

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ  
МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**УСТОЙЧИВОСТЬ И ЭВОЛЮЦИЯ  
ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭКОСИСТЕМЫ ЧЕРНОГО МОРЯ**

Под редакцией академика НАН Украины В.Н. Еремеева,  
члена-корреспондента НАН Украины С.К. Коновалова

СЕВАСТОПОЛЬ  
НПЦ «ЭКОСИ-ГИДРОФИЗИКА»  
2012

УДК 551.46

**Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря /** Под ред. В.Н. Еремеева, С.К. Коновалова; НАН Украины, Морской гидрофизический институт. – Севастополь, 2012. – С. 357, ил. 219, табл. 31.

В данной работе представлены основные результаты, полученные при выполнении научно-исследовательского проекта "Исследование геофизических и биогеохимических процессов, определяющих устойчивость и ассимиляционную емкость большой черноморской экосистемы, в целях управления и создания методологии оценки качества морской среды". Проект выполнялся по четырем основным направлениям: (1) Целевые натурные исследования, средства и методология исследования процессов различного масштаба; (2) Исследование влияния внешних изменений на состояние термогалинной структуры Черного моря; (3) Исследование роли физических, химических, биогеохимических процессов в формировании и эволюции экосистемы глубоководной части Черного моря; (4) Оценка ассимиляционной емкости и эффективности регуляторных восстановительных процессов в бассейне.

Монография предназначена для управленческих и природоохранных организаций, научно-исследовательских институтов, факультетов естественных наук университетов.

**Сті́йкість і еволюція океанологічних характеристик екосистеми Чорного моря /** Під ред. В.М. Єремєєва, С.К. Коновалова; НАН України, Морський гідрофізичний інститут. – Севастополь, 2012. – С. 357, іл. 219, табл. 31.

У даній роботі наведені основні результати досліджень, які отримані при виконанні науково-дослідного проекту "Дослідження геофізичних і біогеохімічних процесів, що визначають стійкість і асиміляційну ємність великої чорноморської екосистеми, в цілях управління і створення методології оцінки якості морського середовища". Проект виконувався по чотирьох основних напрямках: (1) Цільові натурні дослідження, засоби і методологія дослідження процесів різного масштабу; (2) Дослідження впливу зовнішніх змін на стан термогалинної структури Чорного моря; (3) Дослідження ролі фізичних, хімічних, біогеохімічних процесів у формуванні і еволюції екосистеми глибоководної частини Чорного моря; (4) Оцінка асиміляційної ємності і ефективності регулятивних відновних процесів в басейні.

Монографія призначена для управлінських і природоохоронних організацій, науково-дослідних інститутів, факультетів природних наук університетів.

**Рецензенты:**

Егоров Виктор Николаевич, академик НАН Украины, профессор, доктор биологических наук;

Совга Елена Евгеньевна, ведущий научный сотрудник, доктор географических наук (океанология).

Печатается по решению Ученого совета МГИ НАН Украины.

ISBN 978-966-02-6508-0 © Морской гидрофизический институт НАН Украины, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	5
<b>1. Информационное и методологическое обеспечение</b> .....	8
1.1. Проблемно-ориентированная геоинформационная система Черного моря (В.Н. Еремеев, А.Х. Халиулин, Е.А. Годин, А.В. Ингеров, В.Н. Белокопытов, Е.В. Жук, Л.К. Галковская, Е.А. Исаева).....	8
1.2. Программное обеспечение для морских экологических исследований (В.Н. Белокопытов, А.Х. Халиулин, Е.А. Годин, С.К. Коновалов, С.Ф. Доценко, А.В. Ингеров, А.В. Сергеева, В.П. Горбунов) .....	32
1.3. Использование вариационного подхода и решения сопряженной задачи при идентификации входных параметров модели переноса пассивной примеси в Черном море (С.Г. Демьшев, В.Н. Еремеев, С.В. Кочергин, В.С. Кочергин).....	43
1.4. Концепция стабильной экосистемы с позиций адаптивного баланса процессов развития (И.Е. Тимченко, Е.М. Изумнова, И.П. Лазарчук).....	66
<b>2. Условия и процессы формирования и эволюции большой черноморской экосистемы</b> .....	88
2.1. Особенности изменчивости гидрологических и биооптических характеристик на поверхности Черного моря по данным спутниковых и контактных измерений (Ю.В. Артамонов, В.Н. Белокопытов, Е.А. Скрипалева).....	88
2.2. Условие стабильного термодинамического состояния придонного пограничного слоя в Черном море (А.С. Самодуров).....	116
2.3. Пространственно-временная изменчивость частоты плавучести, вертикальной структуры свободных внутренних волн и температуры поверхности Черного моря (А.Е. Букатов, М.В. Бабий, В.Н. Белокопытов, Е.А. Павленко).....	126
2.4. Сезонная изменчивость распределения прозрачности в верхнем слое глубоководной части Черного моря (А.С. Кукушкин).....	143
2.5. Исследование роли атмосферных аэрозолей в формировании полей природной и техногенной радиоактивности Черного моря (Г.Ф. Батраков, Т.В. Чудиновских, Т.М. Иванова, А.П. Арбузова, Д.А. Кременчуцкий, В.В. Семенов).....	160
<b>3. Регуляционные процессы и кризисные явления в бассейне Черного моря</b> .....	187
3.1. Кризисные явления природного и антропогенного происхождения в Черноморском регионе (С.Ф. Доценко, В.Н. Еремеев, Е.А. Годин).....	187
3.2. Долгопериодные изменения гидрологического режима Черного моря: устойчивое состояние и климатические сдвиги (В.Н. Белокопытов).....	203
3.3. Многолетняя изменчивость состояния экосистемы Черного моря по оптическим данным (В.И. Маньковский).....	223
3.4. Многолетняя и сезонная изменчивость содержания взвешенного	242

органического вещества в верхнем слое в глубоководных районах Черного моря ( <i>А.С. Кукушкин</i> ).....	
3.5. Оценка устойчивости цикла углерода в морской среде ( <i>О.Г. Моисеенко, Н.А. Орехова</i> ).....	264
3.6. Региональные особенности, устойчивость и эволюция биогеохимической структуры вод Черного моря ( <i>С.К. Коновалов, В.Н. Еремеев</i> ).....	273
3.7. Антропогенная эвтрофикация и ее влияние на состояние экосистемы пелагиали Черного моря ( <i>О.А. Юнев</i> ).....	300
3.8. Влияние рыбного промысла на устойчивость экосистемы Черного моря ( <i>В.С. Латун</i> ).....	331
<b>Заключение</b> .....	354

## 1.2. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОРСКИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Анализ вопросов в области океанографии и экологии Черного моря часто требует привлечения дополнительной информации, необходимой для выяснения условий, в которых развивались процессы в морской среде. Это информация о рельефе дна, о расположении и расходах воды впадающих в море рек, о ветровых полях, данные гидрометеорологических наблюдений на станциях и т.д. Получившие широкое распространение геоинформационные системы (ГИС) позволяют осуществлять поиск и представление разнородной информации для комплексного анализа в различных областях. Однако ГИС, в их классическом виде, ограничены представлением информации предварительно загруженной в систему. Другим инструментом являются информационно-аналитические системы, которые включают в себя не только информацию, но и инструменты для анализа этой информации или ее использования в различных расчетах и моделях. Такие системы активно развивались в последние годы в рамках национальных и международных проектах в Морском гидрофизическом институте НАН Украины.

### **Геоинформационная система «Гидрометеорология Черного и Азовского морей».**

Для Гидрометслужбы Украины была создана ГИС "Гидрометеорология Черного и Азовского морей" с целью обеспечения быстрого поиска и визуального представления архивной гидрометеорологической информации. Система состоит из банка данных и программной оболочки для работы с информацией широкого пользователя. Система не использует готовые ГИС-продукты и представляет собой самостоятельную разработку, выполненную с учетом специфики предметной области.

Основные источники информации, включенные в ГИС – данные наблюдений на 64 морских и устьевых гидрометеорологических станциях и постах, данные океанографических съемок и архивные синоптические карты. В список представляемых параметров входят: температура и соленость воды, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, направление и скорость ветра, облачность, осадки, уровень моря, волнение, морские течения. Период наблюдений колеблется от 10 до 100 лет в зависимости от местоположения. ГИС обеспечивает доступ к данным с различной степенью статистической обработки: первичные, среднесуточные, среднemesячные, среднегодовые, климатические.

В качестве картографической основы использовались навигационные карты масштаба 1:500 000, для отдельных районов с большой изрезанностью береговой линии применялись более подробные карты и планы. На карту можно накладывать такие географические слои как: рельеф суши и морского дна, границы стран, экономических зон и территориальных вод на море, названия населенных пунктов, рек, заливов, мысов, лиманов и других географических объектов. Предусмотрены возможности увеличения выбранного участка карты,

измерения расстояний между точками, вычисления текущего масштаба и географических координат курсора. Предоставляется возможность поиска и выделения на карте любого из 850 географических объектов побережья, занесенных в информационную систему. На карту можно нанести схему расположения гидрометеорологической сети на побережье и в устьях рек, выбрать станцию и получить справочную информацию о составе наблюдений, количестве информации в базе данных, физико-географическое описание, историю станции.

Одна из основных функций данной ГИС – визуальное представление временных рядов гидрометеорологических элементов в фиксированных точках или на определенной площади, а также пространственных распределений (рис. 1.2.1). Это могут быть регулярные продолжительные наблюдения на береговых станциях, регулярные непродолжительные измерения в море на многосуточных станциях и автономных буйковых станциях (АБС), нерегулярные продолжительные наблюдения в «квадратах» моря во время проведения океанографических съемок и стандартных разрезов.

При просмотре временных рядов обеспечивается наложение графиков различных элементов или различных станций, изменение масштаба, наложение сезонного хода разных лет на один график, настройка вида графика, scrolling, редактирование исходных данных, экспорт данных в текстовые (ASCII) файлы. Непрерывный график многолетнего хода можно построить как для всего ряда, так и для отдельного месяца года. Для выбранных рядов автоматически рассчитываются основные статистические характеристики, повторяемость и обеспеченность. Пользователь может пересчитывать статистические характеристики, задавая различные периоды времени и градации, выявлять аномалии и опасные явления (рис. 1.2.2).

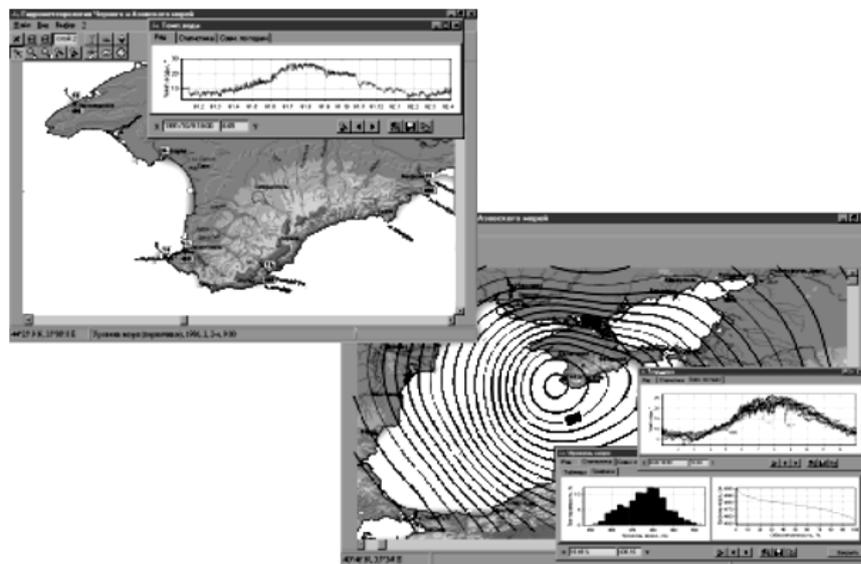


Рисунок 1.2.1. Представление различной гидрометеорологической информации в виде временных рядов и пространственных распределений.

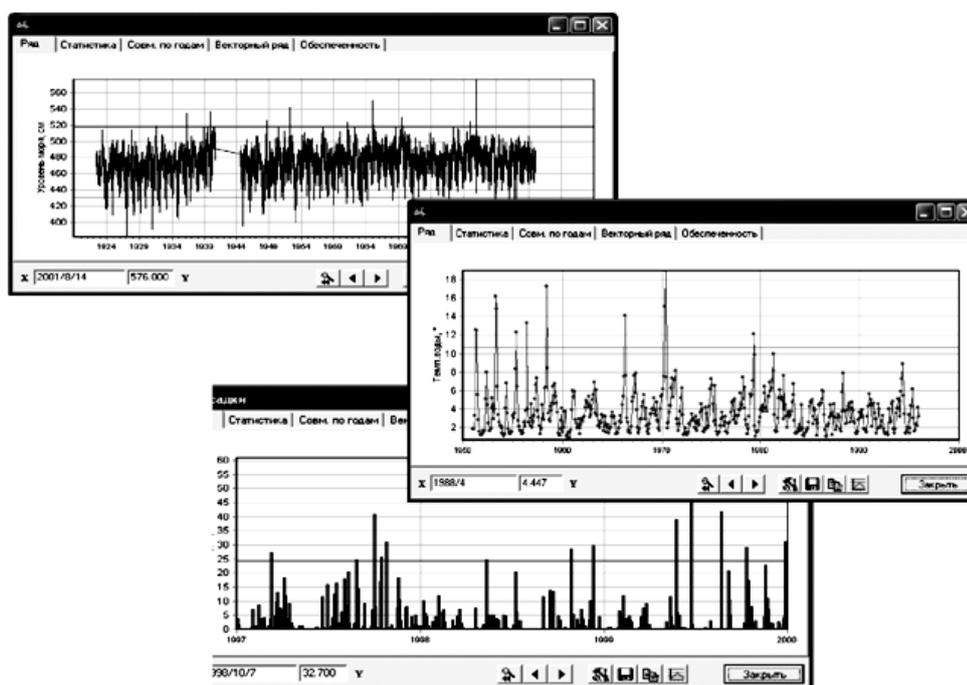


Рисунок 1.2.2. Расчет статистических характеристик, выявление аномалий и опасных явлений.

Пространственное распределение может быть представлено в цифровом виде, нанесенном на карту в определенных точках, изолиний (площадные съемки, синоптические карты, рис. 1.2.1), векторов (карты ветра, течений, волнения). Для комплексного анализа гидрометеорологических полей предусмотрена возможность применения одного из основных принципов ГИС-технологий – работу со слоями.

Одна из задач ГИС – работа с океанографическим банком данных. Выбор и просмотр океанографических съемок осуществляется посредством выбора в списках рейсов научно-исследовательских судов, отсортированных либо в хронологическом порядке, либо по названиям судов и номерам рейсов. Также реализована выборка океанографических станций и рейсов, отвечающих заданным критериям времени и координат. Предусмотрено выделение различных рейсов различными цветами и символами, построение маршрута судна и средней скорости судна между гидрологических станциями, выбор на экране отдельных станций и просмотр вертикальных профилей океанографических элементов: температуры, солености, плотности, скорости звука, частоты Вьяйсяля-Брента, вертикальных градиентов, TS-кривых и т.д.

Для удобства поиска и выбора необходимых материалов ГИС предлагает информацию о наличии ее в банке данных в виде системы меню, которое может быть отсортировано в различной последовательности. Такой подход позволяет упростить формулирование сложных запросов для поиска информации различного типа, хранящейся в различных базах данных. Так, пользователя может интересовать скорость ветра в конкретный день, независимо от того,

была ли она измерена на береговой станции, на судне или рассчитана по синоптической карте. В другом случае пользователя могут интересовать все срочные ряды температуры воды в летние месяцы для изучения сгонных явлений и сравнить их с климатическими значениями. Разработанная в данной ГИС система меню позволяет реализовывать подобные задачи без какого-либо специального языка запросов, часто используемых в работе с системами универсальных баз данных (СУБД).

### **Информационная система о верхней границе сероводородной зоны в Черном море.**

Отличительной особенностью Черного моря является наличие относительно тонкого верхнего кислородного слоя толщиной 100 – 150 м и нижележащего мощного сероводородного слоя, достигающего дна. Анаэробный слой составляет около 80% объема вод Черного моря, в нем отсутствуют живые организмы за исключением некоторых видов бактерий. Хотя предположения о возможном поднятии границы сероводородной зоны к поверхности моря носят дискуссионный характер, уменьшение глубины исчезновения кислорода и появления сероводорода показано при анализе имеющихся результатов многолетних наблюдений [1]. В любом случае, подъем границы анаэробных вод ведет к катастрофическим последствиям для экосистемы Черного моря, что определяет как научную, так и практическую значимость информационной системы о верхней границе сероводородной зоны в Черном море.

Для исследований динамики анаэробной зоны в Черном море необходимо принимать во внимание не только изменения концентрации сероводорода на определенных глубинах, но также пространственную и временную изменчивость положения границы этого слоя. Предыдущие оценки динамики верхней границы сероводородного слоя большей частью основывались на ограниченном наборе данных. Благодаря последним международным проектам, таким как MEDAR/MEDATLAS II, массив данных наблюдений за кислородом и сероводородом был значительно увеличен, что позволяет делать более надежные оценки.

Информационная система для исследования верхней границы сероводородной зоны была разработана в МГИ НАН Украины. Основные задачи информационной системы:

- сбор и хранение доступной информации о  $O_2$  и  $H_2S$ -зонах;
- контроль качества данных;
- создание специализированных баз данных по  $H_2S$  и  $O_2$ ;
- создание цифровых карт и атласов.

Глубины верхней границы  $H_2S$ -слоя и нижней границы кислородной зоны определялась путем аппроксимации исходных профилей полиномами 5-й степени с помощью метода наименьших квадратов и последующей экстраполяции до заданной концентрации. Глубина с концентрацией  $0,05 \text{ ml/l} \pm 0.005$  принималась за верхнюю границу  $H_2S$ -слоя, концентрация  $0.1 \text{ ml/l} \pm 0.05$  считалась нижней границей аэробных вод [2].

Данные были осреднены по десятилетним периодам и по сезонам за весь период наблюдений. Значения границ слоев с отклонениями более  $3\sigma$  были

отфильтрованы. Для построения карт использовались средние значения, рассчитанные в квадратах 40'×60'.

Цифровой атлас границ аэробной и сероводородной зон (пример карты на рис. 1.2.3) состоит из трех частей:

- положение верхней границы  $H_2S$ -зоны;
- положение нижней границы кислородной зоны;
- глубина изопикны  $\sigma = 16.20$ .

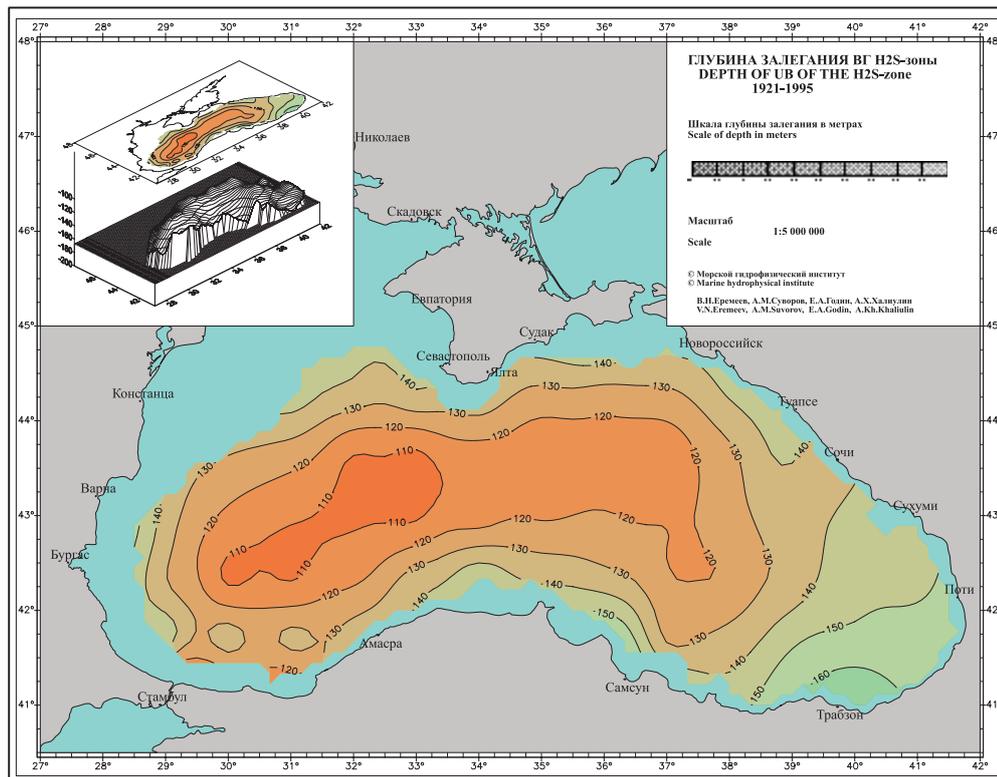


Рисунок 1.2.3. Глубина верхней границы сероводородной зоны в Черном море за период 1921 – 1995 гг.

Данная информационная система позволяет выявить долговременные тенденции изменения положения границы анаэробных вод. На рисунке 1.2.4 изображен временной ход средней глубины верхней границы сероводородной зоны. Размах колебаний составляет 24 м от начала 1940-х до конца 1980-х гг., скорость уменьшения глубины верхней границы  $H_2S$ -зоны была максимальной в 1980 – 1990 гг. Дальнейшие изменения в положении этой границы определялись совместным влиянием результатов антропогенной эвтрофикации и изменения локального климата [1].

#### Программное обеспечение для моделирования химической структуры вод морских бассейнов.

Черное море является природной лабораторией для исследования аэробных и анаэробных биогеохимических процессов. Оно также

репрезентативно для изучения реакции морских бассейнов на изменения климата и антропогенной эвтрофикации. Несколько работ было посвящено численному моделированию процессов, определяющих биогеохимическую структуру аэробного/анаэробного слоя в Черном море [3, 4]. Все они были ограничены переходным слоем и не рассматривали общий окислительно-восстановительный баланс.

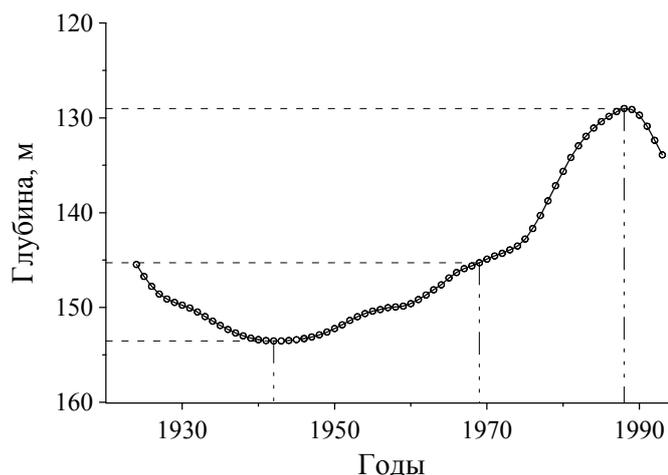


Рисунок 1.2.4. Временной ход средней глубины верхней границы сероводородной зоны в Черном море за период 1924 – 1995 гг. (штриховые линии представляют минимальное значение 129 м в 1988 г., максимальное значение 153 м в 1942 г. и среднее – 145 м в 1970 г.).

Для создания более полной модели [5] были учтены предыдущие достижения в моделировании физических процессов обмена и биогеохимических процессов [3, 4], рассматривалась практически вся толща вод – от ядра холодного промежуточного слоя (ХПС) до дна. Модель включает параметризацию основных биогеохимических процессов для 16 компонент, включая взвешенный и растворенный азот, нитраты, нитриты, аммоний, серу, сульфиды, взвешенные и растворенные формы марганца и железа. Биогеохимические процессы были стехиометрически согласованы, скорости процессов были ограничены концентрациями реагентов, бюджет каждого компонента был замкнут. Это позволило численно воспроизвести биогеохимическую структуру Черного моря и исследовать вклад отдельных процессов в общее распределение и окислительно-восстановительный баланс.

Для реализации модели, проведения численных экспериментов и анализа результатов была создана программная оболочка (рис. 1.2.5), которая использовалась также и для расчетов биогеохимической структуры вод впадины Кариако в Карибском море.

Численные эксперименты показывают, что наблюдаемое уменьшение концентрации кислорода в ХПС Черного моря от ~300  $\mu\text{M}$  в 1993 до ~200  $\mu\text{M}$  в 2001 г. может объяснить наблюдаемые изменения в структуре оксиклина и положении верхней границы субкислородной зоны в этот период (рис. 1.2.6а). Двукратное увеличение потока органического вещества на верхней границе

приводит к изменениям биогеохимической структуры вод Черного моря (рис. 1.2.6б), подобные тем, что наблюдались в 1980-х гг. Увеличение потока органического вещества приводит к поднятию границы субкислородной зоны и увеличению максимального содержания нитратов. В случае продолжительного отсутствия нижнего босфорского течения, субкислородная зона исчезает (рис. 1.2.6в). Граница сероводородной зоны поднимается вверх, достигая оксиклина, и формирует новую биогеохимическую структуру, подобную тем аэробным/анаэробным системам, где субкислородная зона отсутствует. Данная модель подтверждает, что существование субкислородной зоны в Черном море и в других аэробных/анаэробных системах возможно благодаря интрузии вод, обогащенных кислородом.

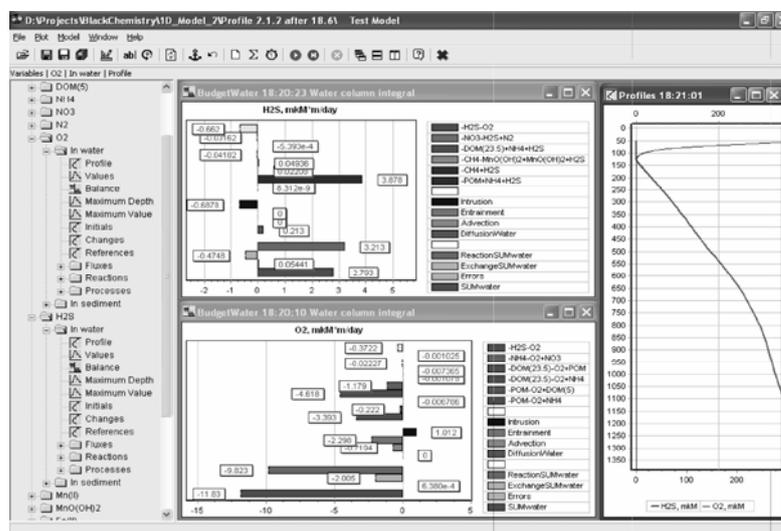


Рисунок 1.2.5. Пример интерфейса модели вертикальной биогеохимической структуры морского бассейна для компонент  $O_2$  и  $H_2S$  в Черном море.

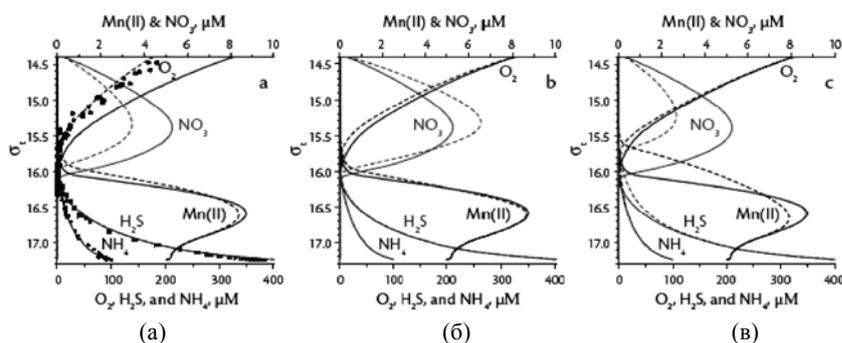


Рисунок 1.2.6. Рассчитанные по модели изменения биогеохимической структуры (штриховые линии) и начальные профили (сплошные кривые): (а) вследствие климатических изменений концентрации кислорода в ХПС; (б) при двукратном увеличении потока органического вещества; (в) при отсутствии кислорода в Босфорском потоке.

Еще одним примером гидрохимической модели служит модель для расчета солевого баланса и солевого состава Аральского моря (рис. 1.2.7) с учетом процессов гидратации и седиментации, которая может использоваться для анализа догоперiodных изменений в солевом составе любого морского бассейна, а также отдельных заливов и лиманов с ограниченным водообменом.

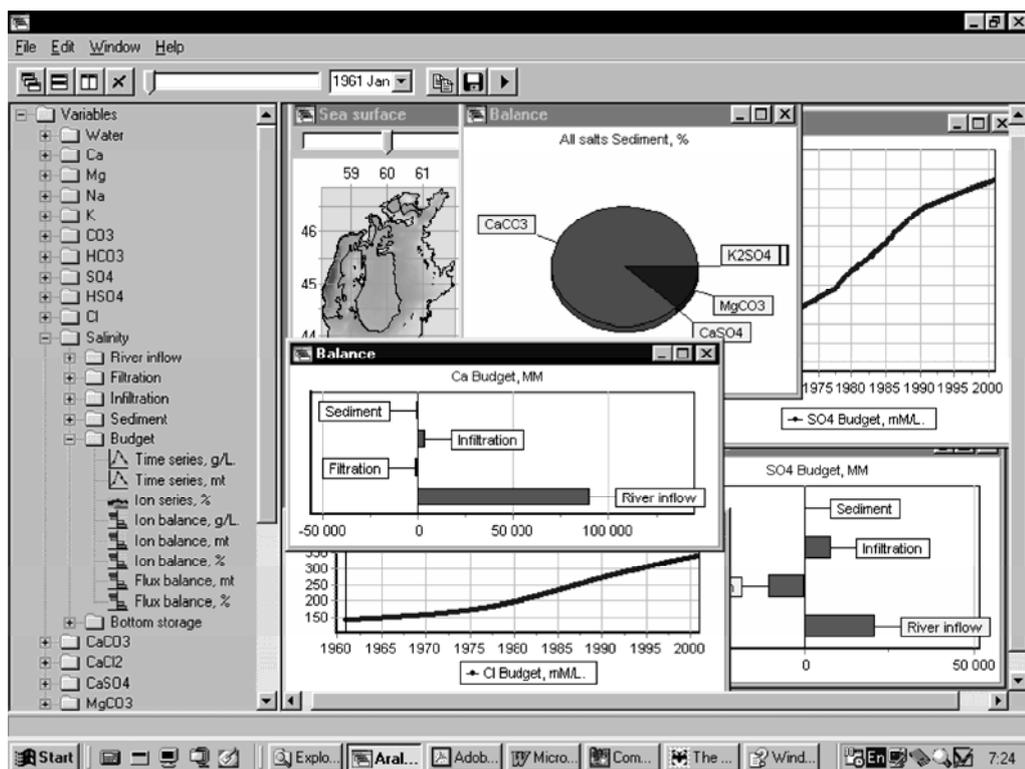


Рисунок 1.2.7. Пример интерфейса гидрохимической модели солевого состава морской системы (на примере Аральского моря).

### Информационная система для моделирования цунами в Черном море.

Цунами в Черном море – достаточно редкое явление. За последние 100 лет оно наблюдалось 9 раз. Это явление может произойти в любом месте побережья, оно вызывается подводными землетрясениями, но некоторые из них связаны с землетрясениями на суше. Из исторических описаний следует, что цунами в Сухуми (20 г. н.э.), Херсонесе (Севастополе) (103 г.), Варне (543 г.), Босфоре (557 г.), Евпатории (1341 г.), Форосе (1427 г.), на севере Турции (1598 г.) были катастрофическими, высота подъема уровня достигала 2–3 м (рис. 1.2.8), что приводило к большим наводнениям и разрушениям.

Исследовать характеристики цунами по инструментальным записям без специального компьютерного анализа достаточно сложно, т.к. колебания уровня моря имеют неоднородную структуру, в частности, обусловленную распространением волновых пакетов. Была создана специальная

информационная система, которая осуществляет оцифровку мареограмм, оценку частотных спектров, выборку энергонесущих колебаний и расчеты времени распространения и продолжительности цунами для различных пунктов побережья (рис. 1.2.9).

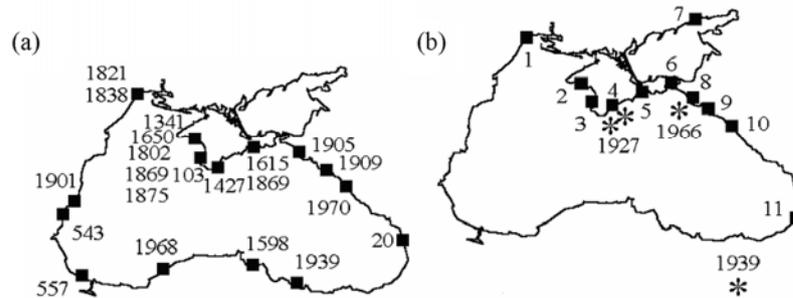


Рисунок 1.2.8. (а) Районы (■) и годы событий цунами в Черном море по историческим описаниям. (б) Эпицентры землетрясений, вызывавших цунами (\*) и пункты, где были произведены инструментальные записи цунами (■).

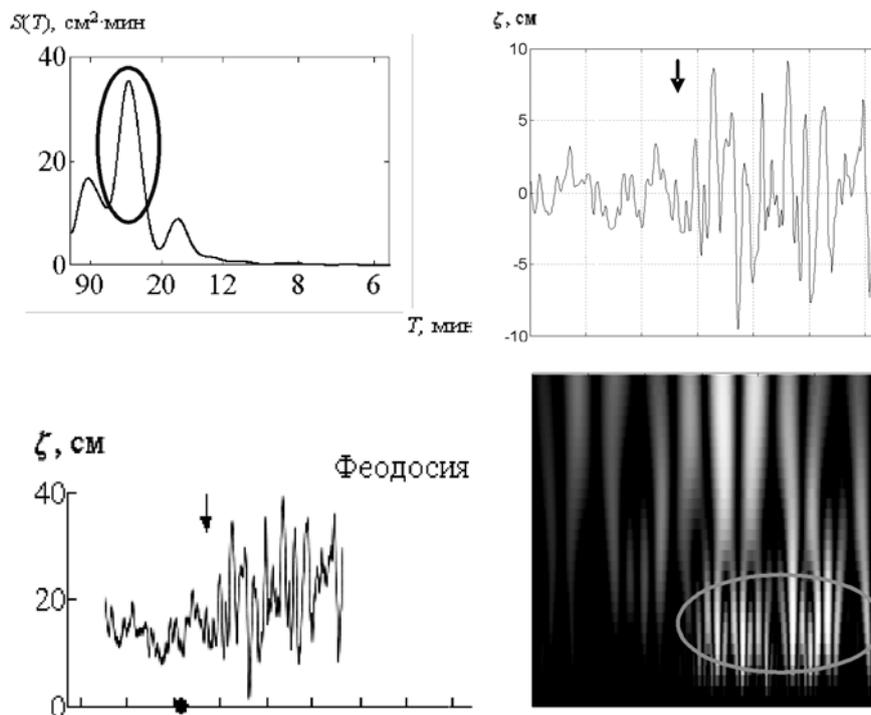


Рисунок 1.2.9. Пример обработки мареограммы и выделения явления цунами для уровня поста Феодосия.

Важной задачей является расчет распространения цунами. С помощью двумерной длинноволновой модели [6] с параметрами из [7, 8] были получены высоты цунами в 0.3, 1.2 и 3.6 м в ближайших точках побережья от центров

подводных землетрясений вблизи Крыма с магнитудами  $M = 6.5, 7.0, 7.5$  соответственно. Другими словами, существует реальная опасность для Крымского побережья при магнитуде землетрясения  $> 7$ . Оценки времени распространения цунами через Черное море в меридиональном и широтном направлении показывают, что уже через 5 – 10 мин. произойдет опасный подъем уровня моря в ближайшем от эпицентра пункте побережья (рис. 1.2.10).

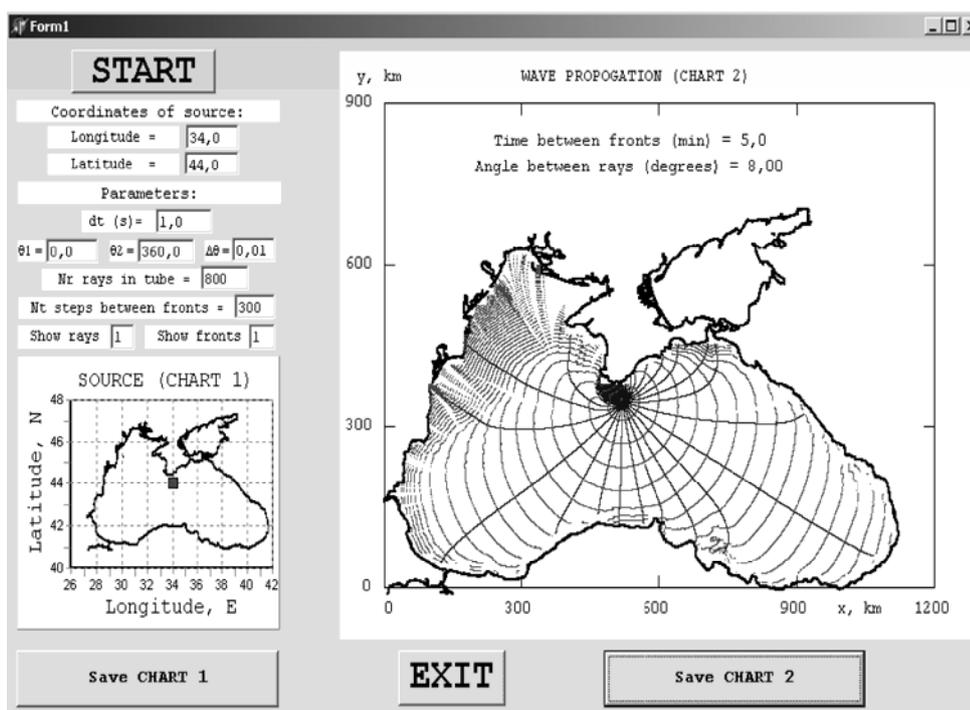


Рисунок 1.2.10. Пример расчета распространения цунами при подводном землетрясении у Крымского побережья.

#### Список литературы

1. *Еремеев В.Н., Коновалов С.К.* К вопросу о формировании бюджета и закономерностях распределения кислорода и сероводорода в водах Черного моря. *Морской Экологический Журнал*, 2006, No3, 5-30.
2. *Novoselov A.A.* The problem of determination of the oxic/anoxic interface in the Black Sea. / In *Complex Oceanographic Research of the Black Sea*, Utrecht, 1992. – P. 97 – 101.
3. *Yakushev E.V.* Mathematical modeling of oxygen, nitrogen, sulfur and manganese cycling in the Black Sea. / in: *NATO TU-Black Sea Project Ecosystem Modeling as a Management Tool for the Black Sea, Symposium On Scientific Results*, L. Ivanov and T. Oguz, eds., NATO ASI Series 2/47, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1998 – P. 373 – 384.

4. *Oguz T., Murray J.W. and Callahan A.E.* Modeling redox cycling across the suboxic-anoxic interface zone in the Black Sea. // *Deep-Sea Research I.* – 2001 – Vol. 48. – P. 761 - 787.
5. *Konovalov S.K., Luther G.W., Friederich G.E., Nuzzio D.B., Tebo B.M., Murray J.W., Oguz T., Glazer B., Trouwborst R.E., Clement B., Murray K.J. and Romanov A.S.* Lateral injection of oxygen with the Bosphorus plume fingers of oxidizing potential in the Black Sea. // *Limnology and Oceanography.* – 2003. – Vol. 48. – P. 2369 - 2376.
6. *Доценко С.Ф.* Оценки волн цунами вдоль южного берега Крыма. // *Морской гидрофизический журнал.* – 2005. – №.3. – С. 3 – 10.
7. *Пелиновский Е.Н.* Нелинейная динамика волн цунами. – Горький: Институт прикладной физики, 1982. – 226 с.
8. *Уломов В.И., Полякова Т.П., Шумилина Л.С., Чернышева Г.В. и др.* Опыт картирования очагов землетрясений. – Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, Вып. 1. – М.: ОИФЗ РАН, 1993. – С. 99 – 108.