

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
МОРСЬКИЙ ГІДРОФІЗИЧНИЙ ІНСТИТУТ**

Любарцева Світлана Петрівна

УДК 551.464:550.42

**ДОСЛІДЖЕННЯ СІРКОВОДНЕВОЇ ЗОНИ ЧОРНОГО МОРЯ
МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

(спеціальність 01.04.12 - геофізика)

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук**

Севастополь, 1997



00738249 (X)

Ав 38.690

Робота виконана в Морському гідрофізичному інституті
Національної академії наук України.

Науковий керівник : доктор фізико-математичних наук,
академік НАН України В.І. Беляєв,
Морський гідрофізичний інститут НАН України,
завідуючий відділом оптики і біофізики океану.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор І.Є. Тімченко,
Морський гідрофізичний інститут НАН України,
завідуючий відділом динаміко-стохастичного моделювання океану;

доктор фізико-математичних наук,
професор А.Ф. Хрустальов,
Севастопольський Державний Технічний університет,
професор кафедри математичної фізики.

Провідна установа: Інститут біології Південних морів
Національної академії наук України.

Захист відбудеться: "20" листопада 1997 р. в 14 годині 00 хв.
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.01.02
при Морському гідрофізичному інституті НАН України

Адреса: 335000, Севастополь, вул. Капітанська, 2,
Морський гідрофізичний інститут НАН України.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці
Морського гідрофізичного інституту НАН України,
Адреса: Севастополь, вул. Капітанська, 2.

Автореферат розісланий "20" жовтня 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 11.01.02
при Морському гідрофізичному інституті НАН України
доктор фізико-математичних наук:

О.М. Суворов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

В 1990-х роках в Чорному морі спостерігалися випадки погіршення кисневого режиму фотичного шару вод, вихід сірководню в поверхневі прошарки води (до 60м в пелагіалі) та утворення порівняно великих сірководневих зон в літні місяці на північно-західному шельфі моря. Ці фактори привернули серйозну увагу до проблеми сірководневої зони моря, як суттєвої загрози для рибопромислової та рекреаційної цінності Чорного моря.

Погіршення екологічної ситуації стимулювало в восьмидесяті роки посилення інтенсивності наукових досліджень по проблемі. Були проведені багаточисленні експедиції, цільові широкомасштабні експерименти. За допомогою сучасних методів планування натурних експериментів, прогресивних технологій відбору і аналізу проб був одержаний обширний масив даних. Це сприяло виявленню раніше невідомих особливостей і закономірностей трансформації елементів екосистеми в різних фізико-хімічних і біологічних умовах. Результати теоретичних і експериментальних досліджень опубліковані в наукових роботах, число яких продовжує рости. З їх числа відмітимо дві монографії, які займають особливе положення по ступеню узагальнення та наукової аргументації одержаних висновків: "Чорне море. Зона взаємодії аеробних і анаеробних вод" (1993) О.О. Безбородова і В.М. Єремєєва і "Сучасний стан сірководневої зони Чорного моря (1960-1986 роки)" (1989) А.І. Рябініна і В.Н. Кравця. Суттєвий прогрес в дослідженні сірководневої зони поставив завдання якісного і кількісного співставлення експерименту з існуючими теоретичними викладками. Таке співставлення вимагає застосування методів математичного моделювання, оскільки багато величин, які фігурують в висновках теорії, безпосередньо в експерименті не спостерігаються і не вимірюються. Метод математичного моделювання геофізичних, геохімічних і пов'язаних з ними мікробіологічних процесів, які мають місце в сірководневій зоні Чорного моря був розвинутий в роботах В.І. Беляєва і О.Є. Совга (1985, 1987, 1991, 1997), Е.В. Stanev (1989), Т.А. Айзатуліна з колегами (1984, 1989, 1990), М.П. Булгакова, Ю.М. Голубева та А.Ю. Куфтаркова (1990), Є.В. Якушева, Л.М. Неретина та І.І. Волкова (1991, 1992), В.Л. Lewis, W.M. Landing (1991).

За допомогою математичного моделювання можна провести детальний кількісний аналіз механізмів, які формують екосистему, оцінити роль окремих факторів, що на неї впливають, виявити нові властивості та закономірності функціонування екосистеми сірководневої зони Чорного моря.

Ще одна функція, яку виконує математичне моделювання при дослідженні екосистем - це прогноз. В випадку, коли модель добре

“налагоджена”, ґрунтується на надійному теоретичному фундаменті, успішно пройшла перевірку критерієм практики, прогноз може бути зроблений з високою точністю. Появляється можливість надійно про- рочити тенденції еволюції екосистеми сірководневої зони Чорного мо- ря.

ЗВ'ЯЗОК З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПРОЕКТАМИ, ТЕМАМИ

Дисертаційна робота є узагальненням досліджень, які проводи- лися у відповідності з плановою тематикою інституту в рамках проєктів “Чорне море” (№ ГР 0195U012256), “Динаміка екосистем” (№ ГР 0194U044413) Національної програми досліджень і використання ре- сурсів Азово-Чорноморського басейну та теми “Екотон” (№ ГР 0193U024765), включеної в відомчий план Національної академії наук України по фундаментальних дослідженнях.

МЕТА РОБОТИ - виявлення і дослідження на основі математич- ного моделювання основних фізичних, геохімічних і біологічних ме- ханізмів функціонування екосистем Чорного моря в умовах зростаю- чих антропогенних навантажень.

ОСНОВНІ НАУКОВІ ЗАВДАННЯ

1. Вдосконалення математичної моделі екосистеми сірководневої зони Чорного моря як діючого інструменту дослідження складного природного феномену.

2. Вивчення за допомогою обчислювальних експериментів впли- ву на екосистему найважливіших геофізичних факторів - параметрів вертикального обміну, а також основного енергетичного потоку - по- току органічної речовини в екосистему.

3. За допомогою математичної моделі екосистеми сірководневої зони оцінити ряд фізичних, хімічних і біологічних елементів екосисте- ми Чорного моря в цілому.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження ґрунтуються на методі математичного моделюван- ня складних морських екосистем, розробленому академіком Національної академії наук України В.І. Беляєвим. Були використані фізичні теорії переносу неконсервативних частинок, розсіювання ви- промінення; теоретичні основи хімічної кінетики, методи математич- ного моделювання динаміки популяції мікроорганізмів. Для вирішення нелінійних систем диференційних рівнянь застосовувались чисельні методи, а також спеціально розроблені методи підвищення ефективності і стійкості різницевих схем.

НАУКОВА НОВИЗНА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

- модернізована математична модель екосистеми сірководневої зони Чорного моря, що описує трансформацію сполук сірки та азоту з врахуванням процесів адвекції та турбулентної дифузії в оксіально-симетричному наближенні;

- результати чисельних експериментів по виявленню впливу параметрів адвективного та турбулентного обміну та потоку органічної речовини в екосистему на її стан;

- модельна оцінка вертикального розподілу сульфатів в екосистемі сірководневої зони Чорного моря;

- модельна оцінка вкладу молекулярної сірки в глибинний мутний шар води в Чорному морі;

- результати математичного моделювання процесів гіпоксії та заморів придонної флори і фауни на північно-західному шельфі Чорного моря, одержані за допомогою адаптації математичної моделі екосистеми сірководневої зони Чорного моря до умов північно-західного шельфу.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Матеріали дисертації розширюють і уточнюють уяву про механізми основних процесів, що формують сірководневу зону Чорного моря. Результати роботи можуть бути використані для комплексного рішення проблеми збереження і оздоровлення екосистеми Чорного моря в цілому. Розроблений і використаний в дисертації підхід може застосовуватися для дослідження аеробно-анаеробних процесів в близьких до чорноморських хіміко-біологічних умовах в широкому діапазоні просторово-часових масштабів і динамічних параметрів.

ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК ЗДОБУВАЧА

В процесі виконання роботи автор дисертації приймав безпосередню участь в постановці завдання, виборі і реалізації чисельних методів, плануванні і проведенні числових експериментів, аналізі і інтерпретації одержаних результатів.

АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати роботи представлялись і доповідались на Міжнародній конференції "Проблеми Чорного моря" (Севастополь, 1992), Міжнародній конференції "Діагноз стану морського середовища Азово-Чорноморського басейну" (Севастополь, 1993), Республіканській науковій конференції "Розвиток досліджень Національної академії наук України в Криму" (Сімферополь, 1993), XII-ому Міжнародному симпозиумі по біогеохімії навколишнього середовища (Ріо-де-Жанейро, 1995). Вони знайшли своє відображення в

звітах по науковим проектам "Чорне море", "Динаміка екосистем", "Екотон". Зміст дисертації висвітлено в 9-ти опублікованих наукових роботах.

СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ РОБОТИ

Дисертація включає вступ, три розділи, заключення, список використаних джерел та два додатки. Вона вміщує 146 сторінок машинопису, включаючи 15 рисунків на 10 сторінках, 35 таблиць на 37 сторінках, список використаних джерел включає 62 найменування.

ЗМІСТ РОБОТИ

У ВСТУПІ розглядаються актуальність дослідження, його зв'язок з науковими програмами, планами, темами, приводиться математична постановка завдання в загальному вигляді, визначаються мета і завдання дисертаційної роботи. Формулюються основні положення, які виносяться на захист, підкреслюється наукова новизна результатів, одержаних в роботі, її практична цінність. Визначається особистий вклад автора.

В ПЕРШОМУ РОЗДІЛІ на основі теоретичних уявлень про геофізичні, геохімічні і біологічні процеси, які протікають в екосистемі сірководневої зони Чорного моря, приведене наукове обґрунтування та описується реалізація вибраного методу дослідження. Здійснюється конструкція математичної моделі екосистеми.

В першому підрозділі приведений критичний огляд транспортних моделей, що описують розподіл сірководню, кисню і інших компонентів екосистеми Чорного моря, визначається місце, яке займає серед них математична модель, яка використовується в даній роботі (див. табл. 1).

Слід підкреслити, що дана робота є логічним наслідком і розвитком роботи В.І. Беляєва і О.Є. Совга (1991) і об'єднує в собі запропонований цими авторами екологічний підхід до математичного моделювання сірководневої зони з врахуванням горизонтального і вертикального фізичних механізмів транспорту, параметризацію циклу азоту разом з циклом сірки, що дозволяє оцінити роль нітратів і нітритів, як електронних акцепторів в реакціях окислення сірководню.

Математична модель екосистеми сірководневої зони Чорного моря розглядається в термінах завдання описання нестационарних полів концентрації неконсервативних домішок. Вона передбачає рішення системи нелінійних параболічних рівнянь другого порядку з граничними і початковими умовами. Описання компонент характеристичного вектора екосистеми приводиться в другому підрозділі. Це вуглець суспендованих органічних речовин, кисень, сірководень, тіосульфати, молекулярна сірка, амоній, нітрати, нітрити. бактерії:

амонійфіцируючі, денітрофіцируючі, нітрофіцируючі, сульфатредуценти, тіонові. Взаємодія між компонентами характеристичного вектора ілюструється процес-орієнтованою схемою.

Таблиця 1. Огляд транспортних моделей, які описують розподіл сірководню в Чорному морі

Модель	Компоненти моделі	Розмірність	Врахування транспортних механізмів			
			адвекція	турб.диф.	хім.реакц.	біохім.реакц.
Stanev	O ₂ , H ₂ S	3	+	±	-	-
Айзатулін і ін.	O ₂ , HS ⁻ , S _n ²⁻ , SO ₃ ²⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻	1	-	±	+	-
Беляев, Совга	O ₂ , H ₂ S, S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻ , C _{орг} , TB, SRB	1	-	±	+	+
Якушев і ін.	O ₂ , H ₂ S, SO ₃ ²⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻	1	-	±	+	+
Дана робота	O ₂ , H ₂ S, C _{орг} , S ₂ O ₃ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ , S ⁰ , NH ₄ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , TB, AB, NB, SRB, DNB	2	+	+	+	+

Список окорочень в таблиці 1.

Врахування механізму: + - врахований;
± - врахований частково;
- - не врахований.

Бактерії: AB - амонійфіцируючі;
DNB - денітрофіцируючі;
NB - нітрофіцируючі
SRB - сульфатредуценти;
TB - тіонові.

В третьому підрозділі описується наближений метод рішення системи рівнянь моделі, приводиться наукове обґрунтування вибору модельного об'єму і схеми водообміну. Розглядається аксіально-симетрична задача. Як модельний об'єм був вибраний циліндр висотою 2000 м, радіусом 200 км. Цей об'єм розбивається по горизонталі

на три концентричні зони: центральну (радіус 100 км), проміжну (радіус 150 км) і периферійну, а також на 44 шари по вертикалі з градаціями: : 0, 20, 35, 50, 60, 68, 75, 80, 85, 90, 95, 100, 105, 110, 115, 120, 125, 130, 135, 140, 145, 150, 155, 160, 165, 170, 175, 182, 190, 200, 210, 225, 245, 270, 300, 340, 400, 500, 630, 800, 1000, 1400, 1600, 1800, 2000 м, представляючи таким чином систему з 132 елементарних об'ємів, або боксів. Для кожного боксу вираховуються середні концентрації кожної компоненти екосистеми. Зміна концентрацій здійснюється внаслідок хімічних і опосереднених бактеріями реакцій між компонентами, а також за рахунок водообміну між сусідніми боксами. Вертикальний і горизонтальний обмін водними масами здійснюється за допомогою адвекції та турбулентної дифузії. Основним правилом, яке використовується для вирахування адвективних потоків, є рівняння нерозривності (сума всіх водних потоків для кожного боксу рівняється нулю). Враховуються загальне підняття водних мас, викликане водообміном через Босфор, стік річок, опади і випаровування. Рівняння водного балансу виписується в відповідності до даних Б.О. Скопінцева. В оксіально-симетричному наближенні на верхній границі модельного об'єму задається умова відсутності потоку для всіх компонент окрім вуглецю суспендованих органічних речовин (задається потік) і кисню (задається коцентрація). На нижній границі задаються потоки сірководню і амонію, гранична умова третього роду для вуглецю суспендованих органічних речовин, для інших компонент - умова відсутності потоку. Горизонтальна і вертикальна адвекція та турбулентна дифузія розглядаються окремо. Виводяться формули для кінцево-різницевої апроксимації рівнянь моделі, які описують середню концентрацію кожної компоненти екосистеми в будь-якому боксі. Зниження розмірності з трьох в загальній постановці задачі до двох в даній дисертації дає деяку перевагу. По-перше, в певній мірі знімається невизначеність, пов'язана з відсутністю даних про просторовий розподіл кофіцієнту турбулентної дифузії, швидкості течії, функцій потужності джерел. По-друге, в залежності від межі дослідження можна легко змінити масштаб модельного об'єму або перейти від оксіальної симетрії до трансляційної, наприклад, для прибережних районів. По-третє суттєво підвищується швидкість розрахунків.

Функції потужності джерел, параметризація яких приводиться в *четвертому підрозділі*, описують кінетику хімічних реакцій і біологічні процеси в математичній формі. При їх параметризації необхідно відобразити умови протікання і направленість складних природних процесів, забезпечивши при цьому спільність, наглядність і простоту алгоритму. В дисертації ця мета досягається шляхом використання лінійних кінетичних схем 1-го і 2-го порядків для описання хімічних рівнянь і рівнянь типу Михаеліса-Ментен - для моделювання динаміки

популяцій бактерій. В моделі параметризуються процеси сульфатредукції, амоніфікації, нітрофікації, денітрофікації (тіо- і непрямой в тому числі), хімічного окислення сірководню, окислення тіоною флорою сірководню, тіосульфатів, молекулярної сірки.

В п'ятому підрозділі параметризуються вертикальні профілі кофіцієнту вертикальної турбулентної дифузії і вертикальної швидкості. Слід підкреслити особливу важливість цих геофізичних факторів, які визначають само існування сірководневої зони Чорного моря. Приводиться короткий перелік теоретичних і експериментальних робіт по їх оцінці (Богданова, 1959, Беляєв 1973, Монін і Озмідов 1978, Богуславський і спів. авт. 1980, 1990, Lewis, Landing 1991, Єремеев, Кушнір 1996). Відмічається складність такого типу експериментальних оцінок, яка в більшості витікає з некоректності їх постановки, і вимагає спеціальних методів рішення.

В шостому підрозділі обмірковуються питання підвищення стійкості і ефективності чисельної схеми, яка використовується. Причина нестійкості витікає з того, що стан екосистеми визначається різними по своїй природі процесами, які мають просторові і часові масштаби, що відрізняються на декілька порядків. Ідея побудови стійкого наближеного рішення задачі базується на використанні додаткової апріорної інформації - про невід'ємність рішення у всьому модельному об'ємі. Для забезпечення стійкості обчислювальної схеми був реалізований метод автоматичного вибору кроку в часі. Запропонований метод є ефективним лише в тому випадку, коли характерні відрізки часу модельованих процесів дуже мало відрізняються один від одного. Для системи рівнянь зі значно відмінними релаксаційними відрізками часу розроблена спеціальна процедура підвищення ефективності обчислювальної схеми.

В ДРУГОМУ РОЗДІЛІ описуються постановка завдання і результати чисельних експериментів з використанням математичної моделі екосистеми сірководневої зони Чорного моря. По ступеню близькості результатів розрахунків і вимірювань можна судити про відповідність теоретичних викладок моделі реальним процесам, що протікають в екосистемі.

В першому підрозділі зформована в першому розділі дисертації математична модель використовується для розрахунку стаціонарного розподілу компонент екосистеми. Такий стан називається в роботі базовим, а його розрахунок - розрахунком базового варіанту: йому відповідає базовий набір параметрів, що задаються: глибина шару мінімальних значень кофіцієнта вертикальної турбулентної дифузії 60, 80, 100 м; товщина цього шару 10, 12, 15 м; мінімальні значення кофіцієнта вертикальної турбулентної дифузії 0.03, 0.06, 0.09 cm^2/c ; його значення - на глибині 20 м - 3.0 cm^2/c ; на глибині 200 м - 1.5 cm^2/c ; при дні - 3.0 cm^2/c . Кофіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії 7.5

10^5 см²/с. Значення вертикальної швидкості: на глибині 20 м дорівнює $4 \cdot 10^{-3}$ см/с (додатне значення відповідає підйому в центрі модельного об'єму), з глибини 200 м і до дна дорівнює 10^{-5} см/с. Швидкість гравітаційного осідання суспензії $3 \cdot 10^{-2}$ см/с, потік органічної речовини в систему - 0.2; 0.4; 0.8 гС/(м²·добу). Результати розрахунку проаналізовані і співставлені, де це можливо, з експериментальними. Відмічається, що в цілому результати співставлення задовільні. Особливістю знайденого стаціонарного рішення є існування проміжного шару, в якому концентрації компонент екосистеми, або їх градієнти досягають екстремальних значень, так званий хемоклін. Хемоклін має впорядковану тонку структуру. Модельний розрахунок на відміну від останніх експериментальних даних показав наявність шару співіснування кисню і сірководню (5- 15 м). Шару кисневого дефіциту (т. з. апоксис-ансульфідич) одержати не вдалося. Саме в цьому, як відмічено в роботі, заключається проблема, на якій потрібно зконцентрувати подальші зусилля.

Мета обчислювального експерименту, описаного в другому підрозділі - встановити, як на екосистему впливає зміна профілю коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії. Виходячи з раніше встановленого факту (Беляєв 1985, Айзатулін і Леонов 1990) про це, що "... моделі з постійними по вертикалі значеннями коефіцієнту обміну не можуть використовуватися для прогнозних оцінок поведінки сірководневої зони..." окремо змінювались - мінімальні значення коефіцієнту вертикальної турбулентної дифузії, глибина шару мінімальних значень, його товщина. Результати порівнювались з розрахунком базового варіанту. Мінімальні значення коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії регулюють потік кисню з поверхневого шару в глибину. Зокрема, зменшення цих параметрів веде до ослаблення потоку, і в цьому випадку хемоклін піднімається до поверхні зі збереженням куполоподібної просторової структури. Роста об'єм анаеробної зони і продукція сірководню в ній. Збільшується інтегральна швидкість хімічного і біохімічного окислення сірководню, а також концентрації проміжних продуктів окислення: тіосульфатів, молекулярної сірки. Концентрації сірководню і амонію при дні зростають. Розподіл бактерій реагує більш складним способом. Розрахунки показали, що при заглибленні шару мінімальних значень коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії хемоклін опускається в більшій мірі в центрі, ніж на периферії. Можна зробити висновок про те, що зменшення товщини шару мінімальних значень коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії веде до заглиблення хемоклину. Цей процес супроводжується ростом продукції сірководню на периферії і інтегральної швидкості його окислення. В результаті сумарний вміст сірководню в модельному об'ємі зменшується.

Вертикальний перенос домішок в Чорному морі забезпечується як турбулентним, так і адвективним механізмом. Оцінці ступеню впливу останнього на екосистему сірководневої зони Чорного моря присвячений *третій підрозділ*. В обчислювальному експерименті використовувалися наступні значення вертикальної швидкості на глибині 20 м: $4 \cdot 10^{-3}$ (базовий варіант), $8 \cdot 10^{-3}$, $12 \cdot 10^{-3}$, $16 \cdot 10^{-3}$ см/с. Розраховувалось також опускання в центрі і підняття на периферії: $-1 \cdot 10^{-3}$, $-2 \cdot 10^{-3}$, $4 \cdot 10^{-3}$, $8 \cdot 10^{-3}$ см/с. Аналіз одержаних результатів дозволяє зробити наступний висновок: при "вмиканні адвективного механізму" хемоклин заглиблюється. Це значить, що заглиблюються границі сірководневої і амонійної зон. Опускаються шари молекулярної сірки, нітратів, нітритів, а також тіонових, нітрофікуючих, денітрофікуючих бактерій. Зменшується зона існування сульфатредуцентів і амоніфікаторів. Вертикальна адвекція будь-якого напрямку покращує забезпечення киснем глибинних шарів в модельному об'ємі в цілому. В результаті збільшуються інтегральні швидкості хімічного і біохімічного окислення сірководню. На основі проведених розрахунків можна зробити досить нетривіальний висновок: "вентиляція" верхнього 200-метрового шару викликає зменшення інтенсивності сульфатредукції, а значить і продукції сірководню в глибинних шарах.

В *четвертому підрозділі* приводяться підсумки обчислювального експерименту по визначенню впливу на екосистему зміни потоку органічних речовин із аеробної зони в анаеробну як основного енергетичного потоку. Збільшення потоку характеризується підняттям хемоклину, ростом концентрації сірководню і іонів амонію при дні і розширенням анаеробної зони. Інтегральна швидкість сульфатредукції збільшується, інтегральна швидкість окислення сірководню зменшується.

В ТРЕТЬОМУ РОЗДІЛІ за допомогою математичної моделі екосистеми сірководневої зони оцінюються деякі характеристики екосистеми Чорного моря в цілому.

Оцінка вертикального розподілу сульфатів в глибоководній частині моря виконана в *першому підрозділі*. Функція потужності джерел описує поступлення сульфатів з високосоленою водою Мармурового моря через Босфор, з прісними річними водами, утворення сульфатів в редокс зоні в ході окислення сірководню. Враховується споживання сульфатів в результаті бактеріальної сульфатредукції і осідання їх на дно в складі біогенного карбонатного матеріалу. Одержаний стаціонарний розподіл сульфатів добре описує особливості експериментальних профілів.

Вклад молекулярної сірки в глибинний шар мутності в Чорному морі оцінюється в *другому підрозділі* у відповідності до гіпотези О.Є. Совга, В.І. Маньковського, Ю. А. Прохоренка (1987). Для визначення величини ослаблення світла суспензією необхідна інформація про

розподіл суспензії по розмірах, форму частинок суспензії, спектральний хід кофіцієнта заломлення світла речовинами, з яких складаються частинки гідрозолу, і т. п. В нашому випадку задача стає суттєво простішою, оскільки часточки сірки, що виробляються тійовими бактеріями, можна вважати "оптично крупними": їх розміри в декілька раз перевищують довжину хвилі видимого світла. Виходячи з формули для об'ємного кофіцієнта ослаблення ізотропною суспензією сферичної форми, нехтуючи поглинанням світла, обчислюється характерне значення фактора ефективності ослаблення. Оскільки даних про розподіл частинок молекулярної сірки по розмірах не має, висновки торкаються монодисперсного гідрозолу. Допускаючи, що абсолютний кофіцієнт заломлення сірки дорівнює 1.55, в роботі виводиться формула, що зв'язує приріст показника ослаблення світла з концентрацією частинок молекулярної сірки. Модельні і експериментальні концентрації молекулярної сірки вносять малий вклад в глибинний шар мутності в Чорному морі (приблизно 10% від реально зареєстрованих значень).

Математичному моделюванню природної гіпоксії присвячений *третій підрозділ*. Явище гіпоксії (дефіциту кисню < 2 мг/л) в придонному шарі і його біологічні наслідки в вигляді заморів донної фауни на жаль стають типовими для північно-західної частини Чорного моря. Крім природоохоронного значення розуміння природи гіпоксії важливе і в загальнонауковому плані. Гіпоксія супроводжується зміною окисних умов на відновні і навпаки на протязі приблизно трьох місяців. Це дає змогу розглядати гіпоксію як діючу модель геологічного минулого Землі, в якому мали місце переходи від анаеробних умов до аеробних, зміни "нітратного" і "сульфатного" дихання мікроорганізмів кисневим і навпаки. В основу моделі покладена причинно-наслідкова схема гіпоксії на північно-західному шельфі Чорного моря (Толмазин 1977) з незначними змінами. Сучасне розуміння природи явища не позбавляє протиріч. Частково це пояснюється фрагментарністю експериментальних даних, що не дозволяють проаналізувати часову і просторову зміну цілого ряду гідрофізичних, гідрохімічних і гідробіологічних параметрів. В такій ситуації доцільно використання методу математичного моделювання. Оскільки процеси, які супроводжують гіпоксію аналогічні процесам, що мають місце в редокс-зоні Чорного моря, при моделюванні гіпоксії був використаний досвід математичного моделювання екосистеми сірководневої зони Чорного моря. Для дослідження заморів система рівнянь, що описують екосистему сірководневої зони, була доповнена рівнянням, яке описує зміну концентрації органічного вуглецю, що міститься в придонних малорухомих і прикріплених живих організмах. В цьому рівнянні описується збільшення біомаси придонних організмів за рахунок споживання розчиненого в воді кисню і суспендованії органіч-

ної речовини, і зменшення в результаті природної смертності і токсичної дії сірководню.

Для концентрації кисню на поверхні задавалась гранична умова 1-го роду з насичаючою концентрацією розчиненого кисню при заданій температурі. На дні задавався потік кисню, який потрібний для окислення вуглецю відмираючих придонних організмів. Аналогічно для сірководню на дні задавався потік, обумовлений сульфатредукцією на поверхні відмираючих організмів. Для всіх інших концентрацій граничні умови задавались в виді рівних нулю зовнішніх потоків. Профіль дна розрахункової області відповідав типовому для міжріччя Дунай-Дніпро. Шар мінімальних значень профілю коефіцієнта вертикальної турбулентної дифузії описує шар літнього стрибка густини, який формується в результаті поступання на шельф прісних річкових вод і активного прогрівання поверхневого шару води. Значення коефіцієнтів горизонтальної турбулентної дифузії покладались рівними 10^4 см/с. Для моделювання гіпоксії використовували сезонний хід первинної продукції для шельфової зони (Мединець, Грузов і ін. 1994), який характеризується наявністю єдиного літньо-осіннього максимуму, в якому значення первинної продукції досягають 0.6 гС/(м²·доба). В результаті розрахунків були одержані часові і просторові розподіли компонент екосистеми. Згідно з результатами розрахунків гіпоксія виникає на глибині 30-40 м, розповсюджуючись потім в мілководну прибережну зону, більш багату органічними речовинами. В модельних умовах кисневий режим відновлювався через 90 діб, концентрація тіосульфатів зменшувалася до фонових значень через 25 діб, молекулярної сірки і тіонових бактерії - через 30 діб. Більш повільно проходить процес відновлення біомаси придонних організмів - на всій площі шельфу лише через 450 діб. Результати виконаних розрахунків дозволяють допустити, що основною причиною, яка викликає гіпоксію на північно-західному шельфі, є співпадіння по часу виникнення запираючого шару, який є перешкодою вертикального водообміну, з сезонним максимумом потоку органічних речовин на дно. Осіннє конвективне перемішування, безумовно прискорює процес зникнення осередку гіпоксії, хоч і не міняє напрямку розвитку процесу. Такі фактори, як збільшення швидкості всіх біохімічних реакцій при підвищенні температури, що веде до ефективного посилення впливу запираючого шару, а також пов'язане з ростом температури зниження розчинності кисню, очевидно можна віднести до другорядних.

В ЗАКЛЮЧЕННІ коротко сформульовані основні результати проведеного дослідження:

- розроблена схема кругообігу азоту в екосистемі сірководневої зони Чорного моря, яка разом з розробленою раніше схемою кругообігу сірки покладена в основу математичної моделі екосистеми; визначений характеристичний вектор, що описує ці кругообіги;

- модернізована математична модель екосистеми сірководневої зони Чорного моря, яка описує перенос концентрації вуглецю суспендованої органічної речовини, кисню, сірководню, молекулярної сірки, тіонових і сульфатредукуючих бактерій шляхом введення нових компонент: амонію, нітратів, нітритів, а також бактерій азотного циклу (нітрофікаторів, денітрофікаторів, амоніфікаторів); як транспортний механізм враховані адвекція і турбулентна дифузія; рішення нестационарного завдання реалізоване на комп'ютері в оксимально-симетричному наближенні;
- на основі модернізованої моделі одержані і досліджені стаціонарні розподіли компонент екосистеми;
- за допомогою чисельних експериментів досліджена залежність стану екосистеми від особливо важливих зовнішніх факторів: вертикального ходу кофіцієнту вертикальної турбулентної дифузії, вертикальної швидкості та потоку органічних речовин в екосистему;
- одержана модельна оцінка вертикального профілю розподілу сульфатів в Чорному морі при допомозі детального врахування джерел і стоків цієї не лімітуючої процеси в екосистемі компоненти; досягнене добре співпадіння модельної оцінки з натурними даними;
- виконана модельна оцінка вкладу молекулярної сірки в глибинний шар мутності в Чорному морі; недивлячись на незначимість вкладу, розрахований річний хід добре узгоджується з експериментальним;
- детально реконструйований хід процесу гіпоксії і замору придонної флори і фауни на північно-західному шельфі Чорного моря на основі адаптованої до шельфових умов математичної моделі екосистеми сірководневої зони Чорного моря; зформульована гіпотеза про причини, що викликають ці негативні процеси.

Також приводяться висновки, обґрунтовання достовірності результатів, оцінюються їх якісні і кількісні показники. Приводиться перелік рекомендацій по використанню результатів дисертаційної роботи, обговорюються перспективи подальших досліджень, висловуються подяки.

В ДОДАТКУ А приведені результати моделювання впливу параметрів адвективного та турбулентного обміну та потоку органічної речовини в екосистему на просторовий розподіл компонент екосистеми.

В ДОДАТКУ Б приведені характеристики екстремумів просторових розподілів компонент екосистеми і інтегральні характеристики деяких хімічних та опосереднених бактеріями процесів, одержаних внаслідок моделювання.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА
ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Любарцев В.Г., Любарцева С.П. К вопросу о связи спектрального показателя ослабления света с концентрацией хлорофилла в Черном море // Дистанционное зондирование моря с учетом атмосферы. - Том 2. - Часть 2. - Москва-Берлин-Севастополь: МГИ АН УССР. - 1987. - С.129-136.
2. Любарцев В.Г., Любарцева С.П., Мишонов А.В. Восстановление спектра коэффициента яркости моря по измерениям на фиксированных длинах волн // Мор. гидрофиз. журн. - 1993. - N 2. - С.18-23.
3. Беляев В.И., Совга Е.Е., Любарцева С.П. Модельная оценка распределения сульфатов в экосистеме сероводородной зоны Черного моря // Докл. НАН Украины. - 1994. - N 7. - С.117-119.
4. Любарцева С.П. Оценка вклада молекулярной серы в глубинный слой мутности в Черном море // Комплексные экологические исследования в Черном море. - Севастополь: МГИ НАНУ. - 1995. - С.147-151.
5. Belyaev V.,I., Sovga E.,E., and Lyubartseva S.,P. Modelling the hydrogen sulphide zone of the Black Sea // Ecological modelling. - 1996. - N 1-3. - P.51-59.
6. Любарцева С.П. Исследование модели сероводородной зоны Черного моря // Тез. докл. Межд. конф. "Проблемы Черного моря". - Севастополь: МГИ НАНУ. - 1992. - С.150.
7. Belyaev V.,I., Sovga E.,E., and Lyubartseva S.,P. Modelling the Black Sea hydrogen sulfide zone ecosystem // IAPSO XXI General Assembly. - Honolulu (Hawaii). - 1995. - P.97.
8. Mishonov A.,V., and Lyubartseva S.,P. Investigation of the bottom hypoxia on the Black Sea shelf // IAPSO XXI General Assembly. - Honolulu (Hawaii). - 1995. - P.122.
9. Mishonov A.,V., and Lyubartseva S.,P. Estimation of antropogenic influence on the Black Sea hydrogen sulfide zone ecosystem // XII International Symposium on Environmental Biogeochemistry. - Rio de Janeiro (Brazil). - 1995. - P.99.

АНОТАЦІЯ

Любарцева С.П. Дослідження сірководневої зони Чорного моря методом математичного моделювання. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.12 - геофізика. - Морський гідрофізичний інститут НАН України, Севастополь, 1997.

Дисертацію присвячено дослідженню геофізичних, геохімічних і мікробіологічних механізмів, які формують екосистему сірководневої зони Чорного моря. Запропонована модернізована математична модель екосистеми, що описує трансформацію сполук сірки та азоту з врахуванням процесів адвекції та турбулентної дифузії в аксіально-симетричному наближенні. За допомогою чисельних експериментів досліджена залежність стану екосистеми від особливо важливих зовнішніх факторів: вертикального ходу коефіцієнту вертикальної турбулентної дифузії, вертикальної швидкості та потоку органічних речовин в екосистему. Виконана модельна оцінка вкладу молекулярної сірки в глибинний шар мутності. Детально реконструйований хід процесу гіпоксії і замору придонної флори і фауни на північно-західному шельфі Чорного моря.

Ключові слова: математичне моделювання, екосистема, сірководень, транспортний механізм, коефіцієнт турбулентної дифузії, вертикальна швидкість, хемоклін, глибинний шар мутності, гіпоксія.

Любарцева С.П. Исследование сероводородной зоны Черного моря методом математического моделирования. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.12 - геофизика. - Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь, 1997.

Диссертация посвящена исследованию геофизических, геохимических и микробиологических механизмов формирования экосистемы сероводородной зоны Черного моря. Предложена математическая модель экосистемы, которая описывает трансформацию соединений серы и азота с учетом процессов адвекции и турбулентной диффузии в аксиально-симметричном приближении. С помощью численных экспериментов изучена зависимость состояния экосистемы от наиболее важных внешних факторов: вертикальных профилей коэффициента вертикальной диффузии и вертикальной скорости, потока органических веществ в экосистему. Получена модельная оценка вклада молекулярной серы в глубинный слой мутности. Детально реконструирован ход процессов гипоксии и замора придонной флоры и фауны на северо-западном шельфе Черного моря.

Ключевые слова: математическое моделирование, экосистема, сероводород, транспортный механизм, коэффициент турбулентной

диффузии, вертикальная скорость, хемоклин, глубинный слой мутности, гипоксия.

Lyubartseva S.P. Investigation the Black Sea hydrogen sulfide zone by means of the mathematical modelling. - Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 01.04.12 - geophysics. - Marine Hydrophysical Institute in Power of National Academy of Science of Ukraine, Sevastopol, 1997.

The dissertation is devoted to investigation of geophysical, geochemical and microbiological mechanisms forming the Black Sea hydrogen sulfide zone. It is proposed a mathematical model describing transformations of sulfur and nitrogen compounds and taking into account advection and turbulent dispersion in axial-symmetric approximation. With the help of numeric experiments the dependence of the ecosystem state on the most important external factors (vertical profiles of turbulence dispersion and velocity, organic matter fluxes) was explored. It was obtained a model estimation for molecular sulfur deposit to the deep turbid layer. Temporal and spatial development of hypoxia phenomenon in the Black Sea north-western shelf was reconstructed carefully.

Key words: mathematical modelling, ecosystem, hydrogen sulfide, transport mechanism, turbulence dispersion coefficient, vertical velocity, chemocline, deep turbid layer, hypoxia.

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Підписано до друку 10.10.1997. Формат паперу 60x84 ¹/₁₆.
Об'єм 1 облч. друк. арк. Заказ 51. Тираж 100 экз.

Надруковано в НВЦ "ЕКОСІ - Гідрофізика",
335000, Севастополь, вул. Леніна 28.

Ar 88.888A

434650

4228690
AV 38.690