

# ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ «БИОГЕНЫ – ФИТОПЛАНКТОН – ЗООПЛАНКТОН – АНЧОУС – СТАВРИДА – ШПРОТ – ПРОМЫСЕЛ СТАВРИДЫ И ШПРОТА»

*В.С. Латун*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
*E-mail:lee@alpha.mhi.iuf.net*

*Разработана эколого-экономическая модель системы «биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота». Базовый вариант модели адаптирован к экологическим условиям тёплого времени года на СЗШ Чёрного моря.*

Промысловые запасы крупных пелагических рыб Чёрного моря (пеламида, скумбрия) были исчерпаны к 1972 году. Основной промысловый рыбой стал анчоус (хамса). Хищнический перелов хамсы и ставриды в 1986–1990 гг. надолго подорвал их промысловые запасы [1, 2]. Шпрота в Чёрном море оставалось много и потому, что его физиологические особенности затрудняли развитие механизированных способов промысла. Вылов шпрота можно было значительно увеличить (рис. 1).

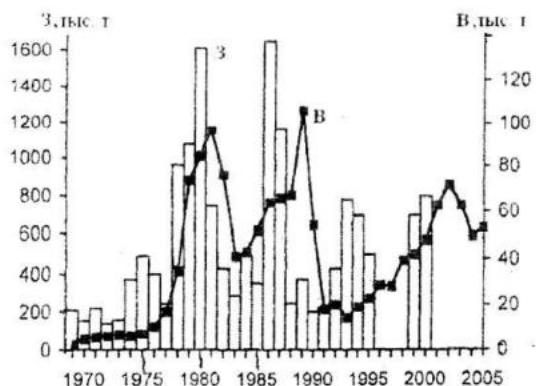


Рис. 1. Изменчивость запасов (3) и вылова шпрота (B) в 1969–2005 гг. [3]

Истощение рыбных ресурсов активизировало поиски средств эффективного лова шпрота и сегодня можно говорить не только о возможности многократного

увеличения его добычи, но и о реальной угрозе истощения промысловых запасов шпрота. В этих условиях актуальной стала задача включить промысел шпрота в эколого-математические модели. Нестационарные пространственные модели могут стать эффективным инструментом для количественного анализа последствий увеличения вылова шпрота на устойчивость экосистемы Чёрного моря. Такой инструмент нужен и для организации научно обоснованного управления промыслом.

На подготовительном этапе решения этой задачи необходимо было формализовать жизнедеятельность шпрота с учётом основных факторов влияния, в том числе и современного механизированного промысла. Такая формализация для нестационарной, пространственно двухмерной задачи, была предложена нами в 2010 г. [4]. Теперь предстоит использовать эту формализацию и прямой учёт биогенов при разработке эколого-экономической модели системы «биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота» и адаптации базового варианта этой модели к условиям тёплого времени года на СЗШ Чёрного моря. Этому посвящена данная работа.

**Содержание модели.** Предлагаемая модель служит развитием модели системы «фитопланктон – копеподы – хамса – ставрида – промысел ставриды» [5] за счёт включения в неё промысла шпрота, процессов его жизнедеятельности, а также прямого учёта влияния изменчивости концентрации биогенов на продуктивность фитопланктона. В работе [6] автором выполнен сравнительный анализ влияния различных факторов на продуктивность фитопланктона в тёплый период года на СЗШ. Показано, что основное влияние на продуктивность фитопланктона оказывает концентрация биогенов. Предложено дифференциальное уравнение для описания пространственно-временной изменчивости концентрации биогенов на шельфовых акваториях, подверженных влиянию речного стока.

Зимняя конвекция обогащает приповерхностные воды биогенами придонного слоя. Летом источниками пополнения

запаса биогенов служат локальные процессы деструкции органического вещества и, главным образом, вынос биогенов речного стока восточными ветровыми течениями из узкой прибрежной зоны на открытую акваторию СЗШ. Влияние биогенов речного стока на развитие фитопланктона является преобладающим, даже среднегодовая его биомасса зависит от годового стока рек. Учитывая масштабы дискретизации экологических процессов при численном решении математической задачи, под "концентрацией биогенов" можно понимать удельное содержание в морской воде смеси химических соединений, состав и соотношение ингредиентов которой отвечают жизненным потребностям фитопланктона. Тогда не содержание в воде отдельного соединения, а "концентрация биогенов" является комплексным императивным ресурсом для фитопланктона. Но в водах Чёрного моря содержится сравнительно много фосфатного фосфора, кремния и аммиачного азота, но гораздо меньше нитратного азота [7], который, в определённых условиях, становится конкретным императивным ресурсом для фитопланктона. Летом, в штилевую погоду, на СЗШ наблюдаются слабые течения западной четверти, нитратный же азот речного стока выносится из прибрежной полосы вод в открытую часть акватории квазипериодическими ветровыми течениями восточной четверти. Поэтому концентрация нитратного азота здесь изменяется в широких пределах и в математической модели учтена в качестве основного фактора влияния на продуктивность фитопланктона.

Пространственно-временная изменчивость солёности formalизована для имитации нерестового таксиса хамсы. Будучи консервативной характеристикой, солёность, в отличие от концентрации нитратного азота, изменяется только под влиянием адvection и турбулентной диффузии. Легко подсчитать, что, если на западной границе акватории  $S = 12\%$ , в центре –  $16,5\%$ , а на восточной границе –  $18\%$ , то доли речной воды в этих точках составляют 33%, 8% и 0% соответственно. На изменчивость концентрации нитратного азота, кроме гидродинамических процессов, влияет его потребление фитопланктоном (ос-

потребление фитопланктоном (основная расходная статья), макрофитами и небольшое пополнение за счёт процессов регенерации. Эти факторы учтены в разрабатываемой модели.

Сравнение изменчивости хорошо известной консервативной характеристики (солёность) с изменчивостью концентрации биогенов в одних и тех же гидродинамических условиях облегчает адаптацию модели к конкретным экологическим условиям.

Чтобы включить в модель шпрот и его промысел, автор вывел уравнения для энергетического эквивалента удельной биомассы шпрота, скоростей его кормового и температурного таксиса, производительности флота и скорости его перемещения на промысле [4]. Эти нелинейные уравнения с начальными и граничными условиями разных типов существенно усложнили формализацию и отладку численного решения поставленной задачи.

Предлагаемая модель имитирует следующие процессы. В начале тёплого сезона шпрот, ставрида и хамса приходят на традиционно рассматриваемую нами акваторию СЗШ:  $45^\circ$ – $46^\circ$ с.ш.,  $30^\circ$ – $32,5^\circ$ в.д. [8]. После весеннего цветения фитопланктона в этих водах остаётся определённый запас биогенов. Летом пополнение их запаса происходит здесь при развитии восточных ветровых течений, которые приносят распределившиеся прибрежные воды, обогащенные биогенами речного стока [9, 10]. Теплолюбивые ставрида и хамса приходят на модельную акваторию для нагула и нереста, холодолюбивый шпрот – для нагула. В этих условиях кормовой таксис характерен для всех рыб, нерестовый – только для хамсы, которая порционно нерестится в воде определённой солёности. С прогревом придонных вод выше температуры  $8^\circ$  С шпрот переходит на ту часть СЗШ, где холодный придонный слой сохраняется (температурный таксис шпрота, рис. 2). В холодном слое шпрот концентрируется в дневное время суток, из этого слоя его вылавливают прицельным тралением. На СЗШ наиболее результативный вылов шпрота возможен на акватории с глубинами 30 – 50 м во вторую половину тёплого сезона.

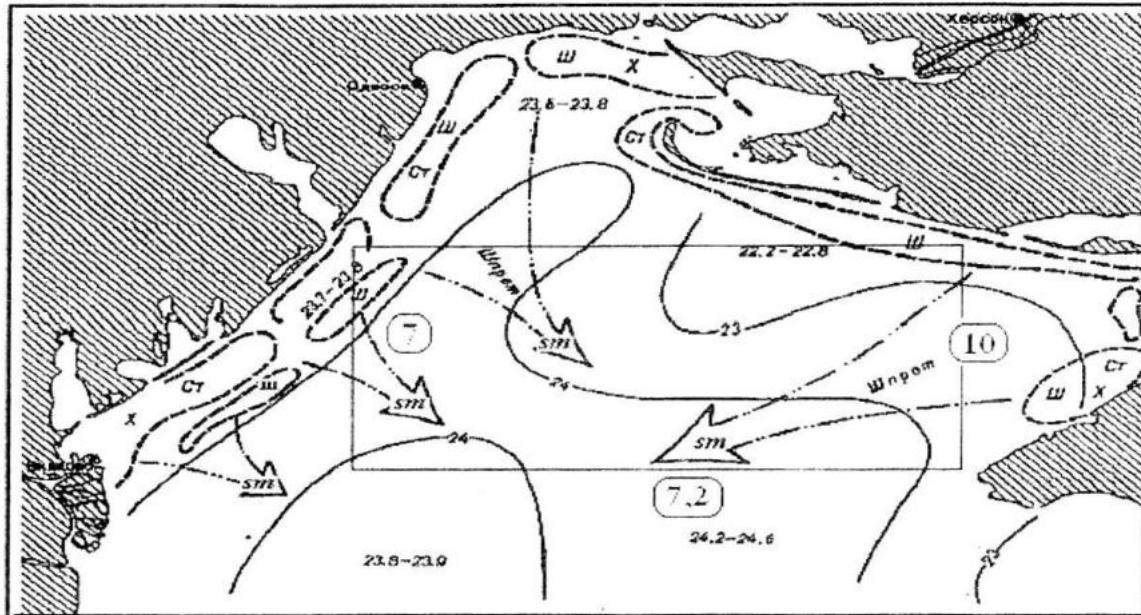


Рис. 2. Места скопления хамсы, ставриды, шпрота и миграция шпрота в третьей декаде июля. Температура воды на поверхности (изолинии, интервалы значений) и в придонном слое (крупные цифры в рамке). Пути перехода шпрота (*sm*) на акватории с комфортной для него температурной стратификацией. Прямоугольник – граница модельной акватории [4].

Промысел ставриды на СЗШ проводится в начале и в конце тёплого сезона, в холодный период года хамса и ставрида вылавливается из зимовальных скоплений в других районах моря. В работе [11] автор предложил дифференциальные уравнения для учёта механизированного промысла пелагических рыб в интегральных и пространственных эколого-экономических моделях. В уравнениях учтены основные технико-экономические характеристики промысла, а также перемещения рыбы и флота по акватории. Скорость движения рыбы – это, в общем случае, сумма нескольких векторов: суммарной скорости ветрового и фонового течений плюс скоростей различного вида таксиса (кормового, нерестового, температурного и др.).

В базовом варианте модели характерный тип изменчивости течений [8, 13] задан и используется как непосредственно, так и при вычислении адvectionного переноса биогенов, планктона, солёности – и через неё – для вычисления скорости нерестового таксиса хамсы. В численных экспериментах по имитации последствий экстремальных погодных условий, изменчивость восточных ветровых течений можно вычислять по из-

менчивости синоптической обстановки, или использовать расчёты течений на СЗШ по типовым полям скорости ветра. Задавать можно любую последовательность ветров разной интенсивности.

Для вычисления скорости температурного таксиса шпрота необходимо знать изменчивость температуры придонных вод. При отладке базового варианта модели эта изменчивость задана по известным натурным данным [12, 14]. При оперативном использовании модели, сведения об изменчивости толщины и температуры придонного слоя можно получать с заякоренных радиобуйёв или судов промразведки. С глубиной инерционность гидрологических процессов повышается, что облегчает учёт температурного таксиса.

Температурный таксис шпрота императивен: при повышении придонной температуры до определённого значения, шпрот сначала переходит на акваторию с приемлемым для него вертикальным распределением температуры, где возобновляет перемещения в места с достаточной концентрацией кормового зоопланктона.

Концептуальная схема разрабатываемой модели изображена на рис. 3.



Р и с. 3. Основные потоки вещества / энергии и факторы влияния в модели, адаптированной к экологическим условиям тёплого времени года на акватории СЗШ. ( $\Phi X$  – влияние на пополнение (recruit-stock) хамсы условий питания её личинок фитопланктоном,  $K$ ,  $H$ ,  $T$  – кормовой, нерестовый и температурный таксис соответственно.)

**Постановка и метод решения задачи.**  
Основные уравнения модели:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -u \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{q_s a_s F}{Z + \sigma_z} \frac{\partial F}{\partial x} + q_s a_s \text{sign}(S_2 - S) [1 - H(S - S_1)H(S_2 - S)] \frac{\partial S}{\partial x} + \lambda_f \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = r_z b_z \frac{G}{Z + \zeta_z} \frac{\partial Z}{\partial x} + r_f b_f \frac{G}{F + \zeta_f} \frac{\partial F}{\partial x} + \lambda_k \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{aL}{G + b} \frac{\partial G}{\partial x} H(G - G_0) + \lambda_w \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = c_q QP - c_{pq} PZ - M_p - u \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial P}{\partial x} \right), \quad (5)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \delta_{pg} c_{pg} PZ - c_{zf} ZF - c_{zk} ZGI_t - M_z - u \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial Z}{\partial x} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \delta_{zf} c_{zf} ZF - c_{fg} FGI_t - M_f - U_o \frac{\partial F}{\partial x} + \mu_f \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = (\delta_{zg} c_{zg} Z + \delta_{fg} c_{fg} F) GI_t - M_g - V_o \frac{\partial G}{\partial x} + \mu_g \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = R_{gl} L J_t - W_a \frac{\partial L}{\partial x} + \mu_l \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - k_2 L^q - k_3 |W_a - u| - \bar{D} \quad (9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = r_q \bar{D}_r - (c_{qp} P + c_{qm} \bar{M}) Q - u \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( v \frac{\partial Q}{\partial x} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\partial U_{2a}}{\partial t} = \frac{a_F F_2}{Z + r} \frac{\partial Z}{\partial x} + v \frac{\partial U_{2a}}{\partial x^2} H(T_a - T_b), \quad (11)$$

$$\frac{\partial U_{2b}}{\partial t} = (-b_v \frac{\partial T_b}{\partial x} + v \frac{\partial U_{2b}}{\partial x^2}) H(T_b - T_{st}), \quad (12)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = \left( \frac{a_2 L_2}{F_2 + b_2} \frac{\partial F_2}{\partial x} + \lambda_w \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} \right) H(F_2 - F_{20}), \quad (13)$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial t} = R_{22} L_2 - W_{2a} \frac{\partial L_2}{\partial x} + \mu_{22} \frac{\partial^2 L_2}{\partial x^2} - k_{22} L_2^q - k_{23} |W_{2a} - u| - \bar{D}_{f2} \quad (14)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} = \delta_{z2} c_{z2} ZF_2 H(T_a - T_b(x,t)) - c_{f2g} F_2 GI_t - M_{f2} - U_{2a} \frac{\partial F}{\partial x} + \mu_{f2} \frac{\partial^2 F_2}{\partial x^2}. \quad (15)$$

К основным уравнениям эколого-математической модели системы «фитопланктон – зоопланктон – хамса – ставрида – промысел ставриды» [5] добавлены уравнения для следующих переменных: концентрация биогенов, энергетический эквивалент удельной биомассы шпрота, скорости его кормового и температурного таксиса, удельной технической базы активного флота и скорости его перемещения во время промысла. Изменчивость вылова шпрота – промежуточный результат вычислительного процесса. Все уравнения модели – нестационарные и были выведены автором в двухмерном по пространству виде (горизонтальные координаты: зависимые переменные усреднены по вертикали в пределах обитаемого слоя вод). В работе [8, 13] показано, что основные особенности экологических процессов на рассматриваемой части СЗШ могут быть воспроизведены в рамках одномерной по пространству задачи, когда моделируется изменчивость характеристик, усредненных в пределах меридиональных сечений модельной акватории. Сохранение такого подхода дало возможность: 1. Проводить анализ относительного влияния впервые учитываемых факторов на функционирование системы. 2. Избежать непринципиальных, но трудоёмких вычислительных трудностей.

Все указанные на рис. 2 функциональные зависимости и факторы влияния в дифференциальной или параметрической форме учтены в модели.

Ось  $0x$  направлена на восток, её начало расположено на западной границе акватории. В уравнениях (1–15) использованы следующие условные обозначения:  $S(x,t)$  – солёность морской воды;  $u(x,t)$  – суммарная скорость ветрового и фонового течений;  $U(x,t)$ ,  $V(x,t)$ ,  $W(x,t)$  – скорости таксиса анчоуса, ставриды и относительных перемещений флота на промысле ставриды;  $U_{2p}(x,t)$ ,  $U_{2t}(x,t)$  – скорости кормового и температурного таксиса шпрота;  $T_b(x,t)$  – температура придонного слоя вод;  $W_2(x,t)$  – скорость относительных перемещений флота на промысле шпрота;  $U_a(x,t)$ ,  $U_{2a}(x,t)$ ,  $V_a(x,t)$ ,  $W_a(x,t)$ ,  $W_{2a}(x,t)$  – скорости движения хамсы, шпрота, ставриды и флота в неподвижной системе координат;

$Q(x,t)$  – концентрация биогенов,  $c_{qm} \overline{M}$  – потребление биогенов макрофитами;  $P(x,t)$ ,  $Z(x,t)$ ,  $F(x,t)$ ,  $F_2(x,t)$ ,  $G(x,t)$ ,  $L(x,t)$ ,  $L_2(x,t)$  – энергетические эквиваленты удельных биомасс фитопланктона, кормового зоопланктона, анчоуса, шпрота, ставриды и удельной величины технической базы активных флотов соответственно;  $R_{gl}$ ,  $R_{f2l2}$  – функции производительности рыболовных флотов;  $M_p$ ,  $M_z$ ,  $M_f$ ,  $M_{f2}$ ,  $M_g$  – элиминация и самолимитирование в популяциях;  $H$  – единичная функция Хевисайда;  $I_l(t)$  – изменение интенсивности питания ставриды;  $J_l(t)$  – сроки лова ставриды на СЗШ;  $v(x,t)$  – коэффициент горизонтального турбулентного обмена;  $\lambda_f$ ,  $\lambda_g$ ,  $\lambda_l$  и  $\mu_f$ ,  $\mu_g$ ,  $\mu_l$  – коэффициенты стайной вязкости и стайной диффузии;  $q_z$ ,  $q_s$ ,  $a_v$ ,  $b_v$ ,  $r_z$ ,  $r_f$  – весовые коэффициенты влияния соответствующих факторов на таксис хамсы, шпрота и ставриды;  $c_{pz}$ ,  $c_{zf}$ ,  $c_{zg}$ ,  $c_{fg}$ ,  $c_q$  и  $\delta_{pz}$ ,  $\delta_{zf}$ ,  $\delta_{zg}$ ,  $\delta_{fg}$ , – константы и передаточные множители трофических функций;  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $q$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\sigma_z$ ,  $\zeta_z$ ,  $\zeta_f$  – константы. Вид функции  $u(x,t)$  получен с учётом характерного ветрового режима, функция  $v(x,t)$  вычислена по изменчивости скоростей ветра и дрейфового течения [8]. Через  $\bar{D}$  и  $\bar{D}_{l2}$  обозначены вероятные или известные суммы непроизводственных расходов на промысле ставриды и шпрота.

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned} S(x,0) &= S_{x0}(x), \quad S(0,t) = S_{0t}(t), \quad S(l,t) = S_l = const, \\ U(x,0) &= U(0,t) = U(l,t) = V(x,0) = V(0,t) = V(l,t) = 0, \\ W(x,0) &= W(0,t) = W(l,t) = 0, \quad P(x,0) = P_{x0}(x), \\ P(0,t) &= P_{0t}(t), \quad \partial P(l,t)/\partial x = 0, \quad Z(x,0) = Z_{x0}(x), \\ Z(0,t) &= Z(t), \quad \partial Z(l,t)/\partial x = 0, \quad F(x,0) = F_{x0}(x), \\ \partial F(0,t)/\partial x &= 0, \quad \partial F(l,t)/\partial x = 0, \quad G(x,0) = G_{x0}(x), \\ \partial G(0,t)/\partial x &= 0, \quad \partial G(l,t)/\partial x = 0, \quad L(x,0) = L_{x0}(x), \\ \partial L(0,t)/\partial x &= \partial L(l,t)/\partial x = 0; \quad L_2(x,0) = L_{2x0}(x), \\ Q(x,0) &= Q_{x0}(x), \quad Q(0,t) = Q_{0t}(t), \quad Q(l,t) = Q_l = const, \\ U_{2a}(x,0) &= U_{2a}(0,t) = U_{2a}(l,t) = U_{2b}(x,0) = U_{2b}(0,t) = \\ &= U_{2b}(l,t) = 0, \quad W_2(x,0) = W_2(0,t) = W_2(l,t) = 0, \\ \partial L_2(0,t)/\partial x &= \partial L_2(l,t)/\partial x = 0, \quad F_2(x,0) = F_{2x0}(x), \\ \partial F_2(0,t)/\partial x &= 0, \quad \partial F_2(l,t)/\partial x = 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Вид начальных и граничных функций, а также изменчивости придонной температуры и суммарных течений  $u(x,t)$ , отражены на рис. 4 – 6.

Задача (1–16) в безразмерном виде решена численно с использованием неявной конечноразностной схемы второ-

го порядка точности. Решение устойчиво при изменении параметров модели в реальных пределах. Подход к безразмерному масштабированию подобных уравнений изложен автором в работах [8, 13]. Результаты решения представлены в размерном виде.

**Адаптация модели к экологическим условиям СЗШ.** Постановка математической задачи и метод её решения позволяют адаптировать модель к конкретным экологическим условиям акватории, подверженной влиянию речного стока. В модель впервые включены биогены, шпрот и промысел шпрота, значит, первым вопросом адаптации является правильная формализация функциональных взаимосвязей новых компонентов модели с учтываемыми факторами, вторым вопросом – настройка модели на правдоподобную имитацию реальных процессов в экосистеме.

Императивность температурного таксиса шпрота в уравнениях (12, 13) formalизована с помощью функции Хевисайда (рис.4).

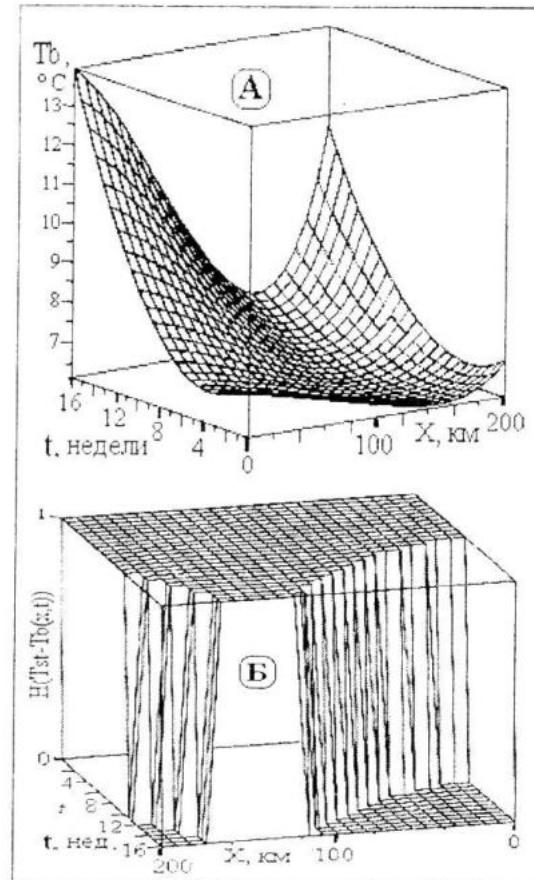
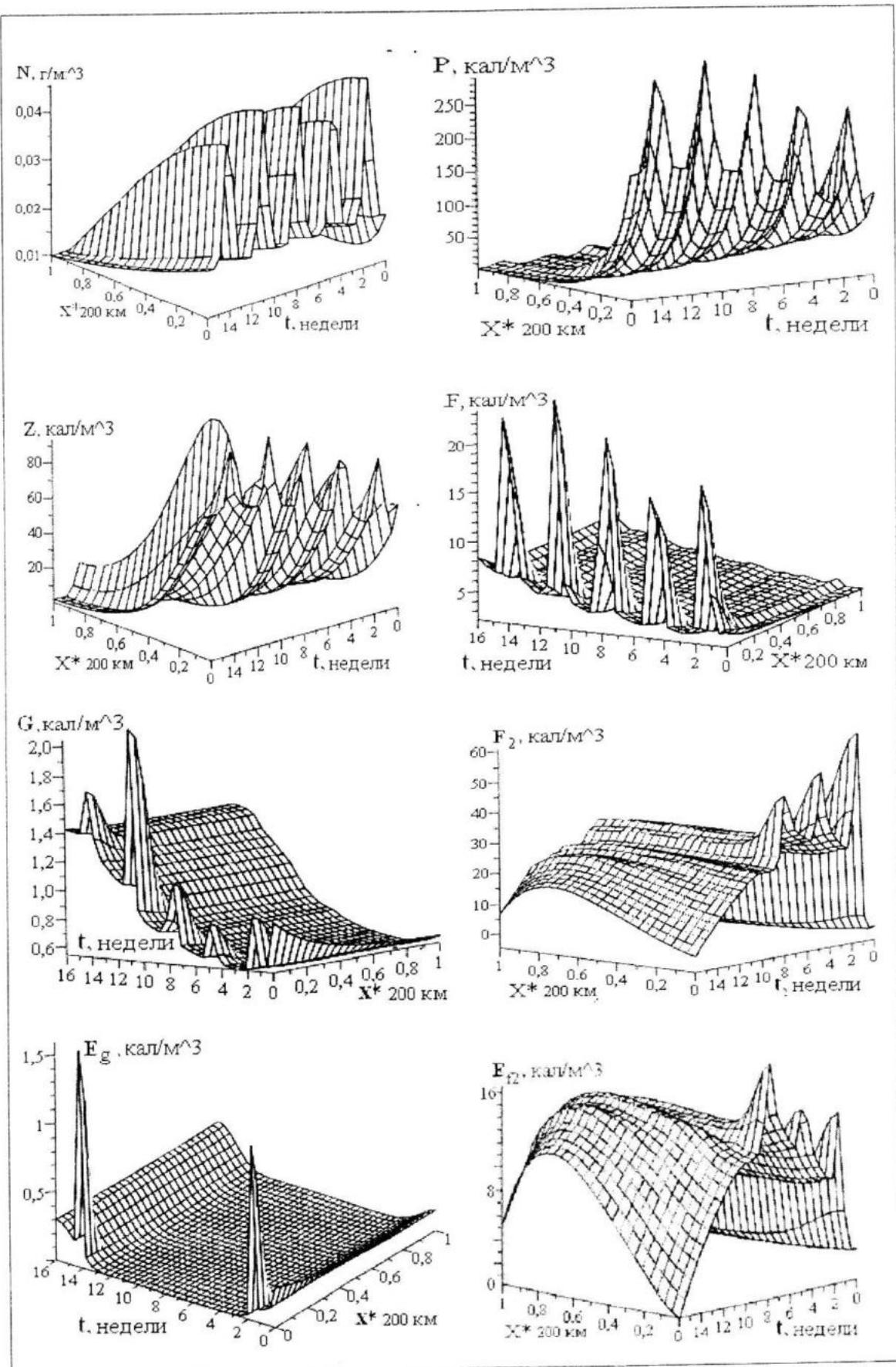


Рис.4. Изменчивость функций: А –  $T_b(x,t)$ , Б –  $H(T_{st} - T_b(x,t))$



Р и с. 5. Изменчивость концентраций: нитратного азота ( $N$ ), фитопланктона ( $P$ ), кормового зоопланктона ( $Z$ ), хамсы ( $F$ ), ставриды и её вылова ( $G$  и  $E_g$ ), шпрота и его вылова ( $F_2$  и  $E_{f2}$ )

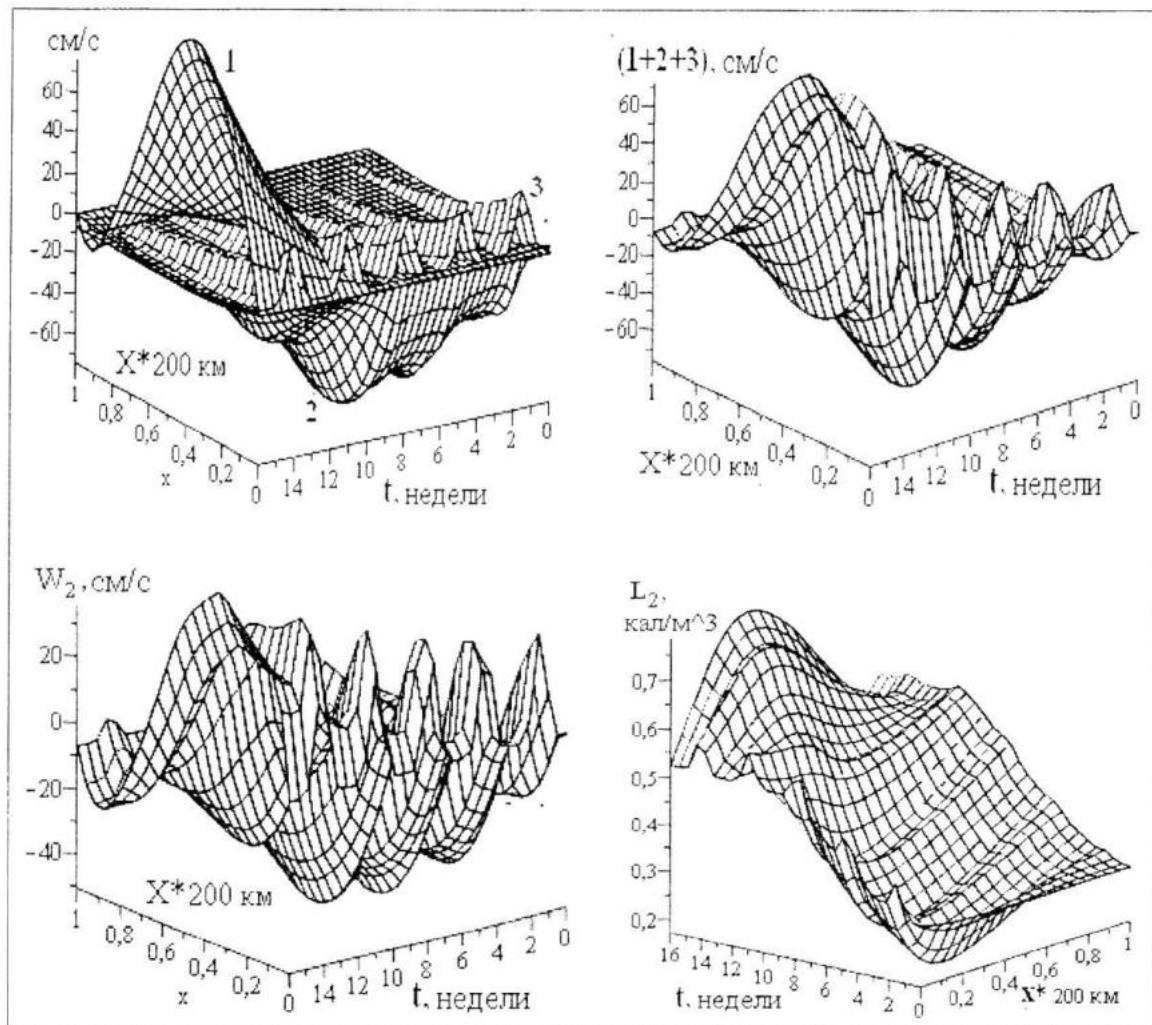


Рис. 6. Скорости температурного и кормового таксиса шпрота (1 –  $U_{2t}$ , 2 –  $U_{2p}$ ), а также скорость суммарного течения – постоянного плюс дрейфового (3 –  $u$ ); (1+2+3) – скорость перемещения шпрота в неподвижной системе координат;  $W_2$  – скорость флота на промысле шпрота,  $L_2$  – техническая база активного флота

Для формализации приходных и расходных статей баланса нитратного азота на масштабах математического моделирования, мы не имели необходимых натурных данных. Эвристичность использованного подхода к преодолению этой трудности состояла в том, что, зная концентрацию азота на западной границе акватории, можно, по аналогии с консервативной примесью (солёность), определить влияние на концентрацию азота процессов адвекция – диффузия. За пределами прибрежной полосы вод резко уменьшаются как потребление биогенов макрофитами, так и пополнение их запаса (летом) процессами локальной регенерации. Значимой остается единственная расходная статья – потребление азота фитопланктоном. Реальное по-

требление азота фитопланктоном получено путём подбора адекватной зависимости продуктивности фитопланктона от концентрации нитратного азота.

Для применения модели в качестве одного из инструментов управления рыбным промыслом, необходима формализация вероятных природных и антропогенных возмущений. Формализация основных для СЗШ возмущений предложена автором в работах [8, 13].

Адаптация модели к реальным экологическим условиям – дело трудоёмкое, оно всегда требует определённого количества натурных данных и большого числа вычислительных экспериментов. Признаком успеха служит повышенная устойчивость решения при квазистационарном состоянии экосистемы.

**Основные результаты.** Получено устойчивое численное решение поставленной математической задачи. Базовый вариант модели адаптирован к типичным экологическим условиям СЗШ и позволяет исследовать влияние широкого класса возмущений на функционирование системы «биогены – фитопланктон – кормовой зоопланктон – хамса – шпрот – ставрида – промысел шпрота и ставриды». Показан механизм воздействия промысла шпрота и ставриды на все компоненты биоценоза.

Поскольку поведение модели при тех же природных условиях, но без учёта шпрота, его промысла и прямого учёта изменчивости биогенов, исследовано в работе [5], новыми результатами является количественные закономерности влияния этих компонентов на систему. Большая активность флота и максимальный вылов шпрота получены в центральной части меридионального разреза акватории во второй половине гидрологического лета (рис. 5, 6). Концептуальный анализ качественно предсказывал именно такой результат: в это время шпрот переходит туда, где у дна сохраняется слой холодной воды. У западной границы акватории ослабевает пищевая конкуренция между шпротом и хамсой, концентрация хамсы при четвёртом и пятом ветровом течении достигает здесь максимальных значений. Соответственно, максимум концентрации зоопланктона располагается теперь между максимумами концентрации хамсы и шпрота, а концентрация фитопланктона здесь резко уменьшается. Где меньше фитопланктона, там сохраняется больше нитратного азота.

Включение в модель шпрота отодвинуло ближе к осени наступление максимума концентрации ставриды у западной границы акватории, так что он, по понятной причине, совпал с максимумом концентрации хамсы. Промысловое изъятие ставриды в конце сезона понизило пик её биомассы при пятом поступлении прибрежных вод и остановило рост её суммарной биомассы.

К основным результатам относятся также закономерности пространственно-временной изменчивости скоростей трансса шпрота, его передвижения в непод-

вижной системе координат и перемещения работающего флота (рис. 6). Изменчивость технической базы активного флота на промысле шпрота характеризует динамику использования его производственных возможностей.

В базовом варианте модели её компоненты изменяются в пределах, которые были характерны для квазистационарного состояния экосистемы до коллапса биомассы анchousa и ставриды. Предложенная ранее формализация основных возмущающих факторов позволяет имитировать максимально возможные отклонения параметров биоценоза от их исходного состояния.

При использовании данной модели в качестве одного из инструментов управления рыбным промыслом, возрастает роль начальных условий в уравнениях для биомассы рыб. Весной, после нереста, одна часть шпрота, для откорма, из открытой глубоководной акватории мигрирует на СЗШ, другая, меньшая, – на прикерченскую отмель. При локальном перелове шпрота на СЗШ, количество приходящего сюда весной шпрота может вначале оставаться прежним за счёт изменения направления весенней миграции части "прикерченского" шпрота. В результате, даже при сохранении добычи шпрота на прежнем уровне, интегральные промысловые запасы черноморского шпрота могут быть подорваны. Количество и возрастная структура популяций хамсы и ставриды весной зависят от характеристик их промыслового изъятия и условий зимовки. Зимние гидрометеорологические условия на СЗШ влияют на сроки и интенсивность цветения фитопланктона в тёплое время года и, через фитопланктон, на все уровни трофической пирамиды. Проведенные ранее исследования этих процессов позволяют придать модели прогностическую направленность.

С помощью данной модели можно оценить возможность катастрофических изменений в экосистеме СЗШ при одновременном действии таких возмущений, каждое из которых в отдельности не является угрожающим. Использовать эти возможности – основная задача на следующем этапе исследований.

**Заключение.** 1. Предлагаемая эколого-экономическая модель правдоподобно имитирует комплекс учитываемых процессов. 2. Модель может быть использована при исследовании последствий влияния на биоценоз единичных и множественных воздействий на компоненты системы. 3. Для увеличения надёжности рекомендаций по управлению рыбным промыслом, необходимо повысить адекватность начальных и граничных условий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Латун В.С. Экстремальные воздействия природных и антропогенных процессов на систему «биогены – планктон–пелагические рыбы – рыбный промысел». Системы контроля окружающей среды // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь. 2010. – Выпуск 13. – С. 132 – 140.
2. Shlyakhov V.A., Dackalow G.M. The state of marine living resources / State of environment of the Black Sea (2001 – 2006/7). Istanbul: «BSC Pabl.», 2008. Р. 321 – 364.
3. Шульман Г.Е., Никольский В.Н., Юнева Т.В. и др. Воздействие глобальных климатических и региональных факторов на мелких пелагических рыб Чёрного моря // Морской экологический журнал. – 2007. – VI, №4. – С. 18–30.
4. Латун В.С. Черноморский шпрот в море и в эколого-экономических моделях. Системы контроля окружающей среды // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь. 2010. – Выпуск 13. – С. 141 – 145.
5. Латун В.С. Влияние вылова ставриды на пространственно-временную изменчивость компонентов системы «фитопланктон – зоопланктон – анchoус – ставрида – промысел ставриды». Системы контроля окружающей среды / Средства, информационные технологии и мониторинг // Сб. науч. тр., НАН Украины, МГИ. – Севастополь. 2009. – С. 234 – 239.
6. Латун В.С. Учёт продуктивности фитопланктона и изменчивости концентрации биогенов в пространственных эколого-экономических моделях. Системы контроля окружающей среды // Средства, информационные технологии и мониторинг / Сб. науч. тр. НАН Украины. МГИ. – Севастополь. 2008. – С. 198 – 201.
7. Основы биологической продуктивности Черного моря / Под общ. ред. В.Н. Грэз. – Киев: Наук. Думка, 1979. – 391 с.
8. Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С. Тимченко И.Е. Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2007. – 258 с.
9. Иванов В.А., Ильин Ю.П. Атмосферные процессы и гидрологические условия, способствующие распространению речных вод на шельфе северо-западной части Чёрного моря // Комплексные экологические исследования Чёрного моря. – Севастополь, МГИ НАН Украины, 1995. С 68 – 81.
10. Еремеев В.Н., Латун В.С., Совга Е.Е. Влияние антропогенных загрязнителей и путей их переноса на экологическую обстановку в северо-западном районе Чёрного моря // Морской гидрофизический журнал, – 2001. – №5. – С. 41–55.
11. Латун. В. С. Учёт рыбного промысла в эколого-экономических моделях. Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН Украины. МГИ: – Севастополь. 2007. – С. 147 – 149.
12. Виноградов К. А., Розенгурт М. Ш., Толмазин Д. М. Атлас гидрологических характеристик северо-западной части Черного моря (в рыбопромысловых целях). – Киев: Наукова думка, 1966. – 96 с.
13. Еремеев В.Н., Тимченко И.Е., Васечкина Е.Ф., Игумнова Е.М., Латун В.С., Ярин В.Д. Системное моделирование морских эколого-экономических процессов. – Севастополь: «ЭКОСИ – Гидрофизика». – 2007. – 451 с.
14. Eremeev V.N., Suvorov A.M., Khalilin A.Kh., Belokopytov V.N., Godin E.A., Ingerov A.V. Oceanographic characteristics of the Black Sea: Data base and Digital atlas. – Sevastopol: NOAA – ESDIM, 2003. – CD version.