

Бесплатно

4799
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. А. А. ЖДАНОВА

На правах рукописи
Для служебного пользования
ПОГАШЕНО
Экз. № 00077

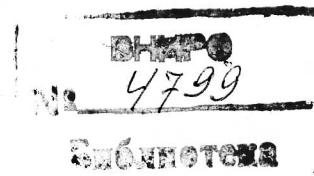
ДМИТРИЕВ
Василий Васильевич

УДК : 577.3.551.46

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРУГОВОРОТА ВЕЩЕСТВА
В ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ УМЕРЕННЫХ ШИРОТ

11.00.11. — ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук



ЛЕНИНГРАД — 1987

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте Географии Ленинградского государственного университета имени А. А. Жданова.

Научный руководитель —
кандидат географических наук,
доцент Ю. Н. СЕРГЕЕВ

Официальные оппоненты:
доктор географических наук В. А. ЗНАМЕНСКИЙ
доктор физико-математических наук В. Г. МОРАЧЕВСКИЙ

Ведущая организация: Зоологический институт АН СССР

Защита диссертации состоится « 7 » *сентября* 1987 г. в « 13 »
час. мин. на заседании специализированного совета Д 063.57.42. по
защите диссертаций на соискание ученой степени доктора географических
наук при Ленинградском государственном университете имени А. А. Жданова.

Адрес: 199178, Ленинград, 10-я линия, д. 33. Географический факультет.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ЛГУ.

Автореферат разослан « 6 » *марта* 1987 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Г. И. МОСОЛОВА

Актуальность проблем. Одной из важнейших проблем, стоящих перед современной наукой, является изучение, анализ развития и прогноз изменения экологических систем вообще и водных экосистем, в частности. Актуальность этой проблемы возрастает в связи с увеличением антропогенного эвтрофирования водоемов. Процесс эвтрофирования стал процессом "номер один" в водной проблематике /Алекин, 1979/.

На XXVII съезде КПСС подчеркивалась важность комплексного исследования биосферы, сохранения чистоты окружающей среды, обеспечения потребностей населения планеты в ресурсах и продовольствии, предотвращения необратимых климатических изменений.

Экологические системы представляют собой сложные комплексы, состоящие из компонент живой и неживой природы, взаимодействующих между собой посредством многочисленных прямых и обратных связей, развивающихся в трехмерном пространстве и во времени. Присущая экосистемам внутренняя сложность и уникальность экспериментов по непосредственному наблюдению процессов энерго и массообмена между биотическими и абиотическими компонентами экосистем, являются существенными препятствиями в понимании законов их развития.

Уникальные по сложности и квалификации исполнителей эксперименты по изучению обменных процессов в экосистемах доступны лишь немногочисленным академическим институтам, занимающимся фундаментальными научно-исследовательскими разработками.

В отдельных случаях, когда изучается проект крупномасштабной перестройки окружающей среды эмпирические данные могут полностью отсутствовать, так как моделируемая экосистема пока еще не существует в природе.

Из сказанного понятно, что анализ и прогноз развития экосистем — проблема высшей категории сложности.

Решение большинства природоохранных задач неразрывно связано с использованием методов математического моделирования экологических систем.

13 ноября 1986 г. принято постановление ЦК КПСС об усилении научно-исследовательских работ в области математического моделирования. Согласно этому постановлению, разрабатывается общегосударственная программа широкого использования методов математического моделирования в различных отраслях народного

№ 4799

Библиотека

хозяйства /"Правда", 14 ноября, 1986 г./.

В математических моделях экологических систем особое место принадлежит имитационным моделям.

В программе Научного комитета по проблемам окружающей среды при Международном Совете научных союзов /СКОШЕ/ оно выделено в специальный проект.

Рациональное использование биологических ресурсов пресноводных водоемов означает оптимальное управление их экологическими системами /Меншуткин, 1971/. Решение задач оптимального управления применительно к водным экосистемам возможно только на основе построения их математических моделей.

Цель и задачи исследования. Целью работы является создание единой схемы круговорота углерода, азота, фосфора и зольных веществ в водных экосистемах и воспроизведение на моделях основных эколого-физиологических особенностей годового и многолетнего циклов развития основных компонент водных мезоэкосистем в естественных условиях и в условиях антропогенных нагрузок.

На основе разработанной схемы круговорота вещества с применением математического моделирования исследуются процессы, протекающие в водных экосистемах, вскрывается их значимость и роль в формировании качества воды мелководных, ограниченных по размерам бассейнов.

Для осуществления этих целей в работе решаются следующие основные задачи:

1. Рассматриваются потоки углерода, азота, фосфора как для отдельных составляющих биоценоза и биотопа, так и для водной экосистемы в целом. Исследуемые связи и потоки обобщены в линейные диаграммы потоков вещества.

2. На базе диаграмм потоков вещества формулируются пространственно-однородные и резервуарные математические модели водной экосистемы.

3. Путем упорядочения и обобщения различных теоретических зависимостей и фрагментарных гипотез об интенсивностях процессов массообмена в живом и биокосном веществе, создается фонд алгоритмов описания скоростей массообменных процессов в экосистеме, как целостной природной единице.

4. Проводится статистическая обработка натуральных наблюдений за временной и пространственной изменчивостью модельных компонент водных экосистем.

5. Реализуются модели круговорота вещества в водных экосистемах, исследуются реакции моделей на изменение интенсивностей основных массообменных процессов.

6. Исследуется реакция водных экосистем на различные антропогенные воздействия, приводящие к эвтрофированию водоемов.

Региональная специфика материалов натуральных наблюдений. Предлагаемые в работе математические модели разработаны и реализованы для ограниченных по площади, мелководных водоемов умеренной климатической зоны. Для оценки адекватности моделей их природным оригиналам использовались:

- материалы комплексных синхронных наблюдений за компонентами биоценоза и биотопа, выполненных в 1972-1973 гг. Балтийской экспедицией НИИГ ЛГУ при непосредственном участии автора диссертации;

- материалы межведомственных комплексных гидрологических, гидрохимических, гидробиологических исследований экосистемы Невской губы, собранные в период 1981-1983 гг.

Для иллюстрации вертикальной и пространственной неоднородности биотических и абиотических компонент водных экосистем умеренного пояса используются материалы комплексных наблюдений Северо-морской экспедиции НИИГ ЛГУ 1974 года, в которой принимал участие автор диссертационной работы.

Научная новизна. Созданы математические модели водных экосистем, учитывающие одновременно круговорот углерода, азота, фосфора и зольного вещества.

Для учета совокупного влияния многих лимитантов на изменение первичной продукции в водоемах использован принцип Митчерлиха.

Впервые реализуются пространственно-однородная и двухрезервуарная модели круговорота углерода, азота, фосфора для мелководных районов восточной части Балтийского моря. На моделях воспроизводятся общие черты внутригодовой и межгодовой изменчивости некоторых абиотических и биотических компонент водных экосистем.

Новизна работы состоит также в том, что в ней рассматривается докомпонентное и совместное влияние природных и антропогенных факторов на процесс эвтрофикации на примере вод Невской губы и восточной части Финского залива.

Практическая значимость. Сформулированные и реализованные на ЭМ модели круговорота углерода, азота, фосфора и зольных веществ могут быть непосредственно использованы для инженерных расчетов современного и перспективного состояния экосистем мелководных ограниченных по площади водоемов: прудов, озер, водохранилищ, эстуариев.

Разработанные алгоритмы могут служить основой для дальнейшего изучения процессов трансформации вещества в водоемах.

Сформулированные и реализованные модели могут без каких-либо существенных изменений применяться в более общих и на порядок более сложных моделях развития пространственно-неоднородных экосистем. При этом, правые части уравнений реализованной пространственно-однородной модели экосистемы выступают в роли функций неконсервативности в уравнениях турбулентной диффузии неконсервативных компонент, описывающих адвективный перенос, турбулентную диффузию, гравитационное осаждение и транслокацию вещества - т.е. процессы, определяющие основные физические и химико-биологические взаимодействия между компонентами среды.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены на Всесоюзном симпозиуме по химическим основам биопродуктивности Мирового океана и морей СССР /Ростов-на-Дону, 1976/, на Межведомственном координационном совещании по выполнению программы ГКНТ "Провести комплексные натурные исследования гидрологического и гидрохимического режима водной системы Ладожское озеро- река Нева - Невская губа и разработать прогноз ее изменений под влиянием планируемых водохозяйственных мероприятий" /Ленинград, 1982, 1983 /, на XXXVI, XXXVII, XXXIX научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников по итогам научно-исследовательских работ за 1983, 1984, 1985 гг. в Ленинградском технологическом институте целлюлозно-бумажной промышленности, на VII съезде Географического общества СССР /Киев, 1985/, на XVII заседании Межведомственного комитета СССР по охра-

не Балтийского моря совместно с Национальной координационной группой по исследованию Балтийского моря /Таллин, 1985/, на UI научной конференции "Проблемы рационального использования и охраны природной среды" /Минск, 1986/, на заседаниях кафедры океанологии /1976-1981/ географического факультета ЛГУ.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 157 стр. машинописного текста и состоит из введения, трех глав и заключения. В работе имеется 40 рисунков, 31 таблица. Список литературы состоит из 180 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

На основе разработанной схемы круговорота углерода, азота, фосфора и зольного вещества в водных экосистемах /рис. I/ созданы пространственно-однородная /точечная/ и двухрезервуарная /по вертикали / модели, компонентами которых являются: фитопланктон /F/, зоопланктон /Z/, симбиотические бактерии /B/, лабильный /D₁/, и стойкий /D_c/ детрит, растворенные органические углерод /C/, азот /N/, фосфор /P/, аммонийный /NH₄/, нитритный /NO₂/, нитратный /NO₃/, азот, фосфатный фосфор /PO₄/, углерод углекислого газа /CO₂/, кислород /O₂/, суммарное зольное вещество /X/.

Схема круговорота вещества в модельной экосистеме обобщена в виде линейной диаграммы потоков вещества по типу диаграмм переноса энергии по пищевым цепям Ю.Одум /1975/.

Пространственно-однородная модель сформулирована в виде системы из 15-ти существенно нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial C_r}{\partial t} = \varphi_r (C_1, C_2, C_3, \dots, C_{15}; t^0, I_0, P_0, W, \dots); \quad r = 1, 2, 3, \dots, 15$$

$$\vec{C} = (C_1, C_2, C_3, \dots, C_{15}) = (F, Z, B, D_1, D_c, C, N, P, NH_4, NO_2, NO_3, PO_4, CO_2, O_2, X)$$

Операторы φ_r системы зависят как от концентраций компонент экосистемы, так и от внесистемных факторов, таких как температура воды /t⁰/, освещенность /I₀/, атмосферное давление /P₀/, скорость ветра /W/, направление ветра /α/, толщина льда /Δ/, наличие снега на ледяном покрове, продолжительность ледового периода, содержание минеральной взвеси /M/ и других.

В качестве начальных условий приняты:

$$C_r |_{t=0} = f_r$$

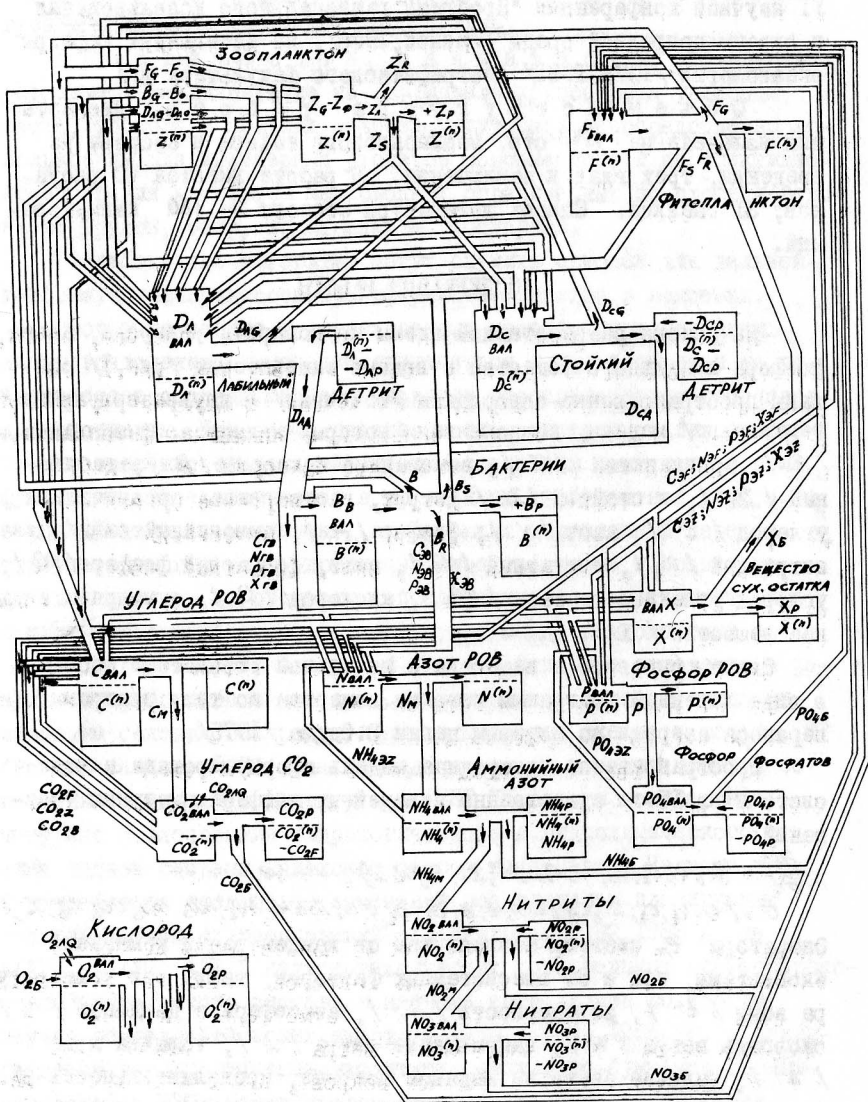


Рис. I. Взаимодействие компонент модели на шаге по времени

Таким образом, в начальный момент времени по данным натуральных наблюдений заданы концентрации всех компонент экосистемы. На развитие экосистемы влияют внешние факторы / $t^{\circ}, I_0, W, P_0, \dots$ /, задаваемые как климатические характеристики или среднесуточные значения характеристик на период моделирования.

Двухрезервуарная модель сформулирована в виде системы из 30 дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial C_i^{(1)}}{\partial t} = \varphi_i^{(1)}(C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, C_3^{(1)}, \dots, C_{15}^{(1)}, t^{(1)}, I^{(1)}, P_0, W, \dots) + \psi_i^{(1)}(C_1^{(2)}, C_2^{(2)}, C_3^{(2)}, \dots, C_{15}^{(2)})$$

$$\frac{\partial C_i^{(2)}}{\partial t} = \varphi_i^{(2)}(C_1^{(2)}, C_2^{(2)}, C_3^{(2)}, \dots, C_{15}^{(2)}, t^{(2)}, I^{(2)}, \dots) + \psi_i^{(2)}(C_1^{(1)}, C_2^{(1)}, C_3^{(1)}, \dots, C_{15}^{(1)}, t^{(1)}, W, \dots)$$

Здесь $\vec{C}^{(1)}, \vec{C}^{(2)}$ - вектор - функции компонент модели экосистемы в верхнем и нижнем резервуарах.

На основе систематизации опубликованных в литературе эмпирических зависимостей, определяющих удельные скорости процессов массообмена в живом и биокосном веществе создан фонд алгоритмов и программ расчета интенсивностей трансформации вещества в водоемах.

Выполнена оценка применимости отдельных эмпирических зависимостей по критерию стабильности поведения модельной экосистемы.

В моделях формализованы следующие процессы обмена веществом:

1. Первичный биосинтез водорослей. Интенсивность этого процесса рассматривается как многофакторная функция $\mu = \mu(t^{\circ}, I_0, \Delta, M, NH_4, NO_2, NO_3, PO_4, CO_2)$ /, зависящая от внесистемных и системных компонент. Влияние температуры и света на интенсивность биосинтеза учитываются по формулам *Eppley /1972/* и *Steele /1962/*. Влияние биогенов учитывается по формулам *Михаэлиса-Ментен-Моно* с учетом избирательности азотного питания. Совокупное влияние лимитантов на первичный биосинтез учитывается в соответствии с принципом *Митчеллха*.

2. Бедание и ассимиляция пищи зоопланктоном. Скорость фильтрации воды зоопланктерами определяется как функция $f_z = \psi_z / t^{\circ}, F, B, D_A, D_C$ / с учетом пороговых значений концентрации пищи, определенных в экспериментах. Ассимиляция пищи зависит от усвояемости зоопланктерами F, B, D_A, D_C . При этом учитывается сезонная селективность питания зоопланктеров.

3. Траты на обмен компонент биоценоза / F, Z, Z / определяются интенсивностями выделения в среду экскретируемых ассимилятов / C, N, P, NH_4, PO_4 / . При этом учитываются процессы поглощения O_2 и выделения CO_2 . Интенсивность трат на обмен зоопланктона зависит от температуры воды и среднестатистического веса организмов.

4. Деструкция взвешенного органического вещества в модели определяется интенсивностями внеклеточного бактериального гидролиза детрита: $M_{BD_1} = Y_3 (t^{\circ}, D_1, D_2)$; $M_{BD_2} = Y_4 (t^{\circ}, D_1, D_2, ЭК_1, ЭК_2)$, где $ЭК_1, ЭК_2$ - экономические коэффициенты бактерий, утилизирующих лабильный и стойкий детрит.

5. Естественная смертность компонент биоценоза. Интенсивность этого процесса у водорослей / S_F / рассматривается как многофакторная зависимость от условий среды: $S_F = f(t, NH_4, NO_2, NO_3, PO_4, CO_2)$.

Интенсивность естественной смертности бактерий также зависит от условий среды.

6. Минерализация растворенных органических углерода, азота, фосфора; нитрификация первой и второй стадии описываются реакциями первого порядка, интенсивности которых зависят от температуры воды.

7. Гравитационное осаждение взвешенных субстанций / F, Z, D_1, D_2 / . Скорость осаждения рассматривается как функция, зависящая от температуры воды, а для водорослей и от характерного объема клеток.

8. Газообмен с атмосферой определяется по эмпирическим зависимостям, учитывающим влияние температуры, атмосферного давления, скорости ветра, содержания газов в воде и наличия нефтяной пленки.

9. Вертикальное перемешивание зависит от разности концентрации субстанций в верхнем и нижнем резервуарах моделей. Коэффициент турбулентной вязкости рассчитывался по методу А.В. Карашева /1977/ или принимался зависящим от величины критерия Ричардсона.

10. Учет антропогенных нагрузок на экосистему в модели проводился различными способами: изменением начальных концентраций компонент; заданием постоянных или переменных во времени стоков и источников в правых частях системы дифференциальных уравнений и др.

При моделировании принимается гипотеза о постоянстве химического состава компонент биоценоза и детрита. Скорости биохимических циклов отдельных элементов синхронизированы в соответствии со стехиометрическим составом, т.е. отношениями $C:N:P$ в живом веществе.

С помощью моделей изучены внутригодовая и межгодовая изменчивости биомасс и концентраций некоторых биотических и абиотических компонент водных экосистем Невской губы и глубоководного района Финского залива с глубиной 30 метров /район г.Приморска/ с выраженной летней стратификацией вод. При идентификации и верификации моделей использовались данные натуральных наблюдений за 1981-1983 гг. /Невская губа/ и 1972-1973 гг. /район г.Приморска/. Процедура идентификации модели проводилась путем многократного решения задач о годовых циклах функционирования водных экосистем на первом годовом интервале наблюдений. Результаты решений сопоставлялись с имеющейся натурной информацией. Осуществлялась коррекция коэффициентов модели с целью уменьшения невязки между модельными и натурными данными.

Верификационная процедура, призванная оценить качество работы модели на независимом материале проводилась по наблюдениям неиспользованным при идентификации.

Результаты моделирования временной изменчивости фитопланктона, фосфатного фосфора, нитритного азота для глубоководного района представлены на рис.2.

Сопоставление наблюдаемых и модельных данных для 1981-1983 гг. /Невская губа/ и 1972-1973 гг. /район г.Приморска/ свидетельствует об их вполне удовлетворительном совпадении.

На моделях воспроизводятся весенний, летний и осенний максимумы развития фитопланктона; летний максимум зоопланктона; летний максимум и осеннее увеличение биомассы бактерий; осенне-зимний максимум и осеннее увеличение биомассы бактерий; осенне-зимнее накопление органики и регенерация биогенных соединений; пересыщение воды кислородом в период максимального /весеннего/ развития фитопланктона; снижение концентрации кислорода в воде в летне-осенний период, вызванное процессами минерализации органики. Получены среднегодовые и среднемесячные оценки концентраций и биомасс. Свойства систем характери-

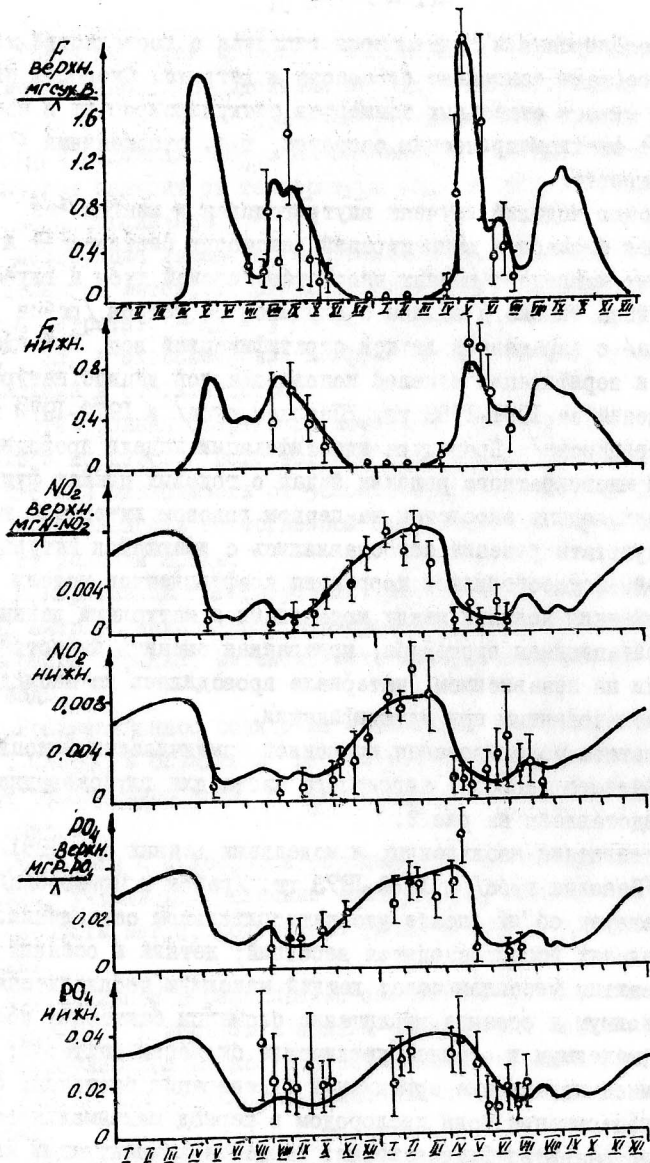


Рис. 2. Результаты внутригодовой и межгодовой изменчивости фитопланктона, нитритного азота и фосфатного фосфора по данным моделирования (двухрезервуарная модель) и натурным данным (глубоководный район восточной части Финского залива).
 — модельное решение
 ○ натурные данные

зуются с помощью среднегодовых отношений типа: продукция - биомасса, деструкция - продукция; интегральных за год биомасса, концентраций, продукций компонент; составляющих кислородного баланса и других.

Изучение последствий дополнительного поступления биогенов и органики, изменение теплового и светового режима на моделях /20 экспериментов на ЭВМ/ позволило количественно оценить степень перестройки экосистемы под влиянием антропогенных воздействий.

Некоторые результаты этих экспериментов представлены в табл. I. При увеличении прогрева водной толщи интенсифицируются продукционные процессы у компонент модельного биоценоза и уменьшается интегральный годовой фонд бактериопланктона. Это приводит к снижению в перспективе самоочищающей способности экосистемы.

Заметно снижается содержание кислорода, увеличивается его расход на деструкционные и минерализационные нужды.

На серии экспериментов с различной концентрацией минеральной взвеси, увеличением или уменьшением количества солнечной радиации, поступающей на поверхность воды, исследована роль светового фактора в развитии экосистемы. Установлено, что при значительной мутности воды заметно снижается первичная продукция, увеличивается биогенный фон. Это создает предпосылки для значительных темпов эвтрофирования при увеличении прозрачности воды /снижении мутности/.

Численные эксперименты, имитирующие поступление биогенов и органики в водные экосистемы /10 экспериментов/ достаточно убедительно отражают основные черты начального этапа эвтрофикации реальных водоемов. Во всех экспериментах прослеживается возрастающее смещение баланса продукционных и деструкционных процессов в сторону преобладания первых. Увеличивается среднегодовой P/V-коэффициент у фитопланктона. В большей степени это проявляется в вариантах с сопутствующим подогревом воды в экосистеме в вегетационный период. Эффект увеличения температуры воды в этом случае приводит к 1.5-2-кратному увеличению годового P/V коэффициента в сравнении с экспериментами без подогрева воды.

Таблица 1
Сравнение модельных показателей экспериментов (в %) по изучению нагрузок на экосистемы

Показатель / Специфика	Увеличение прогресса водн на 3°С в безаэробный период	Значительное увеличение мутности водн (M ≥ 50 мг.л ⁻¹) или глубине 2,5 м	Увеличение начальных условий (НУ) по Р _и Р _{О₄} в 1,5 раза	1,5-кратное увеличение Р и Р _{О₄} через первые части уравнений	Одновременное увеличение НУ по Р _и Р _{О₄} ; доп. прогресс на 3°С; увел. мутности
	Внешние факторы	Ср. многол.	Ср. многол.	Ср. многол.	Ср. многол.
Ср. год. (Р/В) F	>50	<29	>50	>27	>51
Ср. год. (Р/В) Z	>35	<15	>11	>9	>63
Ср. год. (Р/В) B	>77	<40	>46	>33	>63
Ср. год. (Д/Р)	<10	>26	>29	>74	0
F	>3	<20	>10	>1	>14
Z	>10	<69	>97	>76	>62
B	<12	<3	<30	<23	<24
D _л	<17	<25	>39	>22	>15
Интегральная годовая биомасса (масса)					
C	>1	<2	>1	>1	>4
N	>2	<27	<3	<2	>10
P	<1	<39	>10	>7	>20
NH ₄	>5	>34	>45	>21	>13
NO ₂	>4	>32	>39	>18	>16
NO ₃	>1	>6	<24	>15	<12
PO ₄	>6	>41	>77	>36	>64
CO ₂	<7	>3	<2	<1	<6
O ₂	<3	<1	>1	>0,5	<2
Интегральная годовая продукция					
F	>40	<43	>28	>17	>74
Z	>64	<64	>90	>60	>116
B	>13	<31	>8	<5	<20
Годовой баланс кислорода					
BF	>40	<43	>29	>17	>74
TB	>13	<31	<8	<5	>20
TZ	>71	<63	>88	>57	>122
M	>21	<8	>3	>1	>25
Основные всплески (мг сух. в. сут ⁻¹)					
F	>8 (-1)	<17 (+14)	>25 (+11)	>9 (+4)	>33 (+2)
Z	<2 (-14)	<17 (+2)	>29 (+4)	>19 (-2)	>145 (-22)
B	<14 (+16)	<69 (+23)	>2 (+12)	<5 (+20)	>83 (+7)
и сдвиг по времени (сут.)					
Z	<33 (-14)	<20 (+2)	>56 (-4)	>30 (-2)	>163 (-18)
B	<19 (-15)	<19 (+22)	>55 (-4)	>35 (-2)	>47 (+5)
B	<8 (-15)	<8 (+2)	>33 (-4)	>15 (-2)	>14 (-15)

В 80% вариантов происходит увеличение средних за год Р/В-коэффициентов бактерий и зоопланктона. Исключение составляют варианты, имитирующие работу экосистемы в соответствии с принципом проточного культиватора.

Наибольшие изменения среднегодового Д/Р-коэффициента свойственны экосистемам, развивающимся в условиях низкой мутности, особенно при увеличении температуры воды. Более чем 2-кратное увеличение Д/Р-показателя в этом случае свидетельствует о повышении самоочищающей способности экосистемы. Об этом же говорит и 3-кратное увеличение среднегодового Р/В-коэффициента у бактерий. В замутненных экосистемах Д/Р-показатель практически не изменяется, хотя и в них заметно увеличение Р/В-коэффициентов.

Интегральная годовая продукция водорослей увеличивается. Годовая продукция бактерий в 60% экспериментов уменьшается. Ее значительное уменьшение наблюдается в вариантах с подогревом воды. В этих же экспериментах отмечается максимальное увеличение ассимиляции пищи зоопланктонами.

Интегральная концентрация кислорода уменьшается, главным образом, в вариантах с повышенной температурой воды.

В значительной степени увеличивается расход кислорода на окисления органики и нитрификацию в подогретых экосистемах /на 23-42% /.

Абсолютные максимумы всплеск компонент биоценоза в вариантах с нагрузками увеличивается на 9-43% для фитопланктона, на 11-163% для зоопланктона, на 15-33% для бактерий.

Эксперименты, в которых были созданы исходные предпосылки для развития эвтрофирования /увеличение годового содержания фосфора фосфатов/ и в которых использован принцип работы проточного культиватора с различным процентов изъятия живого вещества, привели к деэвтрофированию среды. Это проявляется в снижении интегральных годовых биомасс и продукций компонент биоценоза. Такой способ воздействия на водные экосистемы можно рассматривать, как один из механизмов снижения трофности, деэвтрофирования или оздоровления природной среды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы работы сводятся к следующему:

I. Сформулированы и реализованы на ЭВМ математическая модель круговорота углерода, азота, фосфора и динамики кислорода для орга-

ниченных по площади водоемов, расположенных в зоне умеренных широт.

2. С помощью пространственно-однородной и двухрезервуарной моделей воспроизведены основные черты годового и многолетнего циклов развития экосистем мелководной и глубоководной зон восточной части Финского залива в естественных природных условиях.

3. Разработан метод определения общего органического азота, который апробирован для пресной и морской воды водоемов умеренных широт.

4. Численные эксперименты с моделями доказали работоспособность и стабильность предложенной схемы моделирования круговорота вещества. Анализ экспериментов позволил количественно оценить основные изменения в экосистемах, связанные с начальным этапом антропогенного эвтрофирования водоемов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Общий органический азот в водах Северного и Балтийского морей. Вестник Ленинградского ун-та. Сер.: геолог. и географ., 1977, № 12, вып. 2, с. 114-122.

2. Пространственное распределение органического и минерального азота в Северном море в летний период 1974 г. - В кн.: Бимпозиум по химическим основам биологической продуктивности Мирового океана и морей СССР. Москва, 1976, с. 51-52. /В соавторстве с Т.С. Комаровой и О.П. Савчуком/.

3. Основные результаты комплексной экспедиции по изучению экосистем Северного моря. - В кн.: Математическое моделирование пелагической экосистемы Северного моря. Калининград, 1982, с. 19-32. /В соавторстве с Т.С. Комаровой и Л.В. Калининой/.

4. Имитация поведения пространственно-неоднородной экосистемы Северного моря. - В кн.: Математическое моделирование пелагической экосистемы Северного моря. Калининград, 1982, с. 102-116. /В соавторстве с Ю.Н. Сергеевым, В.П. Кулешом, О.П. Савчуком, Т.С. Комаровой/.

5. Имитационная модель круговорота вещества в водной экосистеме Финского залива. - В кн.: Географические аспекты изучения Мирового океана. Тезисы Докладов секции III на VIII съезде Географического общества СССР/Киев, октябрь, 1985/, т. 1, 1985, с. 43-45. /В соавторстве с Ю.Н. Сергеевым и В.Н. Кулешом/.

6. Имитация годового хода компонент водной экосистемы. - В кн.: Охрана окружающей среды от загрязнения промышленными выбросами ЦБП; Межвузовский сб. научн. тр. - Л., 1986, с. 42-47.

Подписано к печати 24.02.87. Заказ 9-2 . Тираж 88

формат бумаги 60x84 1/16, 1 печ. л. Бесплатно.

Ротапринт тип. № 2 "Ленуприздата".

191104, Ленинград, Литейный пр., дом № 55.