движение водной среды, размножение и гибель клеток, питание, диффузию, наличие метаболита. Эти модели позволили дать одно из возможных объяснений образования устойчивых диссипативных структур, периодичность их развития; численные эксперименты дали результаты, качественно согласующиеся с реально наблюдаемыми процессами. Одновременно были проведены математические исследования, связанные с установлением достаточных условий единственности решений, начаты работы по получению необходимых и достаточных условий ветвления решений, в частности, возникновения периодических в пространстве и времени решений.

Были начаты работы по построению пространственно-трехмерных моделей гидродинамики мелких водоемов. Здесь следует сказать о пространственно-трехмерных моделях для однородной водной среды и экономичных численных алгоритмах их реализации, которые являются дальнейшим развитием моделей В. Касуллы и Р. Ченга. Существенным вкладом в развитие численных методов решения данного класса задач явилось построение абсолютно устойчивых аддитивных схем (локально-двумерных схем), параллельных алгоритмов для быстрых прямых и итерационных методов решения сеточных уравнений и на этой основе построение экономичных в целом алгоритмов численного решения этих задач на многопроцессорных системах [11-17].

В результате этих исследований была защищена одна докторская диссертация (А.И. Сухиновым в 1996 году), две кандидатских диссертации (в 1997 году - В.С. Васильевым, в 2000 году - А.В. Никитиной).

В 1998-1999 годах был получен и успешно реализован грант РФФИ на проведение научных Исследований по теме «Построение, исследование В применение двух- и трехмерных моделей для Математического моделирования гидродинамических и гидробиологических процессов в мелководных протяженных водоемах». В это же время коллектив сотрудников кафедры высшей математики выиграл грант Фонда Дж. Сороса на выполнение работы по близкой тематике.

В 1999 году три ведущих вуза юга России - Ростовский государственный университет, Таганрогский государственный радиотехнический университет и Кубанский государственный университет - вошли в число четырех победителей в конкурсе по программе «Фундаментальные исследования и высшее образование» Министерства образования Российской Федерации и Американского фонда гражданских исследований и развития, в котором участвовало более 80 вузов России. Первого октября 1999 года был образован Научно-образовательный эколого-аналитический центр системных исследований, математического моделирования и геоэкологической безопасности юга России (далее сокращенно НОЦ Юга России). Интеллектуальным ядром проекта является методология математического моделирования, позволяющая проводить фундаментальные исследования экологических и техногенных систем, а также повысить качество и обогатить содержание подготовки студентов, магистрантов и аспирантов, обучающихся в области Прикладной математики и информатики, инженерной защиты окружающей среды, микроэлектроники. Деятельность НОЦ осуществляется по трем компонентам: научной работе, образовательной деятельности, установлению внешних связей.

Научная работа ведется по следующим направлениям:

- разработка, исследование и верификация математических моделей водоемов высокой разрешающей способности, описывающих гидротермодинамические процессы, теплообмен с воздушной средой, газовый и гидрохимический режим, динамику биогенных веществ и планктона, абразию берега и фильтрационные процессы;

- создание микроэлектронных сенсоров, гидроакустических систем и систем цифровой обработки информации для экологического мониторинга водной и воздушной сред;

- проведение экспедиционных исследований в Азовском море и формирование на их основе архивных данных многолетних наблюдений баз гидрохимических, гидрофизических и гидробиологических данных;

- разработка на основе построенных моделей и баз данных систем поддержки и принятия решений для обеспечения безопасности экосистем юга России.

В настоящее время в области математического моделирования пространственно-трехмерных процессов в экосистемах работают 2 докторанта, 8 аспирантов и соискателей, более 10 сотрудников кафедры высшей математики ТРТУ. Эти работы ведутся в тесном сотрудничестве с Институтом математического моделирования РАН, Институтом океанологии РАН, Научно-исследовательским и проектным институтом геофизических методов разведки океана (НИПИ «Океангеофизика»), Государственным океанографическим институтом, Институтом физики атмосферы РАН, МГУ и другими организациями. Наметилось конструктивное сотрудничество с исследовательскими центрами США, работающими в области анализа и прогноза развития шельфовых экосистем - Морской лабораторией Алабамского государственного университета, Институтом исследования водных проблем Мичиганского государственного университета.

Опыт исследователей говорит о том, что процессы, протекающие в Азовском море, имеют пространственно-трехмерный характер. Для моря при воздействии ветров преобладающих направлений характерно образование придонных компенсационных течений, в большинстве случаев направленных под острым углом и в противоположную сторону по отношению к приповерхностным. Велика роль вертикального перемешивания водной среды. Эксперименты и оценки, выполненные для моря, показывают, что характерные времена конвективных процессов вдоль вертикального направления могут быть меньше характерных времен адвективных процессов по горизонтальным направлениям. Сопоставима роль диффузии по горизонтальным и вертикальному направлениям. Здесь уместно привести опыт летней экспедиции 2000 года, предпринятой в рамках проекта НОЦ юга России. В первой половине августа была обследована акватория Таганрогского залива и Азовского моря. В указанный период времени преобладал восточный и северо-восточный ветер со скоростью 8-12 м/сек. На выходе из Таганрогского залива в районе северной оконечности косы Долгой развились

интенсивные приповерхностные и придонные течения со скоростями соответственно 60-90 см/сек и 40-60 см/сек, направленные противоположно. Перемешивание водной среды было интенсивным. Аналогичная ситуация наблюдалась в юго-восточной и центральной частях моря. Эти и многие другие экспериментальные данные дают основание утверждать, что математические модели гидротермодинамических процессов в Азовском море должны быть пространственно-трехмерными. Имеющиеся модели, в том числе и трехмерные, имеют ограниченную применимость, так как не учитывают специфику гидродинамики Азовского моря, для которого во многих случаях неприменимо гидростатическое приближение. Поэтому дальнейшее направление работ, начиная с 1998 года, связано с построением нового семейства пространственно-трехмерных моделей гидродинамики, включающих уравнения движения по всем трем координатным направлениям и физически более точные, кинематические условия на поверхностях по сравнению с известными.

При отсутствии ветрового воздействия, как следствие, возникает стратификация, и тогда пространственно-трехмерные модели необходимы для описания газового режима моря. Следует отметить, что также пространственно-неоднородным является распределение фитопланктонных популяций. Переход к пространственно-трехмерным моделям не означает полного отказа от двумерных моделей, которые позволяют получить достоверную информацию о функции возвышения уровня и сформировать физически верную картину водообмена между отдельными частями моря (ячейками сетки). Однако только трехмерные модели способны дать полностью реалистичную картину течений, распределения температуры, солей, газового режима и т.д.

Численная реализация пространственно-трехмерных моделей гидротермодинамики водоемов требует производительностей и объемов памяти, труднодостижимых на последовательных ЭВМ. Еще более проблематичным становится моделирование в этом случае совместного протекания всех процессов в сплошной среде, включая динамику планктонных популяций. В связи с этим начаты работы по созданию высокопроизводительных распределенных вычислительных ресурсов на основе 4-процессорной рабочей станции Alpha Station DS20 и восьми ПЭВМ Pentium III с тактовыми частотами 733 МГц - 1 ГГц, имеющих быстрые каналы обмена информацией. Разработаны и проходят исследование экономичные в суммарном смысле параллельные алгоритмы решения сеточных задач, возникающих при дискретизации задач водной экологии, требующие минимальных затрат времени как на обработку данных, так и на обмены информацией между отдельными вычислителями.

Наиболее «узким местом» в процессе построения моделей является получение полных и достоверных данных, касающихся экосистемы Азовского моря. Поэтому логическим продолжением работ по моделированию является организация комплексных экспедиционных исследований в Таганрогском заливе и Азовском море, получение и систематизация данных:

- о распределении и изменчивости гидрофизических характеристик трехмерного вектора скоростей, а также температуры и солености в зависимости от метеоусловий, стока Дона и Кубани, водообмена через Керченский пролив, а также между Сивашем и морем, рельефа дна, конфигурации береговой линии для различных сезонов;
- о газовом режиме приповерхностного и придонного слоев (растворенные кислород, сероводород, углекислый газ, элементы карбонатной системы, аммиак);
- о распределении биогенных элементов (фосфаты, валовый/органический фосфор, кремний, нитраты, нитриты, аммоний, мочевины, валовый/органический азот), металлов в толще воды, в придонном и приповерхностном слоях;
- о концентрации тяжелых металлов, полиароматических углеводородов и приоритетных загрязнителей в донных отложениях, водной среде и живых организмах;
- о концентрации основных видов бактерий и фитопланктона в толще воды и в приповерхностном и придонном слоях.

На основе этих данных будет осуществлено построение математических моделей расчета трехмерных полей скоростей, температуры, солености и перепада уровня, газового режима, распределения биогенных веществ и динамики фитопланктона при ветровых нагонах

и сгонах по имеющимся данным о скоростях и направлениях ветра и перепаде атмосферного давления в пунктах метеопостов, речных и морских стоках, испарении, осадках, поступлениях биогенных веществ извне, теплообмене с атмосферой, солнечной освещенности и излучении атмосферы и воды.

Будут получены экспериментальные данные о приоритетных органических загрязнителях (полициклические ароматические углеводороды, полихлорированные бифенилы, хлорорганические пестициды и др.), нефтепродуктах и тяжелых металлах в водной среде, донных отложениях и в живых организмах с использованием прецизионных физико-химических методов анализа состава и локальной структуры (газовая и жидкостная хроматография, хромато-массспектрометрия и т.д.).

Будет разработана распределенная система сбора и обработки экологической информации и реализованы основные фрагменты этой системы для устьевой зоны Таганрогского залива. Полученные в результате экспедиционных исследований базы экспериментальных данных и построенные математические модели высокой разрешающей способности и программы, численно их реализующие, будут использованы для прогнозирования развития экосистемы Азовского моря при различных сценариях воздействия на нее.

Другое применение результатов экспедиционных исследований, основанное также на развертывании распределенной системы сбора и обработки экологической информации, состоит в создании основных фрагментов «Системы обеспечения экологической безопасности и предупреждения о чрезвычайных ситуациях» в регионе Азовского моря. Учитывая сходство природно-климатических условий и гидрологии, основные результаты работы-модели, комплексы программ и распределенная система сбора и обработки информации могут быть применены к северной части Каспийского моря и для некоторых шельфовых участков Черного моря.

В рамках настоящей работы наметилась и уже реализуется перспектива привлечения студентов, аспирантов, молодых ученых и преподавателей трех университетов юга России к исследованиям и внедрение результатов этих работ в учебный процесс. В частности, в составе НОЦ Юга России в ТРТУ организована «Студенческая научно-исследовательская лаборатория эколога-аналитических исследований». Силами трех университетов начата подготовка магистров, имеющих специализацию «Эксперт в области геоэкологической безопасности», «Моделирование и управление в экологических системах». Результаты исследований войдут в готовящиеся к изданию в 2001 году монографии «Математическое моделирование гидродинамики мелких водоемов» (авторы А.И. Сухинов, В.С. Васильев), «Основы математического моделирования природных систем» (коллективная монография под редакцией академика РАН И.И. Воровича), будут включены в учебные пособия для студентов, магистрантов и аспирантов.

Создание комплекса пространственно-трехмерных математических моделей для Азовского моря позволит получить новые фундаментальные знания, которые должны продвинуть нас в понимании закономерностей образования структур течений, загрязнений и планктонных популяций, в частности, феномена пятнистости распределения фитопланктонных популяций и периодичности их развития. Будут получены данные, необходимые для понимания фундаментальных проблем биогеохимических процессов в условиях формирования периодических анаэробных условий (заморы), связанных как с естественными, так и антропогенными причинами. Для построенных моделей водной экологии будут поставлены и начнут решаться математические проблемы, связанные с исследованием существования, единственности (неединственности) и устойчивости решений начально-краевых задач для систем эволюционных нелинейных уравнений с частными производными, построения и оптимизации вычислительно-устойчивых алгоритмов, в том числе параллельных.

Мы уверены, что коллективу исследователей ТРТУ по плечу решение этих сложных и важных для юга России и всей страны проблем.

Литература

1. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря. Математические модели / Под редакцией И.И. Воровича. М.: Наука, 1981. 360 с.
2. Сухинов А.И., Васильев В.С. Гидродинамическая модель мелководных протяженных водоемов и ее численная реализация // Алгебра и анализ. Тезисы докладов международной научной конференции, ч. II, Казань, 1994, с. 127.
3. Сухинов А.И., Васильев В.С. Расчет ветровых течений в Азовском море на основе новой модели мелкой воды методом конечных элементов на оптимальных сетках // Математическое моделирование эколого-экономических систем. Тезисы докладов на Всероссийском симпозиуме «Математическое моделирование и компьютерные технологии», Т. 1, 1997. С. 95-96.
4. Сухинов А.И., Никитина А.В. Об исследовании условий единственности решений для системы уравнений динамики фитопланктона // Известия ТРТУ, 2000, № 1 (15). С. 204-208.
5. Сухинов А.И., Васильев В.С. О моделировании ветровых течений в Азовском море на основе двух- и трехмерных моделей // Экономико-математическое моделирование, тезисы докладов на II Всероссийском симпозиуме «Математическое моделирование и компьютерные технологии». Т. 1. 1998. С. 83-86.
6. Sukhinov A.I., Vasiliev V.S. Two- and Three-Dimensional Circulation Model for Shallow Water Seas. // Book of Abstracts of the Second International Conference on Finite-Difference Methods: Theory and Application. Minsk, July 6-9. 1998.
7. Sukhinov A.I., Schroeder W.W. and others. Aspects of the oceanography of the Azov Sea. // Joint ESCA and CERM Symposium at the University of Port Elizabeth, ESCA 29, South Africa Republic, Port Elizabeth, 13-17 July 1998.
8. Sukhinov A.I., Schroeder W. W. and others. The response of the Azov Sea to changes in river inflow. The 9-th Symposium "Physics of Estuaries and Coastal Seas", 24-26 September, 1998, Matsuyama, Japan, p.132-133.
9. Sukhinov A.I. Two- and Three-dimensional Hydrodynamical Models for Water Calculation. Abstracts of the International Conference on Environmental Mathematical Modeling and Numerical Analysis. 24-31 May, 1999, Rostov-on-Don, p.42.
10. Sukhinov A.I., Vasiliev V.S. Tree-dimensional models for shallow water basins and its finite difference realization. // Proc. of the 3rd International Conference FDS2000, September 1-4, 2000, Palanga, Lithuania, Finite difference schemes: theory and applications, R.Ciegis, A.Samarskii and M.Sapagovas (Eds.), IMI, Vilnius, 2000, pp.227-235.
11. Sukhinov A.I., Nikolaev I A. Symmetrized difference schemes for solving multidimensional differential equations on array computers. // Proceedings of The IY-th IMACS International Symposium on Computer Methods for Partial Differential Equations, USA, Bethlehem, 1981, p.239-241.
12. Сухинов А.И. Локально-двумерные схемы для решения многомерных параболических уравнений на вычислительных системах матричного типа // Известия вузов. Математика, № 11, 1984. С. 45-53.
13. Сухинов А.И. и др. О распараллеливании треугольных итерационных методов на специализированной системе // Автоматика и телемеханика, № 5, 1986. С. 135-142.
14. Сухинов А.И., Николаев И. А. Аддитивные схемы для моделирования трехмерных уравнений теплопроводности в цилиндрических и сферических координатах. // Дифференциальные уравнения. Т. 23, № 12, 1987. С. 2122-2132.
15. Сухинов А.И. Об аппроксимации трехмерного уравнения теплопроводности локально-двумерными схемами в цилиндрических и сферических координатах // Известия вузов. Математика, 1987, № 8. С. 66-74.
16. Sukhinov A.I. and others. Parallel realization of the fast direct methods for solving of the mesh elliptical equations. Proc. The IX-th Symposium on Microcomputer and Microproces-

- sor Applications, 12-14 October, 1994, Budapest, Hungary, v.1, 140-149pp.
17. Сухинов А.И., Васильев В.С. Локально-двумерные схемы для аппроксимации трехмерного уравнения теплопроводности в тороидальных координатах // Известия вузов, Математика 1996, № 3. С. 58-67.

Источник:
В.Г. Захаревич, А.И. Сухинов. Математическое моделирование.
Универсальная методология анализа и прогноза экосистемы
Азовского моря (Журнал «Известия Южного
федерального университета. Технические науки». 2001 г.).

ЦГТБ имени А. П. Чехова