



УДК 551.463

В. Н. Еремеев¹, докт. физ.-мат. наук, акад. НАН Украины, ген. директор ОЦ НАН Украины,
Е. Ф. Васечкина², канд. физ.-мат. наук, с.н.с., **Е. М. Игумнова**², вед. инж.,
В. С. Латун², канд. физ.-мат. наук, с.н.с., **И. Е. Тимченко**², докт. физ.-мат. наук, зав. отд.,
В. Д. Ярин², канд. физ.-мат. наук, с.н.с.

¹Океанологический центр Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

²Морской гидрофизический институт Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ

Рассмотрены различные модели интегральных (пространственно осреднённых) процессов в морских экосистемах. Разработана объектно-ориентированная модель (ООМ) планктонного сообщества пелагиали, дополненная гидрохимическим блоком, который учитывает аэробные и анаэробные циклы азота и серы. Гидродинамика среды описывается интегральной двухслойной моделью, учитывающей влияние атмосферы на развитие интегральных процессов. ООМ применена для оценки явления гипоксии на мелководье, а также динамики производства и потребления кислорода в различных гидрохимических условиях. Построена математическая модель многоуровневой системы «фитопланктон – зоопланктон – рыбы – рыбный промысел». Изучаются реакция подобных систем на периодические и импульсные возмущения и их эволюционная релаксация к стационарным состояниям. Предложена динамико-стохастическая модель (ДСМ) интегральных процессов в экосистеме северо-западного шельфа Чёрного моря (СЗШ ЧМ). Динамическая часть модели содержит семь переменных: концентрации фито и зоопланктона (двух видов), личинок рыб и рыб, нутриентов и детрита. С её помощью были имитированы средние многолетние сценарии внутригодовой изменчивости концентраций этих субстанций в море, а также возможные отклонения от этих сценариев, наблюдаемые для конкретного года. В стохастической части модели взаимная корреляция между моделируемыми процессами использована для нахождения коэффициентов уравнений и для ассимиляции имитированных данных наблюдений. Делается вывод о перспективности интегрального описания процессов в морских экосистемах, основанного на объектно-ориентированном и динамико-стохастическом моделировании.

Ключевые слова: объектно-ориентированная модель, устойчивость экосистемы, ассимиляция наблюдений

Математическое моделирование морских экосистем позволяет исследовать широкий спектр возможных сценариев развития разнообразных биогеохимических и биологических процессов в морской среде, генерируемых действием внешних факторов, а также прогнозировать их эколого-экономические последствия. Успехи в этой области знаний были продемонстрированы в ряде научных трудов, среди которых можно выделить известное профильное издание ЮНЕСКО [17]. В последние годы представленные в [17] научные и методические подходы были успешно использованы и существенно развиты в многочислен-

ных исследовательских работах, в том числе отражающих специфику черноморской экосистемы [3, 12, 15, 29]. В то же время наметился определённый прогресс в применении новых методов моделирования, относящихся к системному анализу и, в частности, к теории сложных адаптивных систем, которая активно востребована не только в технико-технологическом секторе науки, но и в современном естествознании. Сложный характер химико-биологических, физико-биологических и физико-химических взаимодействий в морской среде заставляет использовать методы именно этой теории для поиска нетради-

ционных путей и подходов к моделированию процессов в морских экосистемах [6 – 9].

В настоящей работе мы остановимся на трёх различных моделях интегральных процессов, отражающих, с нашей точки зрения, существующие тенденции моделирования морских экосистем применительно к шельфовой зоне моря. Их интегральная оценка означает, что соответствующие пространственно-временные поля параметров морской экосистемы шельфовой зоны осреднены по пространству и сведены к системе взаимосвязанных процессов, условно относимых к центру моделируемой акватории.

1. Объектно-ориентированная модель интегральных процессов в морской экосистеме

Описание модели. Рассмотрим объектно-ориентированную модель морской экосистемы, предназначенную для имитационного моделирования различных биогеохимических явлений и процессов в период весенне-летнего прогрева, и в данном случае, развития гипоксии на мелководье. Модель состоит из трёх блоков, которые условно можно обозначить как «гидрология», «гидрохимия» и «биология». Расчётная область представляет собой параллелепипед с постоянной высотой, равной глубине бассейна. На боковых границах заданы условия периодичности. Гидрологический блок представлен двухслойной моделью, в которой верхний слой отождествляется со слоем ветрового перемешивания и ограничивается слоем скачка, переменным во времени и пространстве.

При анализе динамических условий возникновения гипоксии и замороз было установлено, что в период летней стагнации адвективный перенос сильно ослаблен, что даёт ос-

нование ограничиться турбулентным процессом обмена. Верхний слой получает поток импульса и тепла из атмосферы, через его верхнюю границу происходит газообмен. Турбулентное перемешивание ограничивается верхним слоем, толщина которого определяется потоками импульса и тепла на границе с атмосферой. При смене ветра стационарное состояние слоя устанавливается в течение одного шага по времени (квазистационарный ветровой режим).

Используемая двухслойная гидродинамическая модель представляет собой упрощённый вариант интегральной модели верхнего слоя Чёрного моря [1] Нижний слой предполагается однородным по плотности, т.е. потоки тепла и пассивной субстанции из верхнего слоя практически мгновенно распространяются на всю его толщину. Такое упрощение обуславливается его малой толщиной – глубина моделируемого участка шельфа задаётся равной 30 м. Модель описывает пространственно-временную изменчивость температуры (T^0) и глубины (h) верхнего перемешанного слоя и температуры нижнего слоя (T^h). Поскольку масштаб пространственной изменчивости полей ветра и температуры воздуха над морем (особенно в летний период) превышает размер расчётной области (5×5 км), в настоящих расчетах пространственная динамика T^0 , h , T^h не учитывалась, и использовался одномерный вариант модели:

$$\frac{dT^0}{dt} = \Gamma^0 - \Gamma^{h-0}, \quad \Gamma^0 = a(T^0 - T^a), \quad (1)$$

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{T^0 - T^h} (\Gamma^{h-0} - \Gamma^{h+0}), \quad (2)$$

$$G - D = 0.5\alpha gh\rho_w(\Gamma^0 + \Gamma^{h-0}), \quad (3)$$

$$G = C_g V_*^3, \quad D = \rho V_*^3 \left(f \left(\frac{h}{L_1} \right) + \frac{a_2 h}{L|N|} \right), \quad f \left(\frac{h}{L_1} \right) = \begin{cases} \frac{a_1 h}{L_1} npu & h \leq \frac{C_g}{a_1} L_1 \\ Cg & npu & h > \frac{C_g}{a_1} L_1 \end{cases}$$

где Γ^0 – поток тепла через поверхность; Γ^{h-0} и Γ^{h+0} – потоки тепла на нижней границе перемешанного слоя и верхней границе нижнего слоя соответственно; T^a – температура воздуха; α – коэффициент термического расширения воды; ρ_w – плотность воды; G, D – интегральные генерация и диссипация энергии турбу-

лентности; $V_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}}$ – динамическая скорость

трения в воде; τ_0 – напряжение трения ветра на поверхности; L – масштаб длины Монина – Обухова; L_1 – масштаб толщины пограничного слоя; $N = L/L_1$ – безразмерный параметр стратификации Казанского – Монина; C_g, a, a_1, a_2 – эмпирические коэффициенты.

Для замыкания системы уравнений (1 – 3) предполагалось, что при вовлечении ($dh/dt > 0$) поток тепла на верхней границе термоклина Γ^{h+0} равен нулю, а при обратном процессе ($dh/dt < 0$) полагался равным нулю поток на нижней границе перемешанного слоя Γ^{h-0} . В результате система распадается на две системы уравнений, соответствующие двум режимам динамики верхнего слоя. Переход от одного режима к другому происходит при выполнении условия, следующего из уравнения (3): вовлечение имеет место, если $G - D - 0,5\rho_w\alpha gh\Gamma^0 > 0$. Если же это условие не выполняется, то наблюдается обратный процесс – антивовлечение.

При вовлечении часть водной массы нижнего слоя попадает в верхний слой, в результате чего характеристики последнего меняются, а значения соответствующих характеристик нижнего слоя остаются неизменными. При антивовлечении происходит симметричный процесс в нижнем слое, и в этом случае термоклин не влияет на характеристики перемешанного слоя. Однако в результате газо- и теплообмена через поверхность температура и содержание кислорода в верхнем слое могут измениться.

Таким образом, использование двухслойной модели с переменным во времени

верхним слоем вносит дополнительное слагаемое в уравнения для гидрохимических переменных X_i :

$$\frac{dX_i}{dt} = K_x \nabla^2 X_i + F_i + A_i + \frac{dh}{h} (X_i^h - X_i) \quad \text{для верхнего слоя,} \quad (4)$$

$$\frac{dX_i^h}{dt} = K_x \nabla^2 X_i^h + F_i + A_i + \frac{dh}{H-h} (X_i^h - X_i) \quad \text{для нижнего слоя.} \quad (5)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

Здесь F_i, A_i – функции источников (стоков), обусловленные химическими и биологическими процессами соответственно; dh – изменение глубины перемешанного слоя в течение одного шага по времени; H – глубина бассейна; K_x – коэффициент горизонтальной диффузии.

Для блока «гидрохимия» была использована модель [25], разработанная для условий редокс-зоны Чёрного моря. Это связано с тем, что процессы, происходящие на шельфе во время развития замороз, аналогичны процессам в переходной зоне [26]. Переменными блока являются концентрации органических и неорганических соединений азота, кислорода, соединений серы в верхнем и нижнем слоях. Для задания функций F_i в уравнениях (4, 5) была использована химико-биологическая модель, совместно описывающая циклы азота и серы в аэробно-анаэробных условиях и разработанная для моделирования процессов в редокс-зоне Чёрного моря [25].

В названной модели рассчитывались следующие переменные: взвешенный и растворённый органический азот (PON, DON), аммоний (NH_4), нитриты (NO_2), нитраты (NO_3), сероводород (H_2S), элементарная сера (S^0), тиосульфаты ($S_2O_3^{2-}$), сульфаты (SO_4^{2-}), кислород (O_2). На рис. 1 представлена схема трансформации соединений азота и серы.

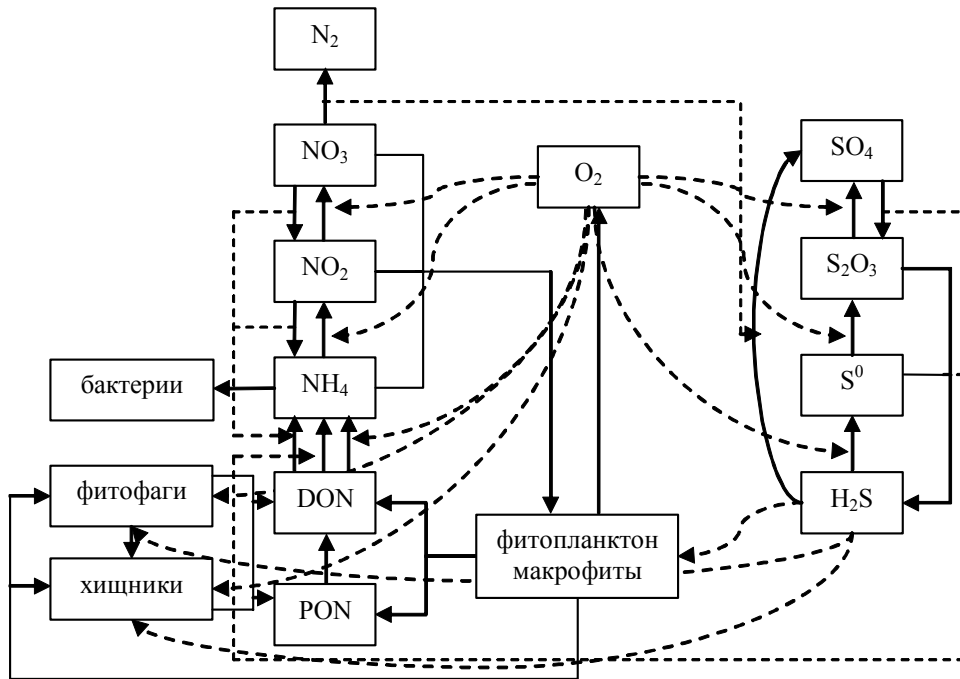


Рис. 1 Схема трансформации соединений азота и серы
 Fig. 1 Transformation scheme for nitrogen and sulfur compounds

Скорости протекания процессов зависели от концентрации растворённого кислорода и нитратов. Эти зависимости, нормированные и приведенные к интервалу [0 1], характеризовали степень активности соответствующей группы бактерий при данной концентрации кислорода (нитратов). Детальное описание функций источников и стоков F_i в (5, 6), соответствующих базисным реакциям, и список стехиометрических констант и эмпирических коэффициентов можно найти в [24].

В основу блока «Биология» положена объектно-ориентированная модель (ООМ), разработанная для описания динамики планктонного сообщества [24]. Специфика этой модели состоит в том, что экосистема представляется в виде совокупности дискретных объектов, существующих в непрерывной среде. В моделях такого типа («индивидуум – ориентированные» модели) в качестве базового объекта обычно берётся компонент, расположенный на нижнем уровне иерархии системы.

В нашей модели базовым объектом является объём воды (ближайшее жизненное пространство) с содержащимися в нём организмами какого-либо одного вида. Это – основная структурная единица модели, для которой определены следующие свойства и функции: способность объектов продуцировать новую биомассу, размножаться, оценивать градиент поля пищевого ресурса и двигаться для улучшения условий питания, потреблять доступную пищу и самим служить пищей для следующего звена трофической цепи. Изменение состояний этих объектов и взаимодействие их друг с другом определяют интегральное поведение модели. Неживые элементы системы – соединения азота, серы, кислород, органическое вещество (взвешенное ВОВ и растворённое РОВ), также как и гидрофизические характеристики среды описываются традиционным образом на сетке.

Динамика биомассы фитопланктона удовлетворяла соотношениям:

$$\frac{dB_p}{dt} = C_p(1 - k_1)B_p - k_2B_p - \mu_p B_p - E_p, \quad (6)$$

$$C_p = C_p^{\max} f_1 f_2 f_3 B_p^{-\beta},$$

$$f_1 = 0.2 + 0.62(e^{0.21T^0} - 1)/(1 + 0.28e^{0.21T^0}),$$

$$f_2 = \left(1 - e^{-a^B I_0 / C_p^{\max}}\right) e^{\beta^B I_0 / C_p^{\max}}, \quad I_z = I_0 e^{-\alpha z},$$

$$f_3 = f_4 + f_5,$$

$$f_4 = \frac{[\text{NH}_4]}{([\text{NH}_4] + K_{\text{NH}_4})},$$

$$f_5 = \frac{([\text{NO}_3] + [\text{NO}_2])e^{-\psi[\text{NH}_4]}}{([\text{NO}_3] + [\text{NO}_2] + K_{\text{NO}_3})},$$

где B_p – биомасса фитопланктона; k_1 , k_2 и μ_p – удельные скорости дыхания, экскреции и отмирания фитопланктона; C_p – удельная скорость роста фитопланктона; E_p – выедание фитопланктона; C_p^{\max} – максимальная удельная скорость роста фитопланктона; T^0 – температура воды; I – освещённость; I_0 и I_z – освещённость на поверхности воды и на глубине z соответственно; α – коэффициент экстинкции; a^B – начальный наклон кривой зависимости интенсивности фотосинтеза от освещённости [7]; β^B – параметр фотоингибирования [23]; K_{NH_4} , K_{NO_3} – константа полунасыщения по аммонию и нитратам соответственно [24]; ψ – коэффициент формулы Фэшэма [27]. Сомножитель $B_p^{-\beta}$ учитывает влияние концентрации биомассы фитопланктона на скорость его роста. В квадратных скобках указаны концентрации соответствующих химических веществ. Конкретные значения фотосинтетических параметров и диапазон изменения освещённости взяты из [23], где они оценивались по наблюдениям в Чёрном море.

Планктонные организмы в модели описывались объектами двух видов. Это были фитофаги и более крупный хищный зоопланктон. Подробное описание объектов, моделирующих биологические компоненты системы, приведено в [24]. Для учёта влияния придонной флоры на процесс развития гипоксии в модель был добавлен такой тип биообъектов, как макрофиты. Эти объекты полностью сосредоточены в нижнем слое, как бы «прикреплены ко дну».

Они также геометрически представляли собой цилиндры, причём высота цилиндра не менялась со временем. По мере роста биомассы объекта увеличивался только его радиус. Процессы фотосинтеза, ассимиляции биогенов, дыхания, выделения макрофитов параметризовались по аналогии с фитопланктоном. Скорости процессов взяты из [16], где они оценивались по натурным данным.

Потребление пищевых ресурсов биологическими объектами осуществлялось из неоднородной по вертикали среды, поскольку вертикальный размер объектов совпадал с глубиной водоёма. Поля фитопланктона, органического вещества и других гидрохимических переменных модели рассчитывались отдельно для верхнего и нижнего слоёв. Результирующая «эффективная биомасса», которая могла быть утилизирована на рост планктона, вычислялась с учётом текущего положения границы между двумя слоями. В той же пропорции, соответствующей соотношению между толщинами двух слоёв, окружающая среда получала вещества, выделяемые в результате жизнедеятельности планктонных организмов.

Вводился коэффициент учёта влияния недостатка кислорода и роста концентрации сероводорода на смертность всех растительных и животных элементов системы согласно соотношениям:

$$m'_i = m_i \left(1 + \frac{[\text{H}_2\text{S}]}{0.005}\right),$$

для фитопланктона и макрофитов (7)

$$\text{и } m'_i = m_i (10.2 - 18.0 * [\text{O}_2]), \text{ если } [\text{O}_2] \geq [\text{O}_2]_m$$

для зоопланктона, (8)

где m_i – коэффициент смертности i -го живого элемента системы в нормальных аэробных условиях; $[\text{H}_2\text{S}]$ и $[\text{O}_2]$ – концентрация сероводорода и кислорода соответственно; $[\text{O}_2]_m$ – минимально допустимая пороговая концентрация кислорода, ниже которой начинался режим кислородного голодания.

Увеличение концентрации растворён-

ного кислорода в результате фотосинтеза и его потребление планктонными организмами учитывалось в настоящем варианте модели в явном виде. Вместе со слагаемыми, которые описывали затраты кислорода в ходе химических реакций, эти источники и стоки определяли результирующее значение концентрации кислорода в верхнем и нижнем слоях. Газообмен через поверхность рассчитывался по [16]:

$$Q = \alpha n_i n_v ([O_2] - [O_2^H]), \quad [O_2^H] = 9,2 - 0,407(T^0)^{0,685}, \quad (9)$$

где $[O_2^H]$ – насыщающее значение концентрации кислорода, зависящее от температуры верхнего слоя; α – коэффициент обмена, равный $11,5 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ в случае эвазии и $22,0 \text{ л} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$ для инвазии кислорода; n_i – температурный коэффициент газового обмена для приведения констант от 20^0C к наблюдаемой температуре воды $n_i = 0,62 + 0,0264 \cdot T^0$; n_v – интегральный коэффициент газового обмена, зависящий от состояния поверхности моря и скорости ветра над ним V :

$$n_v = 1 + 0,27V^2 \quad \text{при } V \leq 8 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$$

$$n_v = -7,4 + 0,40V^2 \quad \text{при } V > 8 \text{ м} \cdot \text{сек}^{-1}$$

Если концентрация кислорода в нижнем слое превышала значение насыщения при соответствующей температуре, считалось, что избыточный кислород переходит в газообразное состояние и поднимается к поверхности воды в виде пузырьков.

Функции биологических источников (стоков) A_i в уравнениях (6) рассчитывались, исходя из интегральных величин, полученных как результат агрегирования функций выделения (изъятия) кислорода и органических и неорганических соединений азота объектами ООМ. Таким образом, уравнения вида (6) были составлены для каждого из компонентов гидрoхимической модели, перечисленных выше. Уравнения решались численно на сетке 50×50 с шагом по горизонтали $\Delta x = \Delta y = 100\text{м}$, шаг по времени 0.25 сут. Использовалась явная схема

с центральными разностями. Коэффициент горизонтальной диффузии рассчитывался по формуле $K_x = \Delta x^2 / 10 \Delta t$. Концентрации гидрoхимических компонентов изменялись, управляемые процессами, происходящими в верхнем и нижнем слоях. Обмен между слоями осуществлялся в зависимости от атмосферных условий. Помимо этого механизма обмена учитывалось опускание в нижний слой детрита, образующегося в верхнем слое. Скорость опускания варьировала, и как показали эксперименты, этот фактор оказывает заметное влияние на скорость развития гипоксии в нижнем слое. В расчётах, приведённых ниже, скорость опускания была задана $2 \text{ м} \cdot \text{сут}^{-1}$.

Анализ результатов численных экспериментов. Для изучения условий возникновения гипоксии и особенностей её пространственного распространения выполнены следующие эксперименты. Имитировался весенне-летний прогрев верхнего слоя и начало формирования сезонного скачка плотности. В качестве внешних управляющих воздействий заданы: динамическая скорость трения в воде (среднее значение $0.6 \text{ см} / \text{сек}$), температура воздуха (среднее значение увеличивается с 15^0C до 25^0C), интенсивность солнечной радиации в зоне ФАР (среднее значение $250 \text{ Вт} / \text{м}^2$, амплитуда суточных колебаний $200 \text{ Вт} / \text{м}^2$). В начальный момент времени было задано случайное распределение объектов, принадлежащих к фитофагам и хищному зоопланктону. Были заданы минимальные значения начальных биомасс. Поля фитопланктона и химических веществ в верхнем и нижнем слоях считались однородными. Сероводород отсутствовал как в верхнем, так и в нижнем слое. Объекты класса макрофитов сосредоточены в двух компактных областях. Шаг по времени равнялся одним суткам для объектов и одной четверти суток для гидродинамического и гидрoхимического блоков модели. Это различие связано с разными временными масштабами изменчивости элементов системы.

Сравнивались варианты расчётов с постоянным и переменным ветром, с суточным ходом температуры воздуха и без его учета. Модель работала адекватно, показав, что, как и следовало ожидать, определяющим условием возникновения гипоксии является отсутствие должной вентиляции нижнего слоя. При переменном ветре и существенных колебаниях температуры воздуха граница запирающего слоя колеблется с достаточной амплитудой. Это приводит к постоянной подкачке кислорода в нижний слой, повышению его температуры и увеличению первичной продукции фитопланктона в нём. При стационарном положении слоя скачка ниже его со временем развивается гипоксия и появляется сероводород, ко-

торый быстро распространяется по всей расчётной области.

Начальные условия эксперимента: концентрации $[\text{NO}_3]$ – 1 мкг-ат/л, $[\text{NO}_2]$ – 1 мкг-ат/л, $[\text{NH}_4]$ – 0.5 мкг-ат/л, $[\text{O}_2]$ – 4 мл/л в верхнем слое и 1 мл/л в нижнем, PON – 5 мкг-ат/л, DON – 5 мкг-ат/л, $[\text{SO}_4]$ – 1.4 г/л, сероводорода и соединений серы кроме SO_4 – нулевые. Плотность биомассы фитопланктона – 200 мг/м³, средние начальные плотности биомассы объектов зоопланктона – 80 мг/м³, объектов макрофитов – 2.5 г/м³. Время счета – 75 сут.

Рис. 2 иллюстрирует динамику интегральных переменных системы для первого варианта расчётов с меняющимся ветром, что обеспечивает аэробный режим нижнего слоя.

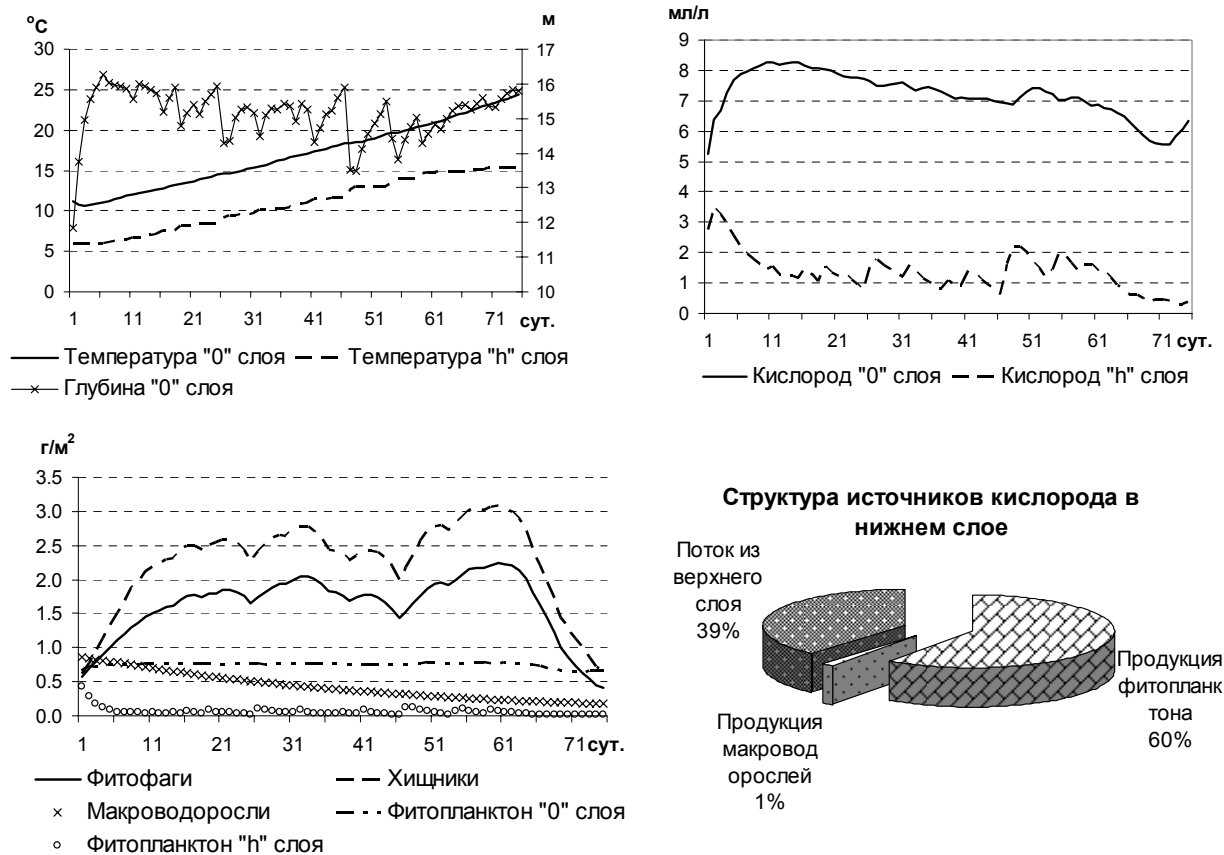


Рис. 2 Динамика интегральных переменных системы и соотношение между источниками кислорода в нижнем слое при поддержании аэробного режима в системе
 Fig. 2 Dynamics of the system's integrated variables and correlation between sources of oxygen in the lower layer at aerobic conditions

Как видно из рис. 2, при переменном ветре граница слоёв испытывает колебания, а температура как верхнего, так и нижнего слоя растёт со временем. В нижнем слое сохраняется кислородный режим (концентрация кислорода не снижается ниже 1 мл/л), хотя в целом в результате прогрева его содержание в воде со временем понижается. Интегральная биомасса зоопланктона испытывает колебания во времени. Поскольку концентрация фитопланктона – основной пищи зоопланктона – остаётся практически неизменной во времени, эти колебания вызываются, скорее всего, трофическим взаимодействием объектов зоопланктона, перемещающихся в пространстве, или же следствием угнетающего воздействия дефицита кислорода в нижнем слое.

Только в начальный период развития ситуации кислород из атмосферы поступает в верхний слой. Затем поток кислорода меняет знак – направлен из моря в атмосферу, а вели-

чина его колеблется в пределах 15 – 20 % от общего количества производимого в верхнем слое. Большая часть кислорода тратится на дыхание планктона (около 80 %), оставшаяся часть – на окисление органики. Поступление кислорода из верхнего слоя в нижний носит эпизодический характер, поскольку это связано с переходом на режим антиволечения при снижении ветровой активности. Кислород, производимый в нижнем слое, тратится в основном в ходе процессов нитрификации и аммонификации.

Проинтегрировав полученные данные по времени, можно оценить суммарные затраты кислорода на различные процессы, происходящие с его участием. Следует отметить, что 6.7 % кислорода, расходуемого верхним слоем на вентиляцию нижнего слоя, составляет 40 % всего доступного кислорода в нижнем слое (рис. 3, 4), более 90 % которого тратится на дыхание планктона.



Рис. 3 Изменение во времени затратных статей бюджета кислорода в верхнем и нижнем слоях. Затраты на аммонификацию в верхнем слое размерены на вспомогательной оси, затраты на нитрификацию составляют менее 0.1%. В нижнем слое затраты на дыхание намного превышают собственное производство кислорода, поэтому на диаграмме не показаны.

Fig. 3 Change in time of the oxygen consumption budget in upper and lower layers. Consumption of ammonium in the upper layer is measured on an auxiliary axis, consumption of nitrogen is less than 0.1%. Consumption of oxygen on breathing in the lower layer is much more than its own production (not shown).

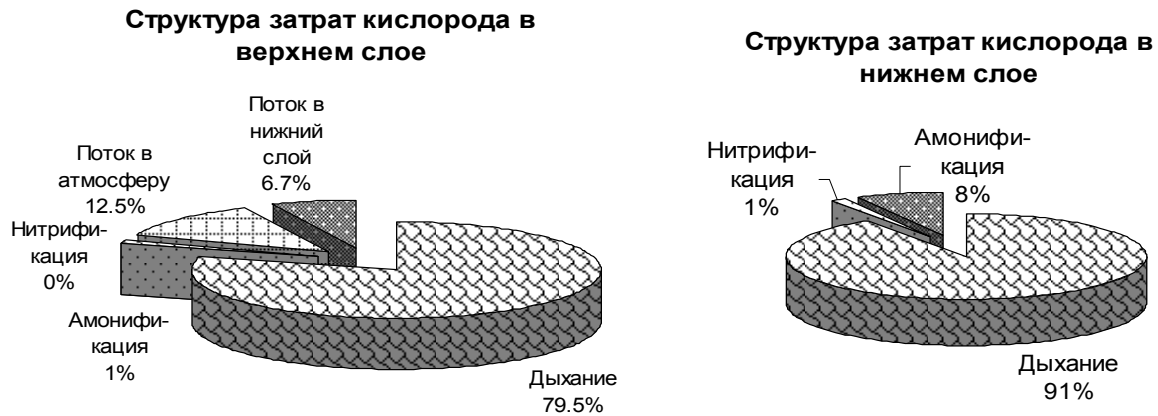


Рис. 4 Распределение суммарных затрат кислорода в верхнем и нижнем слоях в случае аэробного режима нижнего слоя. Здесь, в отличие от диаграммы на рис. 3, учтены все источники кислорода в нижнем слое
 Fig. 4 Distribution of total consumption of oxygen in upper and lower layers in the case of aerobic conditions in the lower layer. Here, unlike a diagram on fig. 3, all sources of oxygen in the lower layer are taken into account.

Рассмотрим особенности анаэробного режима нижнего слоя. Как сказано выше, он возникает в случае стагнации вод при слабом постоянном ветре или полном безветрии. По аналогии с рис. 4, покажем динамику интегральных переменных системы для этого случая. Глубина перемешанного слоя устанавливается в соответствии с интенсивностью постоянного ветрового воздействия и незначительно растёт по мере прогрева. Температура нижнего слоя не меняется, поскольку слой «заперт», т.е. отсутствуют потоки тепла и субстанций на нижней границе термоклина. Режимы вовлечения и антивовлечения не чередуются, как в предыдущих расчётах. Наблюдается исключительно режим вовлечения. Тем не менее, существует поток в нижний слой, обусловленный опусканием детрита со скоростью 2 м/сут. Концентрация кислорода в нижнем слое быстро падает, и со временем в нём развиваются восстановительные условия с возникновением сероводорода. Верхний слой, напротив, оказывается пересыщенным кислородом. Зоопланктон, по условиям задачи мигрирующий через границу термоклина и существующий в обоих слоях, быстро вымирает из-за дефицита кислорода, хотя в верхнем слое для него сохраняются приемлемые трофические условия. В структуре источников кислорода в нижнем слое

можно выделить только продукцию фитопланктона и макроводорослей.

На рис. 5 и 6 показаны диаграммы затрат кислорода относительно его источников, построенные по аналогии со случаем аэробного режима (рис. 5). После элиминации зоопланктона 98 % производимого фитопланктоном кислорода начинает уходить в атмосферу. При этом нижний запертый слой испытывает острый дефицит кислорода. В нём формируются восстановительные условия, и появляется сероводород, на окисление которого расходуется всё возрастающая доля кислорода, генерируемого остатками донной растительности. Островки макрофитов при достаточной плотности произрастания могут в течение некоторого времени сохранять вокруг себя локальный кислородный режим. Рассмотрим распределение затрат кислорода в обоих слоях в интегральном виде (рис. 7).

Более 60 % произведённого кислорода фитопланктоном верхнего слоя за 75 сут. расчётного времени уходит в атмосферу, на дыхание планктона затрачивается около 34 % (при аэробном режиме 80 %). Большая часть кислорода, синтезированного клетками водорослей в нижнем слое, расходуется на дыхание зоопланктона на первом этапе развития ситуации.

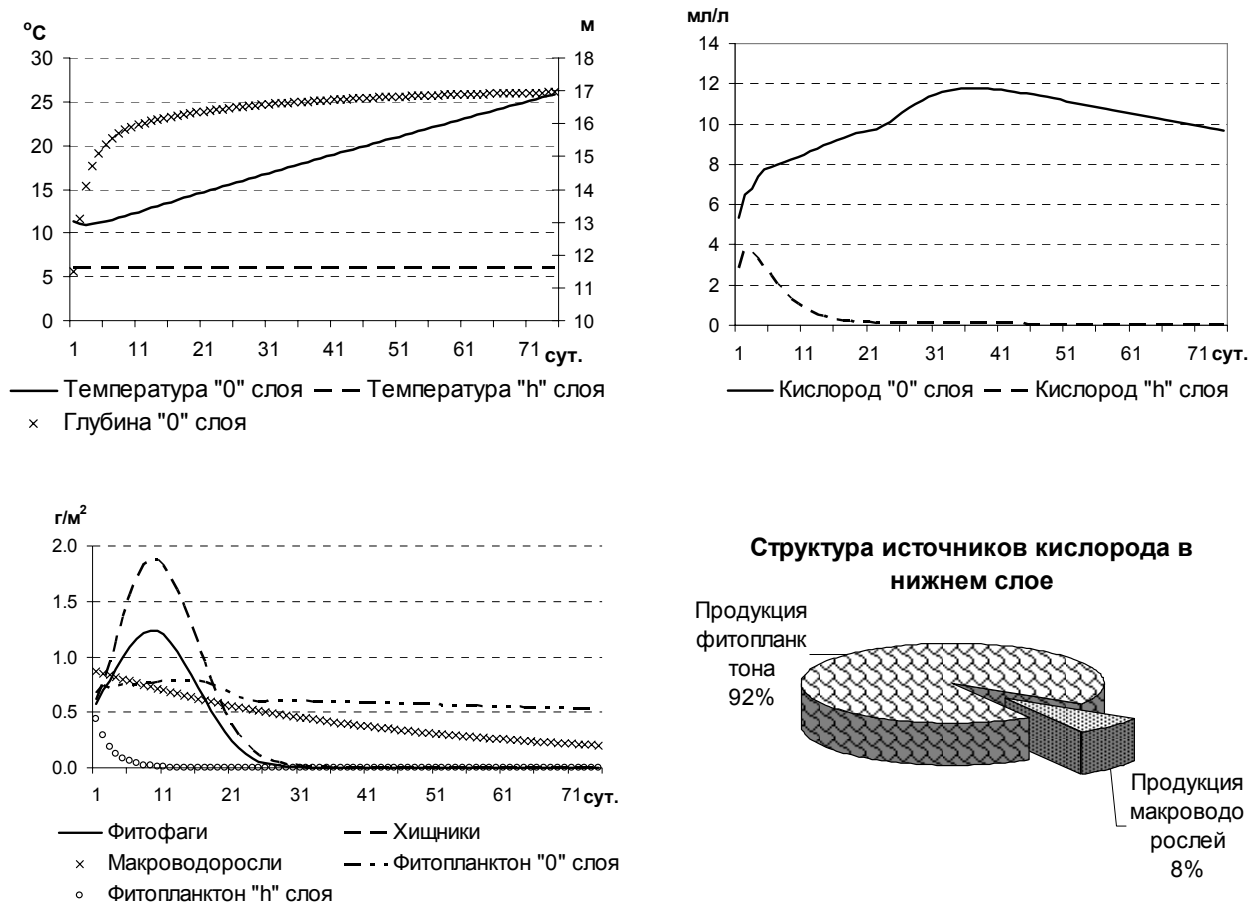


Рис. 5 Динамика интегральных переменных системы и соотношение между источниками кислорода в нижнем слое при анаэробном режиме
 Fig. 5 Dynamics of integrated variables of the system and correlation between sources of oxygen in the lower layer at anaerobic conditions

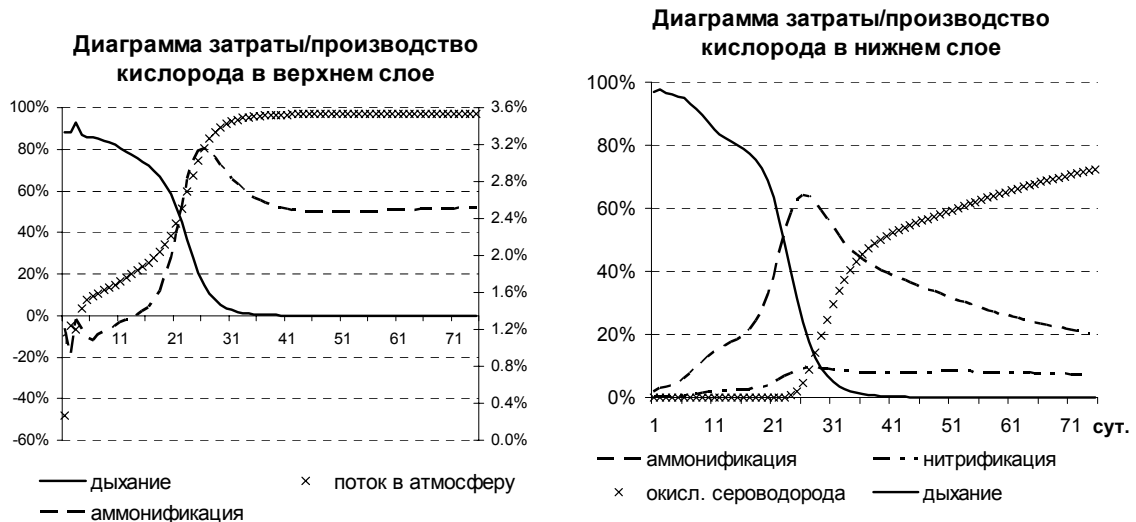


Рис. 6 Изменения во времени затратных статей бюджета кислорода в верхнем и нижнем слоях
 Fig. 6 Changes in time of the oxygen consumption budget in upper and lower layers

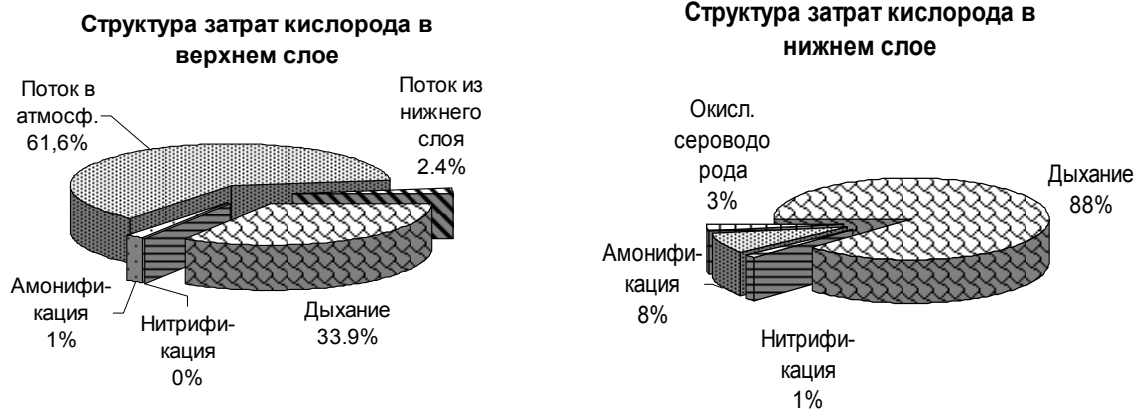


Рис. 7 Распределение суммарных затрат кислорода в верхнем и нижнем слоях для анаэробного режима нижнего слоя

Fig. 7 Distribution of total consumption of the oxygen in upper and lower layers under the anaerobic conditions in the lower layer

Проведенные расчёты показали, что различия в режимах функционирования системы, обусловленные наличием или отсутствием ветрового перешивания вод, существенным образом влияют на величину потоков кислорода, продуцируемого автотрофными элементами системы. Из сопоставления абсолютных значений потоков кислорода в этих двух численных экспериментах следует, что за расчётный период времени (75 сут.) водная экосистема отдаёт атмосфере при анаэробном режиме в три раза больше кислорода, в сравнении с аэробным.

2. Моделирование системы фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел

Для рационального использования морских ресурсов должна быть известна величина максимально допустимого объёма вылова рыбы, при котором не происходит уменьшения её промысловых запасов. Этот объём зависит от устойчивости системы фитопланктон – зоопланктон – рыба к природным и антропогенным воздействиям, а также от влияния рыбного промысла на изменчивость биомассы организмов основных трофических уровней. Под устойчивостью системы будем понимать её способность противостоять кратковременным

возмущениям и возвращаться в состояние стабильного функционирования.

В рассматриваемой динамической модели экосистемы на верхнем трофическом уровне находится хамса — главная промысловая рыба Чёрного моря. Ниже расположена агрегация зоопланктонных организмов, входящих в её пищевой рацион. Это так называемый кормовой зоопланктон, представляющий собой в основном массовые виды копепод. Поскольку копеподы являются фитофагами, на трофическом уровне продуцентов находятся те виды фитопланктона, которыми питаются копеподы: диатомовые, динофлагелляты, мелкие жгутиковые.

Через трофические уровни идут потоки веществ и энергии. При этом на каждом уровне часть веществ и энергии уходит из системы в окружающую среду (жизнедеятельность, выедание и отмирание организмов, промысловое изъятие хамсы). В модели представлен баланс энергии, измеряемой в единицах энергетического эквивалента средней по объёму обитаемого слоя морской воды удельной биомассы (кал м^{-3}) организмов каждого трофического уровня. Источником энергии, поступающей на нижний уровень, является Солнце. Часть энергии солнечной радиации ассимилируется здесь

в процессе фотосинтеза. Передача энергии на второй и третий уровни происходит по пищевой цепи и математически выражается через трофические функции (функции выедания) копепод и хамсы. У копепод интенсивность питания линейно растёт с увеличением концентрации фитопланктона. Рост прекращается при достижении концентрации насыщения. Трофическая функция хамсы имеет S-образный вид и на плато насыщения выходит асимптотически. В условиях интегральной модели концентрации насыщения не достигаются.

Известно, что устойчивость биолого-математических систем вольтерровского типа зависит от вида трофических функций. В подобных системах циклические флуктуации могут возникать даже при отсутствии внешних периодических воздействий [19]. Рассматриваемая система испытывает как кратковременные, так и периодические воздействия. Длиннопериодные воздействия обусловлены, в основном, влиянием Северо-Атлантического колебания на гидрологические и метеорологические процессы в бассейне Чёрного моря. Экзогенные факторы определяют сложную изменчивость биомассы фитопланктона, которая и непосредственно (через питание – выживание личинок хамсы на ранних стадиях развития) и через биомассу копепод влияет на биомассу хамсы. В силу репродукционных особенностей хамсы только воздействия известных периодов оказывают существенное влияние на межгодовую изменчивость её биомассы.

В основных уравнениях модели

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} = q(1 + G_p + N_p) - rZ - P^{-1}L_p - d_p, \quad (10)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{dZ}{dt} = \delta r(1 + G_z + N_z)P - sF - Z^{-1}L_z - d_z, \quad (11)$$

$$\frac{1}{F} \frac{dF}{dt} = \varepsilon s(1 + G_f + N_f)Z - w - F^{-1}L_f - d_f, \quad (12)$$

использованы следующие условные обозначения: P, Z, F — энергетические эквиваленты средних удельных биомасс фитопланктона,

копепод и хамсы; $G_p, G_z, G_f, N_p, N_z, N_f$ — внешние периодические (G) и непериодические (N) воздействия на соответствующие организмы; L_p, L_z, L_f — функции самолимитирования фитопланктона, копепод и хамсы; q — характерная скорость продуцирования фитопланктона; r, s — коэффициенты трофических функций копепод и хамсы; δ, ε — доли потребляемой копеподами и хамсой биомассы фитопланктона и копепод, которые идут на увеличение их собственной биомассы; w — коэффициент промыслового изъятия хамсы; d_p, d_z, d_f — коэффициенты естественной элиминации фитопланктона, копепод и хамсы.

Для численного решения системы (10) – (12) использован метод Рунге-Кутты четвёртого порядка с фиксированным шагом по времени. При $G_p = G_z = G_f = N_p = N_z = N_f = 0$ динамическая система (10) – (12) находится в автономном режиме. При этом соотношения, входящие в правые части уравнений модели, позволяют оценить среднемноголетние значения моделируемых объектов. Для этого необходимо знать среднемноголетние величины $\bar{P}, \bar{Z}, \bar{F}$ во время нагула и нереста хамсы. Значения биомассы фитопланктона и копепод в северо-западной части Чёрного моря в тёплое время года, вычисленные по известным натурным данным [4], составляют $\bar{P} = 200 \text{ кал} \cdot \text{м}^{-3}$, $\bar{Z} = 40 \text{ кал} \cdot \text{м}^{-3}$. Оценка биомассы хамсы выполнена по данным о сравнительной экологической эффективности пелагического сообщества Чёрного моря [4]. При этом предполагалось, что биомасса хамсы равна примерно половине суммарной биомассы рыб – планктонофагов, $\bar{F} = 5 \text{ кал} \cdot \text{м}^{-3}$. Величины $\bar{P}, \bar{Z}, \bar{F}$ являются решением автономного варианта системы (10) – (12) при $L_z = L_f = 0$, квадратичной функции самолимитирования фитопланктона $L_p = kP^2$ и следующих значениях параметров:

$$(d_p, d_z, d_f) = (3.4 \cdot 10^{-2}; 1.9 \cdot 10^{-3}; 2.0 \cdot 10^{-4}) \text{ с}^{-1};$$

$$k = 1.0 \cdot 10^{-5} \text{ кал}^{-1} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}; \quad q = 5.2 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1};$$

$$r = 4.0 \cdot 10^{-4} \text{ кал}^{-1} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}; \quad s = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ кал}^{-1} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}; \\ w = 1.0 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}; \quad \delta = 3.0 \cdot 10^{-2}; \quad \varepsilon = 7.5 \cdot 10^{-2}.$$

Отклонение начальных условий от стационарного решения приводит к возникновению затухающих колебаний, амплитуда которых пропорциональна величине возмущения, а

период близок к 160 годам. При малых возмущающих воздействиях фокус фазовой траектории располагается вблизи точки $(\bar{P}, \bar{Z}, \bar{F})$, то есть стационарное состояние системы неасимптотически устойчиво (рис. 8).

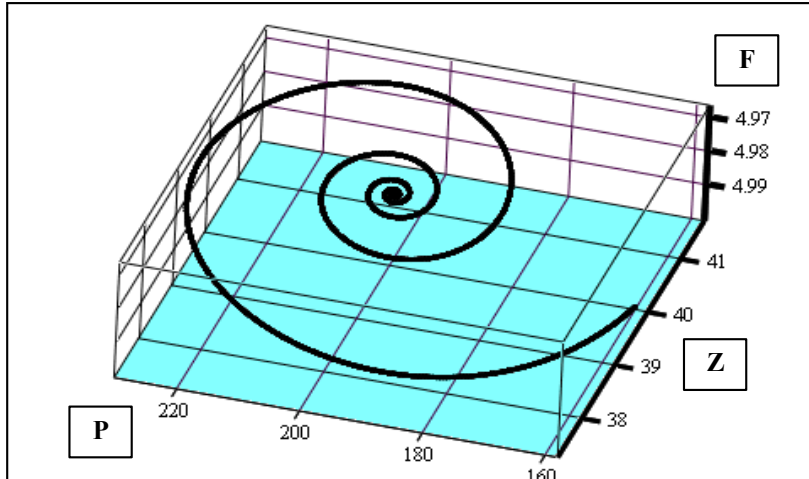


Рис. 8 Фазовая кривая автономной системы при $P_0=160 \text{ кал м}^{-3}$, $Z_0=\bar{Z}$, $F=\bar{F}$
 Fig. 8 Phase curve of the autonomous system at $P_0=160 \text{ cal м}^{-3}$, $Z_0=\bar{Z}$, $F=\bar{F}$

На урожайность хамсы наибольшее влияние оказывает концентрация фитопланктона в летние месяцы. Межгодовая цикличность биомассы хамсы формируется под воздействием изменчивости следующих характеристик: урожайность, возрастная структура нерестового стада, условия зимовки, биомассы кормового зоопланктона (копепод).

Эти характеристики взаимосвязаны и зависят от САК, которое вызывает колебания гидрометеорологических процессов в бассейне Чёрного моря с периодом 3 – 6 лет. По средне-многолетним данным, основная репродуктивная роль в нерестовом стаде принадлежит двухлеткам хамсы, и в изменчивости биомассы хамсы преобладает четырёхлетняя гармоника.

Используя правдоподобное предположение о том, что амплитуда этой гармоник пропорциональна отклонению биомассы фитопланктона от её значения в стационарной точке, можно задать функцию G_f в виде:

$$G_f = a \frac{P - \bar{P}}{\bar{P}} \cos \omega_f t, \quad (13)$$

где w_f соответствует четырёхлетнему периоду: $w_f = 2\pi * 2,894 * 10^{-6} \text{ с}^{-1}$; $a = 1,00 * 10^{-3}$.

Если теперь вывести систему из стационарного состояния путём задания существенно неравновесных начальных условий (например, $P_0=160 \text{ кал м}^{-3}$), форма фазовой траектории значительно усложняется (рис. 9). На сворачивающуюся к новому фокусу спираль накладывается последовательность волновых пакетов, состоящих из двадцати волн одинакового периода (четыре года), но переменной амплитуды.

Независимо от знака начального возмущения биомассы фитопланктона, ось колебаний биомассы хамсы в каждом волновом пакете приподнята над линией $F = \bar{F}$, то есть средняя биомасса больше \bar{F} и колеблется с периодом 80 лет. Интересно, что палеорекострукция длиннопериодных изменений биомассы сардин и анчоуса вблизи Калифорнии выявила цикличность в 50 – 70 лет [28].

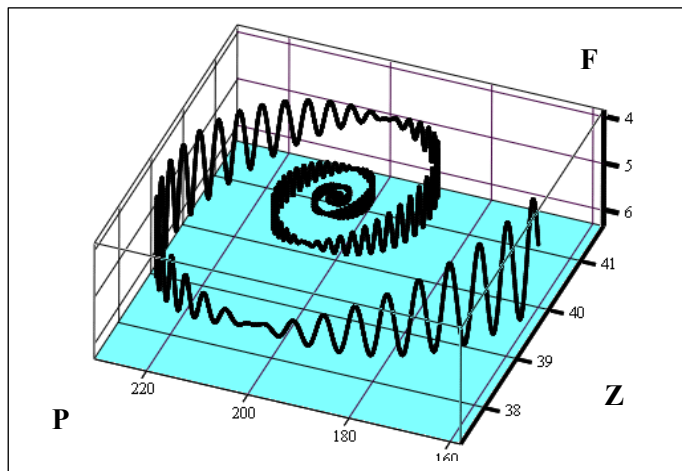


Рис. 9 Фазовая кривая при $P_0=160 \text{ cal m}^{-3}$, $Z_0=\bar{Z}$, $F=\bar{F}$ и учёте зависимости (13)
 Fig. 9 The phase curve at $P_0=160 \text{ cal m}^{-3}$, $Z_0=\bar{Z}$, $F=\bar{F}$ with account of dependence (13)

Непериодические воздействия вводились в модель с помощью функций вида

$$N = \sum_1^n \frac{U_-(t_n)\zeta_n}{\alpha_n(t-t_n)^2 + \beta_n(t-t_n) + \gamma_n}, \quad (14)$$

что позволяет выбором коэффициентов α , β , γ и ζ регулировать продолжительность и интенсивность каждого импульса. Через $U_-(t_n)$ обозначена правосторонняя функция Хевисайда, t_n – время наступления импульса.

В моменты времени $t = t_n$ возмущения нарушают регулярность изменения амплитуды колебаний в волновых пакетах и, в зависимости от своего знака, удаляют конкретную фазовую траекторию от нового фокуса или при-

ближают её к нему. Серии импульсных воздействий очень сильно усложняют фазовый портрет системы. Учёт даже сравнительно небольшого количества непериодических возмущений различной интенсивности и знака для трёх компонентов системы крайне затрудняет интерпретацию результатов вычислительных экспериментов.

Основные особенности поведения системы хорошо видны при варьировании граничных условий модели, а также характеристик двух непериодических воздействий на биомассу фитопланктона и одного – на биомассу хамсы (рис. 10).

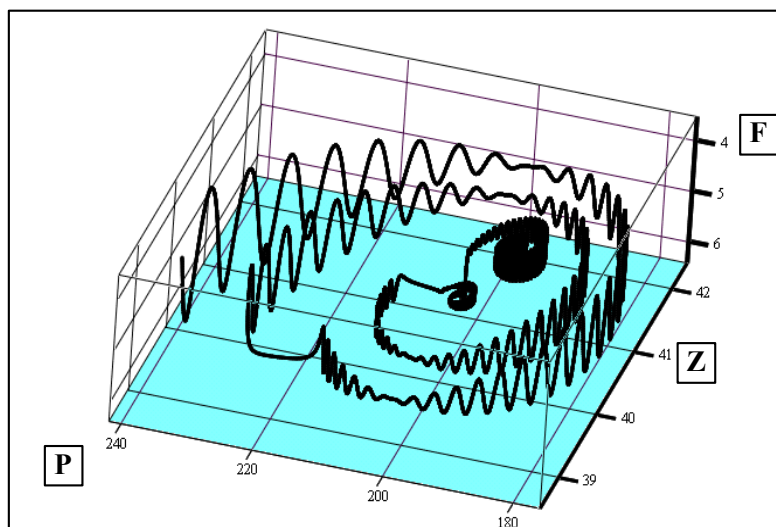


Рис. 10 Фазовая кривая при $P_0 = 240 \text{ cal m}^{-3}$, $Z_0 = \bar{Z}$, $F = \bar{F}$, учёте зависимости (13) и возмущений (14)
 Fig. 10 The phase curve at $P_0=240 \text{ cal m}^{-3}$, $Z_0=\bar{Z}$, $F=\bar{F}$, with account of dependence (13) and disturbance (14)

В данном примере система сначала была выведена из стационарного состояния заданием начального условия $P_0 = 240 \text{ кал м}^3$, а затем последовательно происходили два разнонаправленных возмущения биомассы фитопланктона и уменьшение биомассы хамсы вблизи промежуточного фокуса. В море подобное воздействие на хамсу оказывают неблагоприятные условия зимовки.

Под влиянием серии несбалансированных возмущений фазовая траектория может уходить за пределы правдоподобного фазового объёма. Выбор соответствующих функций самолимитирования на каждом трофическом уровне повышает устойчивость математической модели. Ввиду недостатка натуральных данных вопрос об адекватности некоторых функций и параметров реальным экологическим процессам остаётся открытым.

Формальная возможность рассматривать рыбный промысел в качестве верхнего трофического уровня системы «зоопланктон – рыба – рыбный промысел» позволяет сформулировать задачу нахождения реакции этой расширенной системы на изменения объёмов вылова хамсы. Основные уравнения модели имеют следующий вид:

$$\frac{dP}{dt} = q[1 + G_p + N_p]P - R(P)Z - d_p P - L_p, \quad (15)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \delta R(P)[1 + G_z + N_z]Z - S(Z)F - d_z Z - L_z, \quad (16)$$

$$\frac{dF}{dt} = \varepsilon S(Z)[1 + G_f + N_f]F - T(F)E - d_f F - L_f, \quad (17)$$

$$\frac{dE}{dt} = \zeta T(F)[1 + N_e]E - O(E). \quad (18)$$

В уравнениях (15) – (18) соответственно каждому трофическому уровню использованы следующие обозначения: P , Z , F , E – энергетические эквиваленты средней по объёму обитаемого слоя воды удельной биомассы фитопланктона, кормового зоопланктона, хамсы и её вылова; $R(P)$, $S(Z)$, $T(F)$ – трофические функции для зоопланктона, хамсы и аналог

такой функции для промысла хамсы: G и N – суммы периодических и серии кратковременных воздействий на объекты каждого уровня; L – функции самолимитирования; $O(E)$ – непродуцированные расходы рыбного промысла, выраженные в эквивалентной части биомассы выловленной хамсы; $\delta, \varepsilon, \zeta$ – доли энергии, поступающей в биомассу следующего трофического уровня; d – коэффициенты естественной элиминации.

Способы введения возмущений в эколого-математические модели являются проблемными вопросами. Серия из n кратковременных изменений вылова хамсы была учтена в модели, уже испытанной на других трофических уровнях формулой (14).

Основное стационарное состояние четырёхуровневой системы также является решением автономного варианта задачи. При нахождении параметров этого состояния, сохранены приведенные выше значения \bar{P} и \bar{Z} . Учёт поступления энергии на уровень промысла аппроксимирован линейной псевдотрофической функцией, непродуцированные расходы промысла – квадратичной зависимостью от его объёма. Применение феноменологического подхода позволило установить реалистичные значения $\bar{F} = 2,0 \text{ кал} \cdot \text{м}^{-3}$ $\bar{E} = 0,53 \text{ кал} \cdot \text{м}^{-3}$.

Основные особенности поведения системы хорошо видны при варьировании граничными условиями и характеристиками двух непериодических воздействий на биомассу фитопланктона, одного – непосредственно на биомассу хамсы и двух – на вылов хамсы. Из периодических воздействий по формуле (13) учтено влияние на урожайность хамсы отклонений биомассы фитопланктона от её равновесного значения.

На первой стадии вычислительных экспериментов была проверена реакция четырёхуровневой системы на ту же последовательность возмущений, которой была ранее подвергнута трёхуровневая система. Теперь

координаты стационарной точки в четырёхмерном фазовом пространстве имели следующие значения: $\bar{P}=200 \text{ кал}\cdot\text{м}^{-3}$, $\bar{Z}=40 \text{ кал}\cdot\text{м}^{-3}$, $\bar{F}=2 \text{ кал}\cdot\text{м}^{-3}$, $\bar{E}=0,53 \text{ кал}\cdot\text{м}^{-3}$, а начальное возмущение задавалось неравновесным значением $P_0=190 \text{ кал}\cdot\text{м}^{-3}$. Когда после двух разнонаправленных возмущений биомассы фитопланктона и одного отрицательного возмущения биомассы хамсы (прямое влияние неблагоприятных условий зимовки), фазовая траектория приблизилась к фокусу, в систему введено двукратное увеличение вылова хамсы. Современные методы лова позволяют осуществлять такие воздействия на экосистему. С качественной стороны последующая динамика природных компонентов системы понятна: биомасса хамсы

уменьшается, биомасса кормового зоопланктона растёт, что приводит к соответствующему уменьшению биомассы фитопланктона.

В этих условиях действие обратной связи привело к резкому падению промыслового изъятия хамсы. Когда выловы опустились несколько ниже значения \bar{E} , в систему было введено новое возмущение: выловы сокращены примерно в три раза (тоже реальная ситуация). О реакции системы можно судить по приведенным рисункам, на которых показаны эволюция всех компонентов (рис. 11) и проекции фазовой траектории в четырёхмерном пространстве на два трёхмерных подпространства (рис. 12).

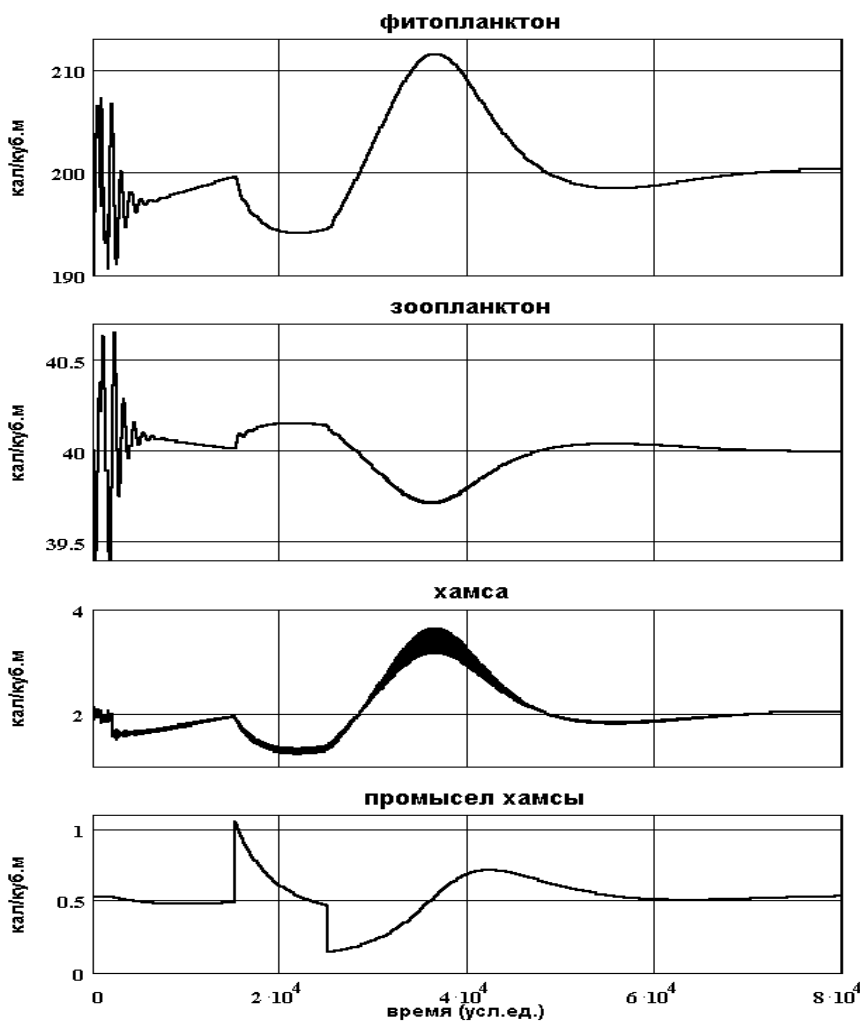


Рис. 11 Влияние изменений вылова хамсы на состояние системы
Fig. 11 Influence of the anchovy catches changes on the system state

Когда система (15) – (18) в её автономном варианте выведена из состояния равновесия заданием начального условия $P_0 \neq \bar{P}$, возникают затухающие колебания с периодом 160 лет, а фазовая траектория устремляется к новому фокусу. Амплитуда колебаний и удаление фокуса от основной стационарной точки пропорциональны $|\bar{P} - P_0|$. Если теперь учесть четырёхлетний репродукцион-

ный цикл хамсы через её урожайность, форма фазовой траектории значительно усложняется: на спираль накладывается последовательность волновых пакетов. Импульсные воздействия, нарушая регулярность волновых пакетов и смещая фокус, ещё больше усложняют фазовую траекторию. Сравнительно медленное изменение среднегодовых натуральных значе-

ний P , Z , и F свидетельствует о том, что естественные импульсы в значительной мере уравновешивают друг друга. Следовательно, имеется принципиальная возможность использовать динамико-стохастический подход к решению задачи об эволюции рассматриваемой системы.

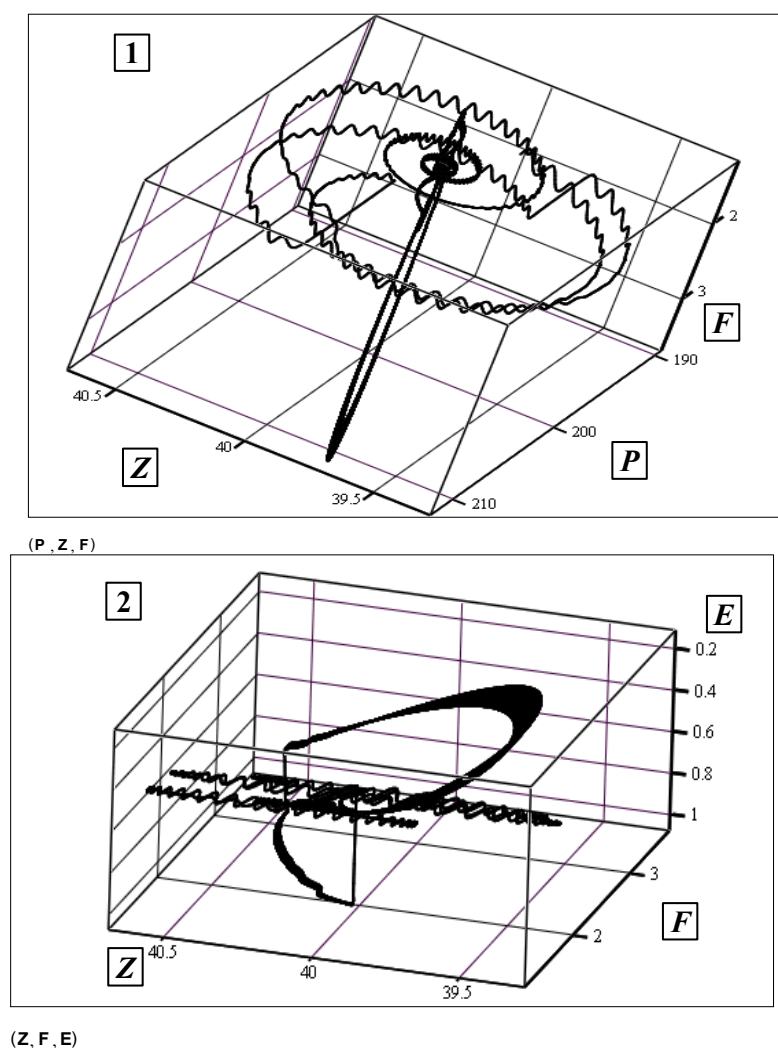


Рис. 12 Проекция фазовой траектории: 1 — на пространство (P, Z, F) , 2 — на пространство (Z, F, E) .
Fig. 12 Projections of the phase trajectory: 1 — on space (P, Z, F) , 2 — on space (Z, F, E) .

Вычислительные эксперименты показали высокую чувствительность системы к изменениям объёмов вылова хамсы. Значительные кратковременные увеличения или уменьшения вылова сильно влияют на биомассу объектов всех трофических уровней и надолго выводят систему из состояния равновесия. Время стационарирования вылова хамсы после таких изменений на порядок больше соответствующего времени после иных воздействий на систему. На практике это означает, что, при продолжении промысла по прежним технико-экономическим правилам, последствия перелома могут сказываться в течение десятилетий.

3. Динамико-стохастическая модель интегрированных процессов в экосистеме северо-западного шельфа Чёрного моря.

Любая модель экосистемы, как правило, даёт приближенное сглаженное представление об изменчивости протекающих в ней

процессов. Приблизить модельные сценарии процессов к реальности позволяет ассимиляция данных наблюдений в модели экосистемы, поскольку наблюдения содержат в себе информацию об отклонениях истинных процессов от их модельных прогнозов. Одним из наиболее распространённых в океанологии

методов ассимиляции наблюдений является оптимальная интерполяция отклонений из тех точек, где они известны (т.е. из точек наблюдений), в остальные расчётные точки [11]. Подобные модели с ассимиляцией данных принято называть динамико-стохастическими моделями (ДСМ) [30].

Построение ДСМ морской экосистемы рассмотрим на примере экосистемы северо-западного шельфа Чёрного моря. Эта модель основана на следующих допущениях. Планктонное сообщество представлено общим фитопланктоном, холодолюбивыми и теплолюбивыми видами зоопланктона, личинками хамсы и хамсой. Экосистема находится под влиянием годового хода приводного ветра – W , температуры морской воды – $T^{\circ}C$ и речного стока – RF , влияющего на солёность морской воды.

Кроме того, в модели должен быть учтён вынос с речным стоком биогенов – B и детрита – D .

Введём в рассмотрение концентрации следующих субстанций, характеризующих динамику морской экосистемы: общего фитопланктона – PP , холодолюбивого зоопланктона – ZPC , теплолюбивого зоопланктона – ZPH , личинок хамсы – LF , хамсы – F . В соответствии с причинно-следственными связями между рассматриваемыми процессами биомасса хамсы определяется холодолюбивым и теплолюбивым видами фитопланктона, а также личинками рыб и наличием биогенных веществ. Более подробный анализ взаимных влияний позволяет предложить концептуальную модель экосистемы, изображённую на рис. 13.

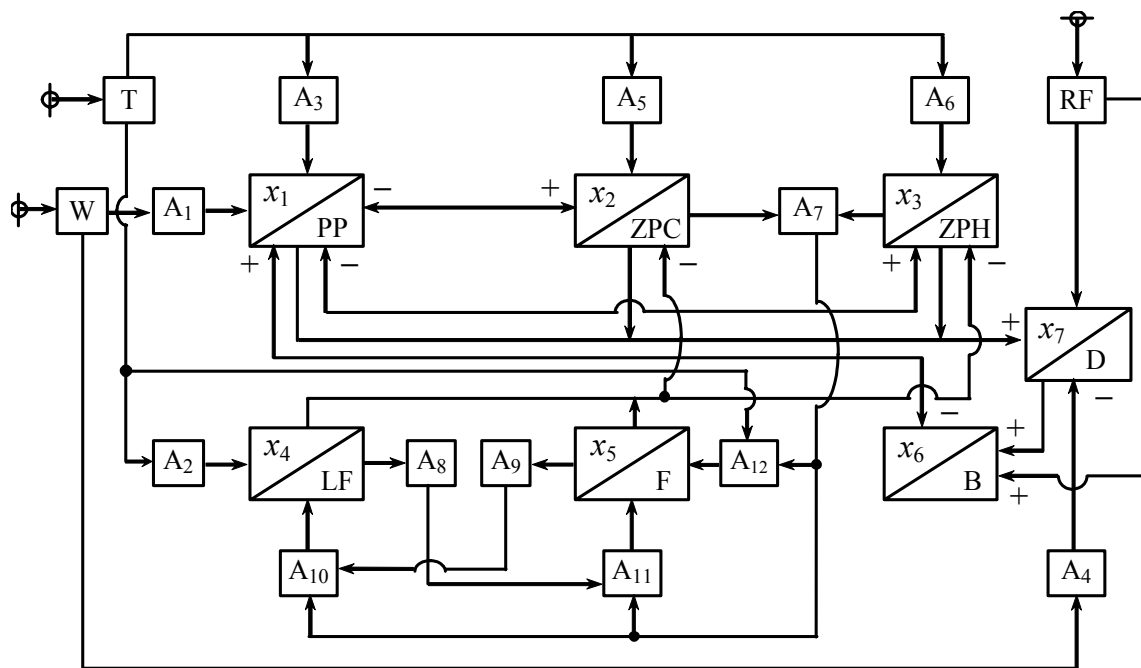


Рис. 13 Концептуальная модель морской экосистемы северо-западного шельфа Черного моря
 Fig. 13 Conceptual model of marine ecosystem of the North-West shelf of the Black Sea

Факторы внешнего воздействия на морскую среду включены в модель при помощи ряда операторов A_i , ($i = 1, 2, \dots, 12$). В частности, с учётом состава пищи хамсы, положительная связь между численностью её положе-

ний, количеством корма и температурой воды в период нереста введена при помощи операторов A_{10} , A_{11} , A_{12} . Оператор A_1 представляет известный из наблюдений годовой ход концентрации фитопланктона, обусловленный

действием приводного ветра в зимний период начала года (январь – февраль). Если в этот период ветер имеет скорость, превышающую 10 м/с в течение более 26 сут., то годовой ход концентрации фитопланктона имеет один максимум, приходящийся на август (225-е сутки года). В противном случае кривая годовой изменчивости фитопланктона имеет два максимума: в апреле (165-е сутки года) и в июле (205-е сутки года) [18].

Для того чтобы учесть условия существования личинок, было установлено лимитирование их концентрации в зависимости от количества кормов и от количества рыб, производящих икру. Было принято, что в каждый момент времени концентрация личинок определяется тем из этих двух влияющих факторов, который имеет наименьшую величину. С этой целью оператор A_{10} сравнивал между собой оба фактора и оставлял влияние того из них, который в данный момент времени принимал наименьшее значение. Кроме того, оператор A_9 учитывал конечное время, необходимое для развития рыб из личинок. Подобная зависимость введена и для лимитирования количества рыб.

Концептуальная модель может быть формализована с использованием метода АВС [21]. Следуя этому методу, изменчивость всех моделируемых процессов представим в безразмерной форме, приведённой к единой шкале 0 – 10 безразмерных единиц. Будем использовать для них обозначения x_i ($i = 1, 2, \dots, 7$) (рис. 13). Применяя стандартное уравнение метода АВС [21] и используя схему причинно-следственных связей, показанную на рис. 13, получим следующую систему динамических уравнений модели

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_1 [1 - c_1 (x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 - a_{16}x_6 - A_1(W) - A_3(T))] \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_2 [1 - c_2 (x_2 - a_{21}x_1 + a_{24}x_4 + a_{25}x_5 - A_5(T))] \\ \frac{dx_3}{dt} &= x_3 [1 - c_3 (x_3 - a_{31}x_1 + a_{34}x_4 - a_{16}x_6 - A_6(T))] \end{aligned}$$

$$\frac{dx_4}{dt} = x_4 [1 - c_4 (x_4 - A_{10} \{A_7(x_2, x_3); A_9(x_5)\} - A_2(T))] \quad (19)$$

$$\frac{dx_5}{dt} = x_5 [1 - c_5 (x_5 + A_{11} \{A_7(x_2, x_3); A_9(x_5)\})],$$

$$\frac{dx_6}{dt} = x_6 [1 - c_6 (x_6 + a_{61}x_1 - a_{67}x_7 - a_{6rf}RF)],$$

$$\frac{dx_7}{dt} = x_7 [1 - c_7 (x_7 - a_{71}x_1 - a_{72}x_2 - a_{73}x_3 - a_{7rf}RF - A_4(W))]$$

Оператор $A_1(W)$, учитывающий влияние ветра, имеет следующий вид

$$A_1(W) = \text{IF}(H < 26; J; K);$$

$$K = \text{EXP}(-\alpha_k (t - 225)^2), J = \text{EXP}(-\alpha_{j1} (t - 205)^2) + 0,7 * \text{EXP}(-\alpha_{j2} (t - 165)^2) \quad (20)$$

Кроме ветра, концентрация фитопланктона подвержена влиянию температуры морской воды. Наилучшие условия для развития фитопланктона существуют при температуре 16°C. Поэтому зависимость планктона от температуры может быть выражена оператором $A_3(T)$:

$$A_3(T) = \text{EXP}(-\alpha_{T3} (T - 16)^2). \quad (21)$$

Подобным же образом была моделирована зависимость от температуры для концентрации холодолюбивого зоопланктона x_2 с помощью оператора A_5 , для теплолюбивого зоопланктона x_3 с помощью оператора A_6 и для личинок рыб – с помощью оператора A_2

$$A_5(T) = \text{EXP}(-\alpha_{T5} (T - 12)^2), \quad (22)$$

$$A_6(T) = \text{EXP}(-\alpha_{T5} (T - 23)^2). \quad (23)$$

$$A_2(T) = \text{EXP}(-\alpha_{T2} (T - 21)^2). \quad (24)$$

Для учёта условий лимитирования концентрации личинок рыб в зависимости от количества корма и от количества рыб, производящих икру, оператор A_{10} был представлен в следующем виде:

$$A_{10} = \text{MIN}\{A_7; A_9(x_5)\}.$$

$$A_7(T) = x_2 + x_3, \quad (25)$$

$A_9 = \text{IF}[x_5(t + \tau) - x_5(t) < 0; A_8(x_5(t)); (2 x_5(t + \tau) - x_5(t) (1 - \text{EXP}(-\alpha_{x_5} t)))]$,

В последнем уравнении параметр τ имеет смысл времени, которое необходимо для определения тенденции роста (падения) концентрации личинок рыб. Аналогичным образом было выполнено моделирование условий существования рыб

$$A_{11} = \text{MIN}\{A_7; A_8(x_5)\},$$

$$A_7(T) = x_2 + x_3, \quad (26)$$

$A_8 = \text{IF}[x_4(t + \tau) - x_4(t) < 0; A_8(x_4(t)); (2 x_4(t + \tau) - x_4(t) (1 - \text{EXP}(-\alpha_{x_4} t)))]$,

Влияние приводного ветра на концентрацию детрита моделировалось с помощью оператора $A_4(W)$:

$$A_4(W) = \text{EXP}(-\alpha_{w4} W(t)), \quad (27)$$

Для проведения расчётов по модели необходимо определить коэффициенты влияний, входящие в правые части уравнений (19). При наличии архивных данных о моделируемых процессах, в методе АВС возможна объективная оценка величин этих коэффициентов путём статистического анализа архивных данных [20, 21]. Вероятностный метод оценки коэффициентов предполагает использование матрицы коэффициентов взаимной корреляции между моделируемыми процессами. В этом случае процедура идентификации коэффициентов в уравнениях АВС модели формально совпадает с нахождением коэффициентов оптимальной интерполяции случайных функций [11].

Введём в рассмотрение процессы x'_i , представляющие отклонения внутригодовой изменчивости процессов x_i от их средних многолетних значений x^*_i

$$x_i = x^*_i + x'_i.$$

Обозначим $\{R_{ij}\}$ матрицу коэффициентов взаимной корреляции процессов x'_i , а $\{K_{ij}\}$ – матрицу коэффициентов взаимной корреляции

процессов x'_i и соответствующих внешних влияний f'_i , приложенных к экосистеме

$$\{R_{ij}\} = M\{x'_i x'_j\}; \{K_{ij}\} = M\{x'_i f'_j\}$$

Будем рассматривать текущие значения коэффициентов взаимной корреляции, полученные путём осреднения по таким временным интервалам, где их изменчивость существенно меньше изменчивости отклонений x'_i и f'_i . Тогда АВС метод моделирования позволяет построить эволюционные уравнения для определения коэффициентов влияния a_{ij} через текущие значения коэффициентов взаимной корреляции.

Если представить уравнения АВС модели экосистемы (19) для отклонений от среднего многолетнего хода в общей форме

$$\frac{dx'_i}{dt} = x'_i [1 - 2(x'_i - a_{i1}x'_1 - a_{i2}x'_2 - \dots - a_{in}x'_n - a_{ij}f'_j)] \quad (28)$$

можно показать, что АВС модель коэффициентов влияний должна иметь следующий вид [6, 9, 10]:

$$\frac{da_{ij}}{dt} = a_{ij} [1 - 2(a_{ij} - R_{ij} + \sum_{k=1}^n a_{ik} R_{ik} + a_{ij} K_{ij})];$$

$(i, j, k = 1, 2, \dots, n), (i \neq j \neq k) \quad (29)$

При динамико-стохастическом подходе к моделированию природных процессов для корректировки ошибок прогнозов используются непосредственные наблюдения процессов, выполняемые в дискретные моменты времени. Процедура корректировки представляет собой оптимальную интерполяцию (или экстраполяцию) отклонений прогностических оценок процессов от соответствующих измерений. Интерполяция производится от тех моментов времени, когда выполнены измерения, в произвольные моменты времени. Таким путём может быть уточнён модельный прогноз сценария данного процесса в экосистеме.

Введём отклонения (невязки) прогнозов от измерений $z'_i{}^m - x'_i{}^m$, понимая под символом

$z'_i{}^m$ измерение процесса x'_i в момент времени t_m . Обозначим P^{kl}_i коэффициенты корреляции невязок прогнозов для двух моментов времени t_k и t_l и используем следующие обозначения:

$$P^{kl}_i = E\{[z'_i{}^k - x'_i{}^k][z'_i{}^l - x'_i{}^l]\}, \quad x'_i{}^k = x'_i(t_k), \\ z'_i{}^l = z'_i(t_l), \quad t_l < t_k. \quad (30)$$

Наилучшая (в среднеквадратичном смысле) оценка процесса $\hat{x}'_i{}^k$ представляет собой сумму модельного прогноза и взвешенных невязок прогноза по отношению к измерениям

$$\hat{x}'_i{}^k = x'_i{}^k + \sum_{m=1}^{c_i} g^{km}_i (z'_i{}^m - x'_i{}^m). \quad (31)$$

Весовые коэффициенты невязок прогнозов находятся из системы уравнений Колмогорова [11]

$$P^{kl}_i = \sum_{m=1}^{c_i} g^{kl}_i P^{lm}_i, \quad (32)$$

где c_i - количества измерений, используемых при корректировке модельного сценария $x'_i{}^k$.

Индексы m у переменных, стоящих в скобках в уравнении (30), обозначают принад-

лежность измерений и прогнозов, образующих невязки, к предыдущим моментам времени t_m . Формально уравнение обеспечивает непрерывное усвоение дискретных измерений, так как весовая функция ассимиляции $g(t)$ позволяет восстанавливать оценки невязок в интервалах между измерениями. Таким образом, уравнения (28) – (32) представляют собой замкнутый алгоритм динамико-стохастической АВС модели системы взаимосвязанных процессов.

Для проведения вычислений ДСМ экосистемы была представлена в конечно-разностном виде. Расчёты по модели (19) проводились на 365 шагов безразмерного времени. В ходе экспериментов с моделью были имитированы сценарии средних многолетних процессов, рассчитываемых по модели при средних многолетних внешних влияниях (рис. 14).

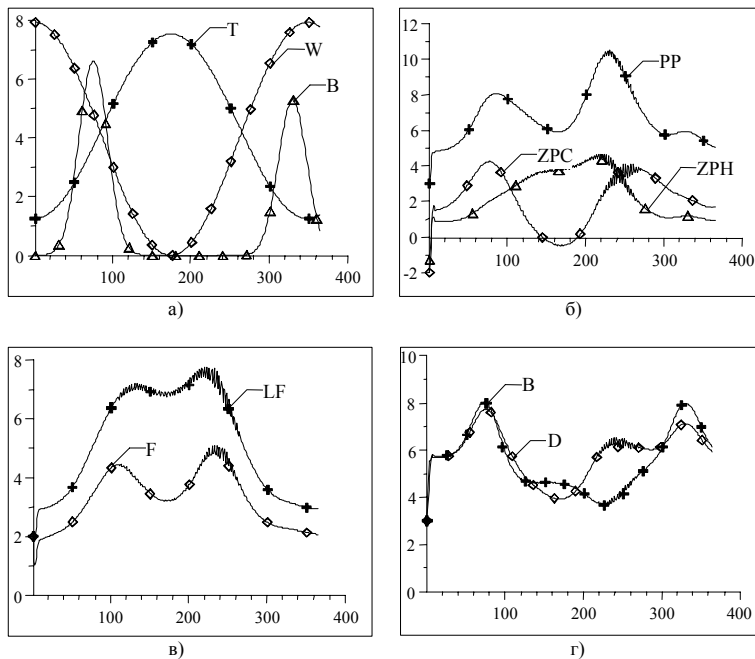


Рис. 14 Имитированные сценарии средней многолетней изменчивости процессов в морской экосистеме СЗШ ЧМ (б – г), вызываемые внешними воздействиями на экосистему (а)

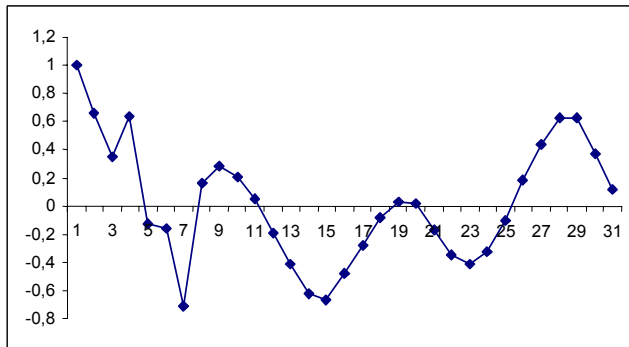
Fig. 14 Simulated inter-annual scenarios of processes in the marine ecosystem averaged over several years (b – d), caused by external influences (a)

В качестве средних многолетних внешних влияний использованы температура моря, модуль приводного ветра и речной сток. Увели-

чение речного стока было приурочено по времени к весеннему и осеннему сезонам (рис.14а). Воздействие внешних влияний про-

слеживается на графиках рассчитанных средних многолетних сценариев фитопланктона, зоопланктона, личинок рыб, рыб, биогенов и детрита (рис.14б – г)

Далее была имитирована динамика процессов в течение конкретного года, которая рассматривалась как отклонения от соответствующих средних многолетних сценариев. Бы-



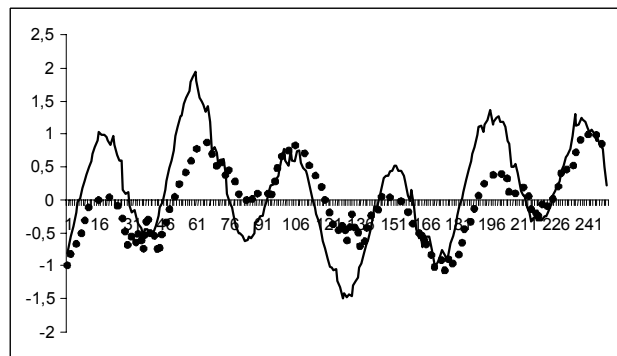
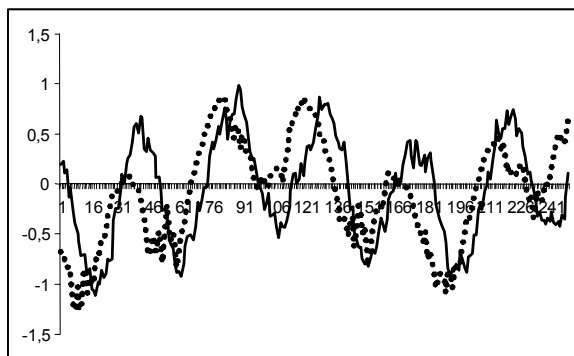
ли вычислены авто и взаимные корреляционные функции этих отклонений. На рис.15. показан пример автокорреляционной функции имитированных отклонений для концентраций фитопланктона.

Рис. 15 Автокорреляционная функция имитированных отклонений для концентраций фитопланктона. Цена деления по горизонтальной оси равна 5 шагам по времени

Fig.15 Correlation function of simulated fluctuations of the phytoplankton concentration. The scale on horizontal axis corresponds to 5 steps at times

На рис.16 а и б приведены примеры прогнозирования отклонений концентраций фитопланктона на 10 и 20 шагов вперед. Для прогнозов использованы 10 дискретных измерений отклонений, отстоявших друг от друга на 5 шагов по времени. На этих же рисунках показаны сценарии истинной изменчивости

прогнозируемых отклонений. Как и следовало ожидать, точность прогнозов убывает с увеличением их заблаговременности. При прогнозе на 10 шагов вперед среднеквадратичная ошибка прогноза составила 0.196, тогда как при прогнозе на 20 шагов – 0.339.



а

б

Рис. 16 а, б Имитированные отклонения концентраций фитопланктона от среднего многолетнего хода (сплошная кривая) и результаты их прогнозирования методом оптимальной экстраполяции (пунктир): а – прогноз на 10 сут., б – прогноз на 20 сут.

Fig. 16 a, b Simulated declinations from its averaged values of the interannual variability of phytoplankton concentration (continuous curve) and their predicted by the method of optimal extrapolation values (dotted line): а – prediction on 10 days; б – prediction on 20 days

Полученные результаты позволили проиллюстрировать процедуру ассимиляции данных в ДСМ экосистемы, представленную уравнениями (19) – (32). Сценарий годового хода концентрации фитопланктона может быть воспроизведен по данным о его средней многолетней изменчивости, а также о статистических характеристиках отклонений для конкретного года. В соответствии с уравнением (31) сценарий отклонений от среднего многолетнего хода, рассчитанный с помощью модели (19), должен быть дополнен результатами оптимальной экстраполяции данных наблюдений. Весовые коэффициенты экстраполяции $g^{k,m}$, входящие в уравнение (31), могут быть найдены из системы уравнений (32).

В частности, можно использовать результаты прогнозирования отклонений концентраций фитопланктона, полученные при прогнозе на 10 сут. вперёд, в качестве второго слагаемого в формуле ассимиляции данных

(31). Этот случай соответствует усвоению имитированных значений отклонений концентраций с запаздыванием на 10 сут., когда данные наблюдений используются в 10 последовательных моментах времени с интервалом в 5 сут. между ними. Поэтому оптимальная оценка восстанавливаемого сценария соответствует расчёту по уравнению (31) ДСМ экосистемы. В примере, иллюстрирующем этот вариант усвоения данных наблюдений, весовые коэффициенты ассимиляции данных находились с помощью корреляционных функций отклонений, рассчитанных ранее при проведении экспериментов по прогнозированию сценариев отклонений концентраций фитопланктона от среднего многолетнего хода. На рис.17 приведены результаты усвоения данных наблюдений, полученные в этом эксперименте.

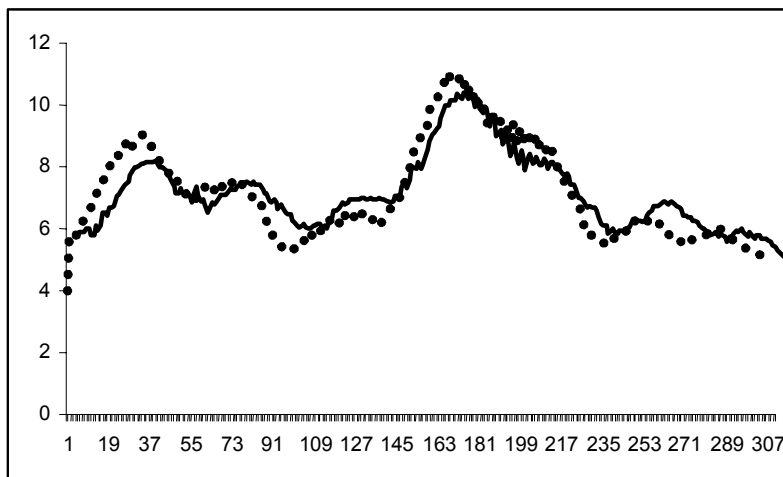


Рис. 17 Имитированный истинный годовой ход концентрации фитопланктона – сплошная кривая, пунктир – прогнозируемый на 10 сут. вперёд сценарий годового хода, полученный путем ассимиляции данных 10 измерений, выполненных в течение 50 сут.

Fig. 17 Simulated real inter-annual variability of the phytoplankton concentration - continuous curve, dotted line – predicted on 10 days ahead scenario, obtained by assimilation of 10 measurements made in 50 previous days.

Как следует из рис. 17, ассимиляция дискретных данных наблюдений позволяет воспроизвести сценарий внутригодовой изменчивости концентрации фитопланктона для конкретного года наблюдений. Качество прогноза теоретически может быть улучшено за счёт привлечения наблюдений других процессов, связанных с концентрацией фитопланкто-

на уравнениями общей модели экосистемы (19).

Заклучение. При всём различии методов построения моделей морских экосистем, все они должны удовлетворять некоторым общим требованиям. Эти требования вытекают из принципов системного анализа интегральных процессов в природной среде. Основным

из них является принцип динамического баланса экосистемы с окружающей средой. В каждый момент времени интегральные процессы в модели экосистемы должны принимать такие значения, которые обеспечивают стремление к нулю мгновенных скоростей этих процессов. Таким путём происходит непрерывная адаптация модельных сценариев процессов друг другу и к меняющимся внешним воздействиям, которая отражает динамику реальных морских экосистем. В частности, в рассмотренной выше модели экосистемы СЗШ ЧМ, построенной методом АВС, адаптация интегральных процессов к внешним воздействиям обеспечивается балансом положительных и отрицательных обратных связей, формирующих сценарии развития процессов в экосистеме.

Важную роль играет правильный выбор коэффициентов уравнений моделей экосистем. От него зависит адекватность модели реальным процессам, а также устойчивость решений уравнений модели. В морской экологии выбор значений коэффициентов обычно опирается на экспертные оценки, построенные по результатам лабораторных экспериментов. Зачастую определение величин коэффициентов ограничено условиями устойчивости решений уравнений модели. Этот путь был использован и в данной работе. Однако в моде-

лях, построенных методом АВС, мы отметили возможность статистической оценки коэффициентов по результатам корреляционного анализа наблюдений. При наличии соответствующих данных такой подход более оправдан, чем экспертные оценки коэффициентов, поскольку корреляционные связи между наблюдаемыми процессами позволяют объективно усваивать новую информацию, не зависящую ни от экспертов, ни от используемой модели экосистемы.

Задача усвоения данных в динамических моделях экосистем приобретает растущее значение в связи с общей проблемой контроля состояния окружающей среды. Приведённый пример ассимиляции данных в интегральной модели экосистемы СЗШЧМ, несмотря на упрощённый вариант модели и на имитированные данные наблюдений, отражает основные этапы построения динамико-стохастических моделей морских экосистем. Ассимиляция данных для целей экологического мониторинга отвечает одной из наиболее важных концепций системного подхода: рациональному сочетанию теоретической модели изучаемого явления и результатов натуральных экспериментов.

1. Васечкина Е. Ф. Интегральная модель деятельного слоя Чёрного моря // Морск. гидрофиз. журн. – 1985. – № 6. – С. 23 – 29.
2. Васечкина Е. Ф., Ярин В. Д. Объектно-ориентированная модель функционирования планктонного сообщества шельфа // Морск. гидрофиз. журн. – 2004. – № 6. – С. 43 – 61.
3. Виноградов М. Е. Динамические модели пелагических экосистем // Модели океанических процессов / Ред. Виноградов М.Е., Манин А.С., Сеидов Д.П. – М. Наука, 1989. – С. 252 – 259.
4. Грезе В. Н., Богуславский С. Г., Беляков Ю. М. и др. Биологическая продуктивность Чёрного моря / – Киев: Наук. думка, 1979. – 391 с.
5. Дебольская Е. И., Якушев Е. В. Моделирование формирования заморов и анаэробных условий в водных экосистемах. // Наука Кубани. – 2000. – № 4. – С. 19 – 35.
6. Еремеев В. Н., Васечкина Е. Ф., Игумнова Е. М. и др. Системное моделирование морских эколого-экономических процессов. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – 420 с.
7. Еремеев В. Н., Игумнова Е. М., Тимченко И. Е. Моделирование причинно-следственных связей в морских экосистемах. // Морск. экол. журн. – 2002. – I, № 1. – С. 16 – 32.
8. Еремеев В. Н., Игумнова Е. М., Тимченко И. Е. Прибрежная зона моря как эколого-экономическая система. // Морск. экол. журн. – 2004. – 3, № 4. – С. 5 – 33.
9. Еремеев В. Н., Игумнова Е. М., Тимченко И. Е. Моделирование эколого-экономических систем. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 320 с.
10. Игумнова Е. М., Тимченко И. Е. Имитационное моделирование условных ресурсных

- довательностей. потенциалов природной среды // Морск. гидрофиз. журн. – 2006. – № 2. – С. 24 – 42.
11. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных после // Изв. АН СССР. Серия матем. – 1941. – 5. – С. 3 – 11.
 12. Коротаев Г. К., Еремеев В. Н. Введение в оперативную океанографию Чёрного моря. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 382 с.
 13. Латун В. С. Устойчивость системы фитопланктон-зоопланктон-рыба // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Вып. 10. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – С. 211 – 218.
 14. Латун В. С. реакция системы фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел на кратковременные изменения вылова хамсы // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины. – 2004. – С. 179 – 183.
 15. Любарцева С. П., Михайлова Э. Н., Шатира Н. Б. Экологическая трехмерная численная модель Чёрного моря. Сезонная эволюция эвфтропной зоны // Морск. гидрофиз. журн. – 2000. – №5. – С. 55 – 80.
 16. Ляхин Ю. И. О скорости обмена кислородом между океаном и атмосферой // Океанология – 1978. – № 6. – С. 1014 – 1021.
 17. Математические модели в биологической океанографии. – Под ред. Т. Платта, К.Х. Манна, Р.Е. Улановича. – Париж: Изд. ЮНЕСКО, 1984. – 195 с.
 18. Маиштакова Г. П. Суточная динамика фитопланктона в Чёрном море. – Тр. Аз.-Черн. ин-та рыб. хоз-ва и океанографии. – 1968. – Вып.27. – С. 60 – 72.
 19. Свирижев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
 20. Тимченко И. Е. Системные методы в гидрофизике океана. – Киев: Наук. думка, 1988. – 225 с.
 21. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 225 с.
 22. Фёдоров В. Д., Гильманов Т. Г. Экология. – М.: Изд-во МГУ, 1980. – 464 с.
 23. Финенко З. З., Чурилова Т. Я., Сосик Х. М., Бастюрк О. Изменчивость фотосинтетических параметров фитопланктона в поверхностном слое Чёрного моря // Океанология. – 2002. – № 1. – С. 60 – 74.
 24. Якушев Е. В., Михайловский Г. Е. Моделирование химико-биологических циклов в Белом море. Расчёт сезонной изменчивости фосфора, азота и кислорода. // Океанология. – 1993. – № 5. – С. 695 – 702.
 25. Якушев Е. В., Неретин Л. Н., Волков И. И. Математическое моделирование трансформации соединений азота и восстановленной серы в аэробных, анаэробных и переходных между ними условиях на примере редокс-зоны Чёрного моря // Геохимия – 1994. – № 10. – С. 1489 – 1502.
 26. Baird M. Technical Description of the Ecological Model. – CSIRO Land and Water, Sydney. – 2001. – 35 p.
 27. Fasham M. J. R., Ducklow H. W., Mckelvie S. H. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the ocean mixed layer // J. Mar. Res. – 1990. – 48. – P. 591 – 639.
 28. Klyashtorin L. B. Climate change and long-term fluctuations of commercial catches: the possibility of forecasting // FAO Fisheries Technical Paper. No 410. Rome, FAO, 2001. – 86 p.
 29. Oguz T., Ducklow H. W., Malanotte-Rizoli P. Modeling distinct vertical biogeochemical coupling of the oxic, suboxic, and anoxic layers // Global biogeochemical cycles. – 2000. – 14, № 4. – P. 1331 – 1352
 30. Timchenko I. E. Stochastic Modeling of Ocean Dynamics // Harwood Acad. Publ. Chur-London-Paris-New-York, 1984. – 320 p.

Поступила 15 января 2007 г.

Моделювання інтегральних процесів в морських екосистемах. В. М. Єремєєв, Е. Ф. Васечкіна, О. М. Ігумнова, В. С. Латун, І. С. Тімченко, В. Д. Ярін. Розглянуті різні моделі інтегральних (просторово усереднених) процесів в морських екосистемах. Розроблена об'єктно-орієнтована модель (ОМ) планктонного угруповання пелагіалі, доповнена гідрохімічним блоком, який враховує аеробні та анаеробні цикли азоту і сірки. Гідродинаміка середовища описується інтегральною двошаровою моделлю, що враховує вплив атмосферної мінливості на розвиток інтегральних процесів. ОМ використана для оцінки явища гіпоксії на мілководді, а також динаміки виробництва і споживання кисню в різних гідрохімічних умовах. Побудована математична модель багаторівневої системи «фітопланктон-зоопланктон-риби-рибний промысел». Вивчається реакція подібних систем на періодичні і імпульсні обурення і їх еволюційна релаксація до стаціонарних станів. Запропонована динаміко-стохастична модель (ДСМ) інтегральних процесів в екосистемі північно-західного шельфу Чорного моря. Динамічна частина моделі містить сім змінних:

західного шельфу Чорного моря. Динамічна частина моделі містить сім змінних: концентрації фіто- і зоопланктону (двох видів), личинок риб і риб, нутрієнтів і детриту. З її допомогою були імітовані середні багаторічні сценарії внутрішньорічної мінливості концентрацій цих субстанцій в морі, а так само можливі відхилення від цих сценаріїв, спостережувані для конкретного року. У стохастичній частині моделі взаємна кореляція між модельованими процесами використана для знаходження коефіцієнтів рівнянь і для асиміляції імітованих даних спостережень. Робиться висновок про перспективність інтегрального опису процесів в морських екосистемах, заснованого на об'єктно-орієнтованому і динаміко-стохастичному моделюванні.

Ключові слова: об'єктно-орієнтована модель, стійкість екосистеми, асиміляція спостережень

Integrated processes modeling in marine ecosystems. V. N. Eremeev, E. F. Vasechkina, E. M. Igumnova, V. S. Latun, I. E. Timchenko, V. D. Yarin. Different models of integrated (averaged to the certain space-time scales) processes in marine ecosystems are considered. The object-oriented model (OOM) of plankton association in shelf water is developed, complemented by a hydrochemical block, which describes the cycles of nitrogen and sulphur in aerobic and anaerobic terms. Hydrodynamics of the system is described by an integral two layers model taking into account influence of atmospheric changeability on development of integrated processes. OOM is used for the imitation of development of hypoxia in the period of the spring-summer warming up on shoal, and also oxygen production and consumption in the aerobic and anaerobic zones. The mathematical model of the system "phytoplankton-zooplankton-fish-fishing" is build. The reaction of such systems on periodic and impulsive influences on their stationary states is studied. On the example of ecosystem of the Northwestern shelf of the Black sea (SWS BS) the possible consequences of commercial catch of anchovy for evolution of the ecosystem to it stationary state are shown. The dynamic-stochastic model (DSM) of integrated processes in the SWS BS ecosystem is offered. Dynamic part of the model contains seven variables: concentration of phyto- and zooplankton (two species), larvae of fishes and fishes, nutrients and detritus. With its help the long-term (averaged over many years) scenarios of the concentrations' variability in the sea were simulated, and deviations from these scenarios, observed for a concrete year. Cross correlations between the deviation processes are used for assimilation of simulated observations. Conclusion about perspective of integrated description of processes in marine ecosystems, based on the object-oriented and dynamic-stochastic modeling, is made.

Keywords: object-oriented model, ecosystem stability, assimilation of observations