

Айвазов

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ им. Л.В.КИРЕНСКОГО

Напечатано в типографии

АЙВАЗЯН МАМИКОН ПАРСЯМОВИЧ

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СТРУКТУРЫ И КИНЕТИКИ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ПЕРУАНСКОГО
ТЕЧЕНИЯ

(03.00.02 - биофизика)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск - 1980

Работа выполнена в Ереванском Политехническом институте им.К.Маркса и Институте радиотехники и электроники АН СССР.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
В.Ф.КРАПИВИН.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
А.Б.ГОРСТКО (г.Одесса)

доктор физико-математических наук
Ю.М.СВИРЕЖЕВ (г.Москва)


Ведущее предприятие - Тихоокеанский НИИ рыбного хозяйства и океанографии МРХ СССР (г.Владивосток)

Защита состоится " _____ " _____ 1980 года в _____ часов на заседании специализированного Совета Д 002.67.01 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора наук при Институте физики им.Л.В.Киренского СО АН СССР по адресу: 660036, г.Красноярск, Академгородок.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики им.Л.В.Киренского СО АН СССР.

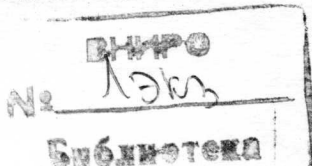
Автореферат разослан " _____ " _____ 1980 года.

Ученый секретарь специализированного Совета,
доктор физ.-мат. наук

 Д.С.Абросов/

Актуальность проблемы. Одной из важных проблем экологии является исследование уникальных природных экологических систем и, в частности, экосистем Мирового океана. Последние обладают большой пространственной протяженностью и для своего изучения требуют значительных экономических затрат, организации специализированных рейсов научно-исследовательских судов и привлечения к этим работам больших коллективов научных работников различных специальностей. Комплексность исследований океанских экосистем требует также создания эффективных количественных методов оценки их состояния и прогнозирования будущего развития в условиях нарастающего антропогенного воздействия. Возникающие здесь вопросы успешно изучаются с помощью метода имитационного моделирования (М.Е.Виноградов, А.Б.Горстко, В.В.Меншуткин, В.Ф.Крапивин, Ю.М.Свирижев и др.).

Применение метода имитационного моделирования в экологии ограничивается рассмотрением упрощенных одномерных ситуаций, а решение вопросов оценки устойчивости экосистем сводится к получению качественных оценок с выделением малого числа их компонентов. Вследствие этого построенные имитационные модели реальных экосистем требуют проведения дальнейших исследований по пути повышения их адекватности, учета в них пространственной и временной неоднородностей систем. Именно решению ряда вопросов в этом направлении применительно к экосистеме Перуанского течения и посвящена данная работа. Выбор этой экосистемы в качестве объекта моделирования обусловлен, с одной стороны, актуальностью всестороннего изучения различными методами биопродукционных процессов в районе Перуанского апвеллинга и, с другой стороны, наличием достаточно полного фактического материала экспедиционных исследований в 4-м и 17-м годах



рейсах НИС "Академик Курчатов".

Цель и задачи исследования. Целью настоящей работы явилось построение имитационной модели и расчет биоокеанографических полей Перуанского течения с учетом их пространственной и временной неоднородностей. Эта цель обусловила необходимость решения в работе следующих задач:

1. Выбор математического описания абиотических, гидрологических и биотических процессов, протекающих в районе Перуанского течения.

2. Построение блок-схемы модели экосистемы Перуанского течения и формулировка описывающей ее системы дифференциальных уравнений.

3. Выбор наиболее информативного критерия оценки чувствительности модели к вариациям ее параметров.

4. Изучение чувствительности модели экосистемы Перуанского течения к вариациям климатических, абиотических, гидрологических и биотических параметров. Определение допустимых пределов этих вариаций и оценка необходимой точности измерения параметров модели.

Научная новизна. Впервые при построении модели океанской экосистемы большой пространственной протяженности учитываются неоднородности по глубине, широте и долготе, а также сезонная изменчивость параметров. Впервые в моделях подобного рода учитывается взаимодействие наземного и океанского биоценозов. Впервые для района Перуанского течения создана работающая на ЭВМ модель с учетом основных трофических уровней, включением растворенного кислорода и температурных зависимостей параметров. Впервые в океанской биогеоэкологической имитационной модели отражены факторы активной миграции и сноса течением. Для

описания процессов миграции рыб предложен новый алгоритм, позволяющий отражать зависимость этого процесса от кормовых и физиологических параметров.

Практическая ценность работы. Модель экосистемы Перуанского течения использована в качестве блока модели Мирового океана в разработанной ВЦ АН СССР и ИРЭ АН СССР глобальной биогеоценотической модели биосферы.

Развитая в работе методика машинного моделирования пространственно-неоднородных систем использована при формировании признаков пятнистости океанской поверхности в задачах обнаружения аномалий, решавшихся в ИРЭ АН СССР и ИО АН СССР.

Результаты работы могут быть использованы:

- 1) при дальнейших исследованиях экосистемы Перуанского течения как с помощью моделирования на ЭВМ, так и при планировании экспедиционных работ;
- 2) при постановке и решении задачи определения оптимальной промысловой стратегии в рассматриваемом районе;
- 3) при построении имитационных моделей других океанских экосистем, имеющих большую пространственную протяженность и характеризующихся наличием пространственных и временных неоднородностей.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались:

- 1) на I-й Всесоюзной конференции по математической теории биологических процессов, 27 июня - 4 июля 1976 г., г. Калининград;
- 2) на научном семинаре теоретического отдела Всесоюзного научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО) МРХ СССР, май 1976 г., г. Москва;

3) на региональном научно-техническом семинаре "Статистический анализ и преобразование информации автоматизированными средствами", май 1976 г., г. Таганрог;

4) на совещании руководителей отделов БНИРО МРХ СССР, июнь 1976 г., г. Москва;

5) на научном семинаре кафедры гидробиологии биологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, сентябрь 1977 г., г. Москва;

6) на семинаре секции кибернетики Центрального Правления научно-технического общества радиотехники и электроники им. А. С. Попова, декабрь 1977 г., г. Москва;

7) на семинаре Московского общества испытателей природы, секция математического моделирования, январь 1978 г., г. Москва;

8) на международном симпозиуме по методам моделирования в экологии, сентябрь 1978 г., г. Телави, Гр. ССР;

9) на Всесоюзном совещании "Проблемы экологии Прибайколья", сентябрь 1979 г., г. Иркутск.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав и приложения. Общий объем 175 машинописных страниц, включая 6 страниц с табличным материалом и 39 рисунков. Список литературы содержит 61 работу на русском языке и 43 работы на иностранных языках.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В ОКЕАНСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ

В этой главе на основе обобщения многочисленных литератур-

ных данных описаны допущения, положенные в основу построения модели балансовых соотношений в биогеоценозе Перуанского течения. В качестве исходного материала для формирования функциональных зависимостей происходящих в экосистеме процессов использованы опубликованные в печати данные специализированных рейсов НИС "Академик Курчатов" в 1968 и 1974 гг., а также результаты других работ.

Построение имитационной модели потребовало детального математического описания абиотических (§ I) и биотических процессов (§ 2), а также взаимосвязей между ними. На экватории Перуанского течения наблюдаются заметные изменения освещенности и температуры. Поэтому протекание экологических процессов в различных точках течения существенно зависит от сезонных колебаний этих параметров. Полагается, что освещенность (ккал.м² сут.⁻¹) в точке с координатами (x, y) в момент времени t задана зависимостью $E_n = E(t, x, y, 0)$. Тогда освещенность на глубине

z можно достаточно точно аппроксимировать функцией

$$E(t, x, y, z) = E_n \exp(-\alpha z - \int_0^z B(x, y, u, t) du),$$

где α - показатель поглощения света чистой водой, B - концентрация суммарной биомассы примесей в воде. Приводятся примеры, демонстрирующие точность предложенной аппроксимации.

Для построения модели важным является учет физических процессов переноса вещества за счет турбулентной диффузии и течений. Изменение биомассы любого компонента модели $B_i(t, x, y, z)$ во времени и пространстве описывается уравнением

$$\begin{aligned} \frac{\partial B_i}{\partial t} + V_x \frac{\partial B_i}{\partial x} + V_y \frac{\partial B_i}{\partial y} + V_z \frac{\partial B_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} (D_H \frac{\partial B_i}{\partial x}) + \\ \frac{\partial}{\partial y} (D_H \frac{\partial B_i}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (D_V \frac{\partial B_i}{\partial z}) + \Omega_i. \end{aligned} \quad (I)$$

где D_H - горизонтальная составляющая коэффициента турбулентной диффузии, D_V - его вертикальная составляющая,

$V (V_x, V_y, V_z)$ - скорость течения в точке с координатами (x, y) на глубине z в момент времени t ; B_i - биологическая составляющая уравнения сохранения массы.

На основе изучения экспериментальных зависимостей изменения скорости фотосинтеза R_2 от освещенности, концентрации биогенных элементов B_{10} и температуры t° предложена аппроксимация этой зависимости:

$$R_2 = K_1 B_2 [1 - \exp(-K_{1.2} B_{10})] E \exp \left[K_2 \left(1 - \frac{E}{E_{opt}} \right) \right] \theta^{t-t^*},$$

где T^* и E_{opt} - оптимальные для фотосинтеза температура и освещенность; K_1 , K_2 и θ - коэффициенты, определяемые из условий наилучшего приближения экспериментальных данных.

В заключение первой главы проводится анализ составляющих уравнения баланса массы вещества и энергии для живых компонентов системы. Приводятся зависимости для рациона, затрат на энергетический обмен, отмирание, неувоенную пищу и потребление другими трофическими уровнями. Коэффициент выедания биомассы i -го уровня j -м уровнем определяется отношением

$$Q_{ij} = K_{ji} / \sum_{m \neq j} K_{jm} \bar{B}_m, \quad \text{где } S_j - \text{спектр питания}$$

j -го компонента, K_{ji} - показатель веса i -ой пищи в S_j .

Приводятся зависимости интенсивности дыхания и смертности живых компонентов от температуры и концентрации кислорода.

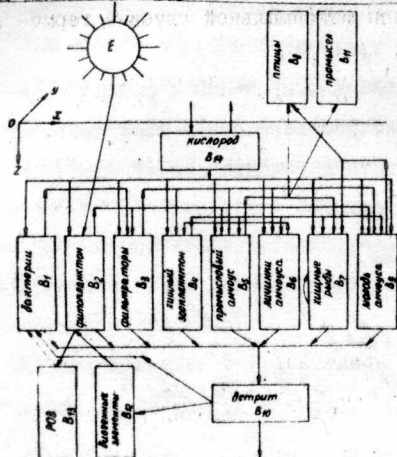
ГЛАВА 2. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЭКОСИСТЕМЫ

ПЕРУАНСКОГО ТЕЧЕНИЯ

В этой главе описывается блок-схема модели (§ 1), опреде-

ляются исходные предпосылки для построения уравнений и структуры модели (§ 2), формулируются уравнения модели (§ 3) и оценивается ее адекватность (§ 4).

В иерархической структуре трофических отношений сообщества Перуанского течения выделяются: бактериопланктон (B_1), фитопланктон (B_2), фильтраторы (B_3), хищный зоопланктон (B_4), три возрастных стадии анчуса (личинки - B_5 , молодь - B_6 , промысловый - B_7), хищные рыбы (B_8) и птицы (B_9). Среди косных компонентов экосистемы выделяются детрит (B_{10}), биогенные элементы (B_{11}), растворенное органическое вещество (B_{12}) и кислород (B_{13}). Блок-схема модели представлена на рис. I.



В связи с большой меридиональной протяженностью рассматриваемого района и наличием заметных метеорологических неоднородностей в модели учитывается зависимость основных параметров от времени и температуры. Это делается в соответствии с предложенными в гл. I соотношениями и в пределах тех возможностей, кото-

рые обеспечиваются натурными наблюдениями. По всей акватории вертикальные градиенты температуры определяются путем задания распределения температуры на горизонтах $Z = const$, согласованных с дискретной вычислительной сеткой. При этом шаг дискретизации данных во времени и пространстве задается в качестве произвольного параметра программы, количественно определяемого

по имеющейся информации. Учет имеющих место в районе Перуанского течения аномалий температуры, называемых явлением Эль-Ниньо, производится заданием в модели моментов T_3^0 наступления этих событий и величин T_3^{00} температурных скачков. Вертикальная структура распределений температуры учитывает положение термоклина, описываемого заданным функциональным соотношением. При численных расчетах на ЭВМ принято следующее описание положения термоклина: $HH(t, i, j) = H_0(t) \cdot H_{\infty}(t) \cdot H_0(t) \cdot (j - 0.5 \cdot \Delta j) / \Delta j$, где HH - глубина залегания термоклина (в метрах) в момент времени t в точке с координатами (i, j) ; H_0 и H_{∞} - глубины залегания термоклина вблизи берега и в открытом океане соответственно, M ; Δj - удаление полос максимальной глубины термоклина от береговой линии 0.5 в градусах.

Наряду с температурой на жизненные процессы в районе Перуанского течения оказывает влияние растворенный в воде кислород. Поэтому в модели учтены зависимости интенсивности дыхания живых компонентов от концентрации кислорода:

$$ti(t^{\circ}, B_{M}) = f_1(t^{\circ}) \cdot f_2(B_{M}),$$

где

$$f_1(t^{\circ}) = \begin{cases} t_i^{\circ}, & t^{\circ} \in [t_{i1}^{\circ}, t_{i2}^{\circ}] \\ t_i^{\circ} (a_i e^{-b_i t^{\circ}})^{\frac{t_i^{\circ} - t_i^{\circ 0}}{m_i}}, & t^{\circ} \notin [t_{i1}^{\circ}, t_{i2}^{\circ}] \end{cases}$$

$$f_2(B_{M}) = \begin{cases} 1, & B_{M} \geq B_{M,i}^{\circ} \\ \frac{B_{M}}{B_{M,i}^{\circ}}, & B_{M} < B_{M,i}^{\circ} \end{cases}$$

Здесь $[t_{i1}^{\circ}, t_{i2}^{\circ}]$ - температурная зона адаптации i -го компонента; $B_{M,i}^{\circ}$ - граница насыщенности воды кислородом, ниже которой происходит нарушение нормального ритма газообмена гидробионтов со средой; параметры $a_i, b_i, t_i^{\circ}, t_i^{\circ 0}, t_i^{\circ 00}, m_i$ выбираются

на основе аппроксимации экспериментальных данных.

Протекание биогеоценотических процессов в экосистеме Перуанского течения в значительной мере зависит также от структуры течений. В связи с этим в модели использована имитационная схема учета течений, которая отражает качественные и количественные особенности имеющихся гидродинамических процессов с помощью идентификации существующих представлений о структуре течений с дискретной пространственно-временной схемой расчета. При этом предполагается, что вихревая диффузия изотропна в горизонтальной плоскости. Масштабность диффузии определяется временным шагом модели.

Для имитации процесса миграции рыб и птиц в модели применена схема максимизации эффективного пищевого рациона при сохранении благоприятных температурных условий, в результате реализации которой пространственные перемещения мигрирующих компонентов совершаются с характерными скоростями таким образом, что обеспечивают им нахождение в тех участках ареала, где в данное время имеются наиболее благоприятные пищевые и температурные условия.

Динамика биомассы компонентов экосистемы описывается биогеоценотическим членом уравнения (1)

$$\dot{B}_i = R_i - H_i - T_i - M_i - \bar{B}_i \sum C_{ij} R_j \quad (2)$$

где $R_i = K_{10} B_i [1 - \exp(-V_i)]$ - рацион i -го компонента в представлении Ивлева В.С. (1955); $H_i = h_i R_i$ - затраты на неувоенную пищу; $T_i = t_i B_i^{0.67}$ - затраты на энергетический обмен со средой; $M_i = M_i [\max\{0, B_i - \hat{B}_i\}]^2$ - величина отмирания; $\bar{B}_i = \max\{0, B_i - B_{i, \min}\}$, $B_{i, \min}$ - минимальная потребляемая концентрация биомассы i -го компонента; V_i - эффективная

концентрация пищи, доступной i -му компоненту ($V_i = \sum_m K_{im} \bar{B}_m$); \bar{B}_i и Z_i - показатели зависимости скорости отмирания от концентрации биомассы.

Конкретизация уравнения (2) для всех живых компонентов экосистемы в соответствии с блок-схемой рис. 1 дается в § 3 и состоит в анализе отдельных особенностей каждого трофического уровня на основе учета имеющихся наблюдений *in situ*. В частности, в отличие от других гидробионтов бактерии характеризуются чувствительной зависимостью газообмена от концентрации пищи. Поэтому для бактериопланктона задана зависимость

$$T = t \cdot B_i^{\omega_i} [1 - \exp(-t_i \bar{B}_i - t_i' \bar{B}_{i1})] \quad . \text{ В уравнениях}$$

для компонентов анчосуа учитываются возрастные переходы из одной стадии в другую с постоянными скоростями. Уравнение (2) для описания изменения численности птиц имеет вид: $\frac{dB_p}{dt} = (1 - K_0) R_0 -$

$- M_0$, где $R_0 = \max \{ q (\Delta^2 z - z) / (1 z - \Delta^2 z / 2) \} K_{00} B_0 [1 - \exp(-V_0)]$,

$$V_0 = \sum_{s=1}^S K_{0s} \bar{B}_s + K_{00} \bar{B}_0 + \delta_0^1, \quad \delta_0^1 - \text{доля нерыбной пищи в}$$

рационе птиц; K_{00} - максимальная относительная скорость размножения птиц (количество яиц на одну особь в год).

Уравнения для косных компонентов приняты следующими.

Детрит:

$$\begin{aligned} \frac{dB_D}{dt} + V_1 \frac{dB_D}{dz} + V_2 \frac{dB_D}{dy} + V_3 \frac{dB_D}{dx} = \sum_{i=1}^n (M_i + K_i) + \frac{q}{\Delta z} (1 - \frac{dB_D}{dz}) + \frac{q}{\Delta y} (1 - \frac{dB_D}{dy}) \\ + \frac{q}{\Delta x} (1 - \frac{dB_D}{dx}) - P_0 B_D - U_0 \frac{dB_D}{dz} - E_0 (\frac{K_{00} R_0}{V_1} + \frac{K_{00} R_0}{V_2} + \frac{K_{00} R_0}{V_3}), \end{aligned}$$

где P_0 - скорость лизиса детрита, U_0 - скорость гравитационного оседания детрита.

Биогенные элементы:

$$\frac{\partial B_{10}}{\partial t} + V_x \frac{\partial B_{10}}{\partial x} + V_y \frac{\partial B_{10}}{\partial y} + V_z \frac{\partial B_{10}}{\partial z} = S_{10} B_{10} + S_1 \left(T_9 + \sum_{s=1}^2 T_s \right) +$$

$$+ S_2 \frac{\partial B_{10}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial B_{10}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial B_{10}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial B_{10}}{\partial z} \right) - \delta_{10} B_{10}$$

где коэффициенты S_1 и S_2 определяют скорости поступления биогенов за счет метаболических процессов и вертикального подъема воды; δ_{10} - скорость ассимиляции биогенов фитопланктоном.

Растворенное органическое вещество:

$$\frac{\partial B_{10}}{\partial t} + V_x \frac{\partial B_{10}}{\partial x} + V_y \frac{\partial B_{10}}{\partial y} + V_z \frac{\partial B_{10}}{\partial z} = K_{10} B_{10} - B_{10} \left(\frac{K_{11}}{V_1} R_1 + \frac{K_{12}}{V_2} R_2 + \right.$$

$$\left. + \frac{K_{13}}{V_3} R_3 \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial B_{10}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial B_{10}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial B_{10}}{\partial z} \right),$$

где K_{10} - коэффициент, характеризующий скорость выделения РОВ в процессе фотосинтеза.

Растворенный кислород:

$$\frac{\partial O_2}{\partial t} + V_x \frac{\partial O_2}{\partial x} + V_y \frac{\partial O_2}{\partial y} + V_z \frac{\partial O_2}{\partial z} = \delta_{11} B_{10} - \sum_{s=1}^2 \xi_s T_s - \xi_3 T_3 +$$

$$+ \max \left\{ 0, \frac{Z_{14} - z}{Z_{14}} \right\} W_{14} - \delta_{10} S_{10} B_{10}$$

где δ_{11} - показатель скорости выделения O_2 при фотосинтезе; ξ_s - показатель скорости потребления кислорода гидробионтами s -го уровня; Z_{14} - максимальная глубина, до которой происходит обмен кислородом с атмосферой; W_{14} - разность меж-

ду скоростями инвазии и эвазии; δ_{10} - показатель скорости потребления кислорода при разложении детрита.

В рамках принятых в работе допущений адекватность модели оценивается путем качественного и количественного сопоставления результатов расчета на ЭВМ с опубликованными в литературе данными по количеству птиц и объему вылова анчоуса (см.рис.2), а также по комплексу всех проведенных в гл.4 экспериментов на ЭВМ.

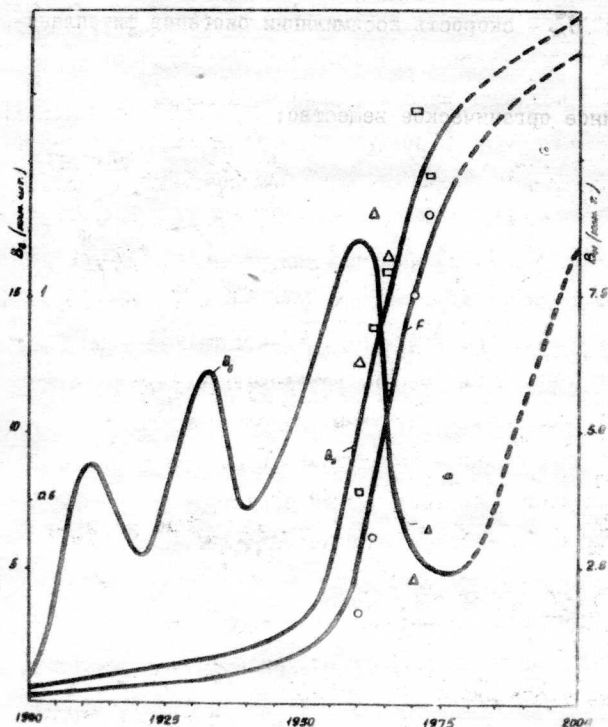


Рис.2. Динамика компонентов B_0 и B_{11} экосистемы. Данные наблюдений: \circ - промысловые усилия; \square - вылов анчоуса; Δ - количество птиц (по литературным источникам).

ГЛАВА 3. ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ

ЭКОСИСТЕМЫ ПЕРУАНСКОГО ТЕЧЕНИЯ

В экологии под устойчивостью обычно понимают способность биологического сообщества активно противостоять возмущающим факторам окружающей среды, что при моделировании отождествляется с поведением определенного критерия. Среди экологов широко распространены характеристики устойчивости сообществ, основанные на информационной мере разнообразия (по Шеннону) и на представлении экосистемы в виде открытой термодинамической системы. В § 1 проводится сравнительный анализ таких критериев оценки устойчивости, как энтропия, мера Симпсона, мера Гуда, функция разнообразия Джини, мера Свирежева, функция Ляпунова, абсолютные моменты Федорова и функция живучести. На основе модельных расчетов делается вывод о том, что наиболее информативным критерием оценки устойчивости экосистемы Перуанского течения является функция живучести, отражающая согласно Эшби и Маргалефу целостность живой системы. Модель считается устойчивой, а само сообщество — находящимся в целостном состоянии, если при фиксированной трофической структуре на заданном интервале времени не нарушается условие: $V(t) > V_{min}$, где

$$V(t) = \frac{\sum B_i(t)}{\sum B_i(t_0)}$$

В § 2 рассматриваются климатические и антропогенные аспекты нарушения устойчивости экосистемы Перуанского течения. Возможные флуктуации температуры воды t^0 описываются соотношением $t^0 = \int_{t_0}^t TTT[S] \omega(t, x, y, z) T_0$, где S_0 — нормирующий множитель; ω — функция, определяемая характером эксперимента на ЭВМ; T_0 — глобальная температура приземного

слоя атмосферы, определяемая формулой $T_a = K_T (E - E^*) + (h_0 G)^{1/2} W(c)$ (Моисеев Н.Н. и др., 1979). Освещенность на поверхности зависит от замутненности ξ атмосферы (облачность, запыленность и т.п.): $E_0 = E_0 \exp(-\alpha \xi + \beta)$. Функция $W(c)$ описывает "парниковый эффект" (Тарко, 1978).

Оценке качественной устойчивости системы посвящен § 3. На основе исследования знакового ориентированного графа сообщества Перуанского течения показано, что в изучаемом случае достаточные условия критерия знак-устойчивости Квирка-Рупперта не выполняются.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ ПЕРУАНСКОГО ТЕЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ЭВМ

В данной главе исследуется влияние климатических факторов на живучесть системы (§ 1), оценивается влияние изменения абioticеских и гидрологических условий функционирования системы (§ 2), оценивается чувствительность системы к вариациям параметров модели (§ 3) и проводится исследование живучести системы в условиях нарушения связей трофического графа сообществе (§ 4).

В рамках модели рассмотрены различные гипотетические ситуации изменчивости климатических условий функционирования экосистемы. При этом исследуются ситуации с изменением температуры воды, освещенности на поверхности океана и замутненности атмосферы. В результате проведенных экспериментов на ЭВМ установлено, что в нормальных условиях наблюдается четкое разграничение областей обитания анчоуса и хищных рыб. При

этом наибольшая концентрация биомассы анчоуса имеет место в прибрежной зоне шириной около $1,5-2^{\circ}$ по долготе, в то время как наибольшая концентрация биомассы хищных рыб устанавливается в открытом океане. Эта картина прослеживается на всей экватории и при естественных распределениях температур устойчива (рис.3).

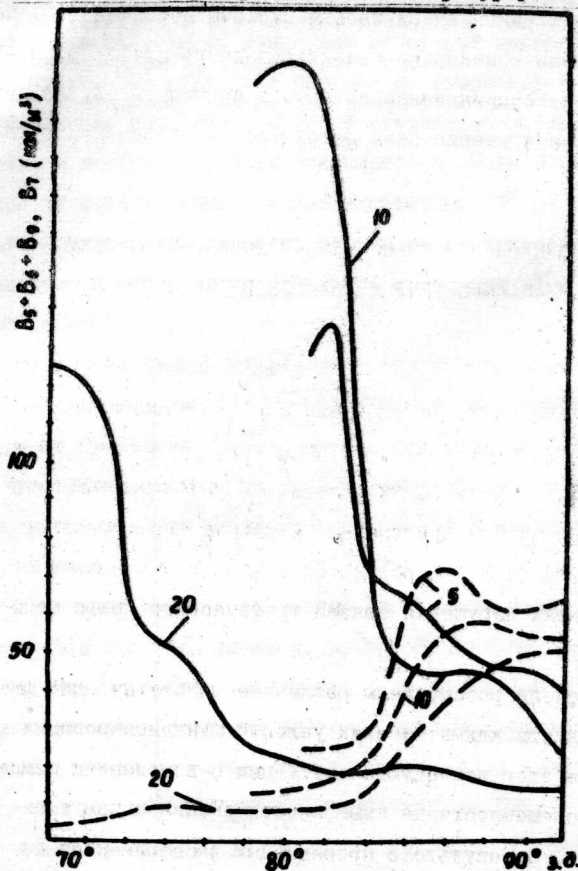


Рис.3. Сравнительное распределение биомассы анчоуса (сплошная линия) и хищных рыб (пунктир). На кривых указаны значения градусов южной широты.

Снижение общего уровня температуры на 1°C приводит к возрастанию площади пересечения ареалов обитания анчоуса и хищных рыб с увеличением суммарной биомассы почти на 10%.

В годы ЭЛЬ-НИНЬО эффект разделения экосистемы на прибрежную и открытого океана полностью исчезает, сопровождаясь снижением суммарной биомассы рыб. Колебания температуры в пределах $\pm 5^{\circ}\text{C}$ оказываются в целом для системы безопасными, но могут переводить ее в другие квазистационарные состояния с возрастанием времени установления устойчивого цикла (рис.4).

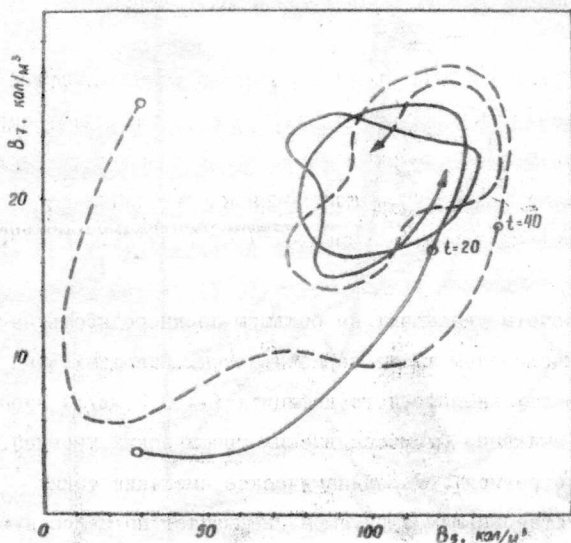


Рис.4. Фазовый разрез экосистемы

Изменения освещенности и замутненности атмосферы влияют на функционирование экосистемы через колебания температуры воды и скорости фотосинтеза. Приводятся примеры расчетов вертикальной структуры системы. Показано, что с увеличением F вертикальная структура экосистемы с сохранением формы заглубляется, а при уменьшении F происходит смещение слоя максимального фотосинтеза к поверхности со снижением суммарной биомассы. Расчеты показывают, что изучаемая система по отношению к вариациям освещенности проявляет, с одной стороны, большую чувствительность, с другой - высокую стабильность. Если в целом для биосферы по существующим оценкам уменьшение F на 2% может привести к оледенению планеты, то для рассматриваемой системы безопасными оказываются локальные колебания F в пределах от -60% до +600%.

На основе данных гидрологических съемок в районе Перуанского течения, описанных в литературе, рассмотрены различные сценарии по проведению экспериментов над моделью с целью изучения ее чувствительности к вариациям концентраций биогенных элементов, растворенного кислорода, скоростей и направлений движения водных масс.

Модельные расчеты указывают на большую неоднородность насыщенности вод кислородом как в горизонтальных разрезах, так и по глубине. В местах кислородного дефицита ($< 0,2$ мл/л) наблюдается резкое снижение биомассы высших трофических уровней. Однако в целом по региону гидродинамическое смещение таких зон, обладая неустановившимся режимом, не влияет на целостную устойчивость системы для различных начальных концентраций кислорода и изменений скорости выделения кислорода при фотосинте-

зе соответственно. При $B_4(t_0, x, y, z) \geq 0,5$ мл/л после определенного периода времени система преодолевает нехватку кислорода. При $B_4(t_0, x, y, z) \leq 0,2$ мл/л сообщество оказывается не в состоянии выйти на стационарный режим функционирования.

Колебания концентрации биогенных элементов в начальный момент времени в широких диапазонах не сказываются существенно на поведении системы в моменты $t \gg t_0$. Лишь при $B_0(t_0, x, y, z) \ll 0,1$ мкг-ат/л система начинает испытывать эффекты сильного лимитирования по всей акватории. Приводится таблица сравнительных расчетов динамики экосистемы при концентрации биогенных элементов в момент $t = t_0$ 0,05 мкг-ат/л и 2 мкг-ат/л.

При оценке турбулентного выноса биогенных элементов в слое выше термоклина в модели принята средняя скорость подъема вод 10^{-3} см/сек. Ее отклонения в пределах от $3 \cdot 10^{-4}$ см/сек до 10^{-1} см/сек оказываются допустимыми с точки зрения сохранения устойчивости системы и интегральной картины распределения компонентов по акватории. Однако устойчивость экосистемы нарушается при более интенсивном, а главное, при более медленном ($< 3 \cdot 10^{-4}$ см/сек) подъеме воды. Проведенные здесь эксперименты позволяют ответить на вопрос о том, насколько можно повысить продуктивность системы за счет увеличения скорости вертикальной адвекции. Это возможно не более чем на 40%. Хотя этот ответ нельзя считать абсолютно категоричным, но анализ результатов моделирования показывает, что увеличение интенсивности подъема богатых биогенными элементами вод в шельфовой зоне не приводит к резкому возрастанию продуктивности из-за того, что здесь и без того практически отсутствует лимити-

рование биогенными элементами, а температура воды снижается. В открытом же океане увеличение параметров V_x , ρ_{12} и V_v вызывает заметное возрастание биомассы фитопланктона, но из-за длинной трофической цепи конечный эффект оказывается незначительным.

Изучается важный для практических приложений вопрос об оценке чувствительности модели к вариациям ее параметров (§ 3). На основе полученных оценок составлена таблица необходимых точностей измерения основных параметров системы, таких как, усвояемость пищи ($\pm 20\%$), величин затрат на энергообмен со средой ($\pm 25\%$) и отмирание (-20 , $+10\%$), максимальных суточных рационов (-15 , $+10\%$), скорости ассимиляции биогенов при фотосинтезе (-20 , $+15\%$), коэффициентов горизонтальной ($\pm 50\%$) и вертикальной (-20 , $+30\%$) турбулентной диффузии и др.

В § 4 проведено исследование живучести системы в условиях нарушения связей трофического графа сообщества экосистемы Перуанского течения. Результаты проведенных на ЭВМ экспериментов указывают на то, что расширение спектров питания компонентов за счет включения в их пищевой рацион детрита не оказывает существенным образом на поведении системы. Также не столь существенными оказываются связи между хищными рыбами и хищным зоопланктоном, фильтраторами и анчоусом. Наиболее существенными оказываются связи между бактериями и детритом, анчоусом и фитопланктоном. "Срезание" верхних трофических уровней (птиц, хищных рыб) приводит к тому, что в начале системы быстро увеличивается суммарную биомассу, но затем за счет появления "свободного хищника", неуравновешенного множемством подчиненности, общая биомасса системы начинает претерпевать колебания с большой амплитудой.

Делается вывод о необходимости более тщательного изучения и уточнения множества подчиненности каждого трофического уровня, особенно высших трофических уровней.

В Приложении I дается описание и текст программы для ЭВМ, реализованной на языке АЛГОЛ-60.

Приложение 2 содержит перечень параметров модели Перуанской экосистемы, которые необходимо экспериментально определять.

ВЫВОДЫ

1. На основе анализа обширного фактического материала предложены функциональные аппроксимации различных абиотических, гидродинамических и биотических процессов в экосистемах океана. Рассмотрены формулы для описания изменения освещенности с глубиной, зависимости интенсивности дыхания и смертности от температуры и насыщенности воды кислородом.

2. Впервые построена пространственно-временная имитационная модель функционирования экосистемы района Перуанского течения. В модели учитываются взаимосогласованные в соответствии с имеющимися энергетическими и информационными связями изменения биомассы тринадцати элементов системы. При этом скорости этих изменений определяются факторами внешней среды.

3. Для построения модели разработаны эффективные при реализации на ЭВМ схемы учета климатических и гидродинамических факторов. Эти схемы позволяют включать в модель распределения температур и направлений течения с учетом возможных изменений по широте, долготе и глубине, а также с учетом сезонности.

4. Проведена качественная и количественная идентификация модели на ЭВМ. При этом значения параметров модели выбирались по опубликованным в печати результатам натуральных наблюдений. Исследованы качественная устойчивость модели и чувствительность модели относительно вариаций параметров.

5. Сформулирован эффективный критерий для оценки устойчивости экосистемы в форме функции живучести. Проведено сравнение этого критерия с другими критериями и показаны его определенные преимущества.

6. Осуществлены на ЭВМ эксперименты по изучению устойчивости системы в условиях изменения температуры, освещенности, насыщенности вод кислородом, концентрации биогенных элементов, скорости вертикальной адвекции, связей трофического графа и различных биотических параметров. На основе этих экспериментов сформулированы требования к необходимым точностям определения значений основных коэффициентов модели.

7. Установлена важная роль насыщенности воды кислородом в формировании структуры пятнистости акватории. Показано, что система выдерживает кратковременное (менее I суток) снижение концентрации кислорода по всей акватории не ниже 0,5 мл/л. Изменения скорости выделения кислорода при фотосинтезе в пределах -10% - $+20\%$ не нарушают устойчивости экосистемы. При ее уменьшении на 20% система резко снижает суммарную биомассу, а при уменьшении этой скорости на 25% система погибает.

8. Показано, что колебания температуры воды в пределах $\pm 5^{\circ}\text{C}$ безопасны для функционирования системы. Сообщество экосистемы Перуанского течения способно выдерживать увеличение темпе-

ратуры по всей акватории на 7°C в течение 80 суток, а уменьшение на 7°C - в течение 190 суток.

9. Установлено, что при изменении скорости вертикальной адвекции от $3 \cdot 10^{-4}$ до 10^{-1} см/сек средняя интегральная картина распределения элементов сообщества не претерпевает существенных изменений. Резкие нарушения функционирования системы наступает при более интенсивном ($> 10^{-1}$ см/сек), а главное, при более медленном подъеме воды ($< 3 \cdot 10^{-4}$ см/сек).

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Айвазян М.П. Вычислительные аспекты построения трехмерных имитационных динамических моделей водных экосистем. - В кн.: Проблемы экологии Прибайкалья, Иркутск, Иркутский гос.ун-т, 1979, с.139-140.

2. Айвазян М.П., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А., Флейшман Б.С. Математическая модель и расчет биоокеанографических полей Перуанского течения. - Ученые записки Ереванского государственного ун-та, 1976, № 3, с.100-109.

3. Айвазян М.П., Макмак С.М. Использование параметрической избыточности в моделях живучести. - Седьмой Всесоюзный симпозиум по проблеме избыточности в информационных системах, часть IV, Ленинград, 1977, с.8-11.

4. Макмак С.М., Айвазян М.П., Флейшман Б.С., Крапивин В.Ф. Математические модели функционирования океанских экосистем. - В кн.: Математическая теория биологических процессов, Калининград, 1976, с.159-160.

5. Крапивин В.Ф., Малютин В.И., Айвазян М.П. Игровые модели теории систем. - В кн.: Вопросы математического моделирования. ИФЗ АН СССР, М., 1979, с.56-78.

660036, г. Красноярск, Академгородок
Институт физики им. Л. В. Киренского СО АН СССР
Заказ № 617 Объем н. л. 1 Тираж 130
Подписано к печати 20. X. 80 г. ЯЛО3587

