

В.С. Латун

Влияние летней миграции шпрота и его вылова на экосистему северо-западного шельфа Черного моря

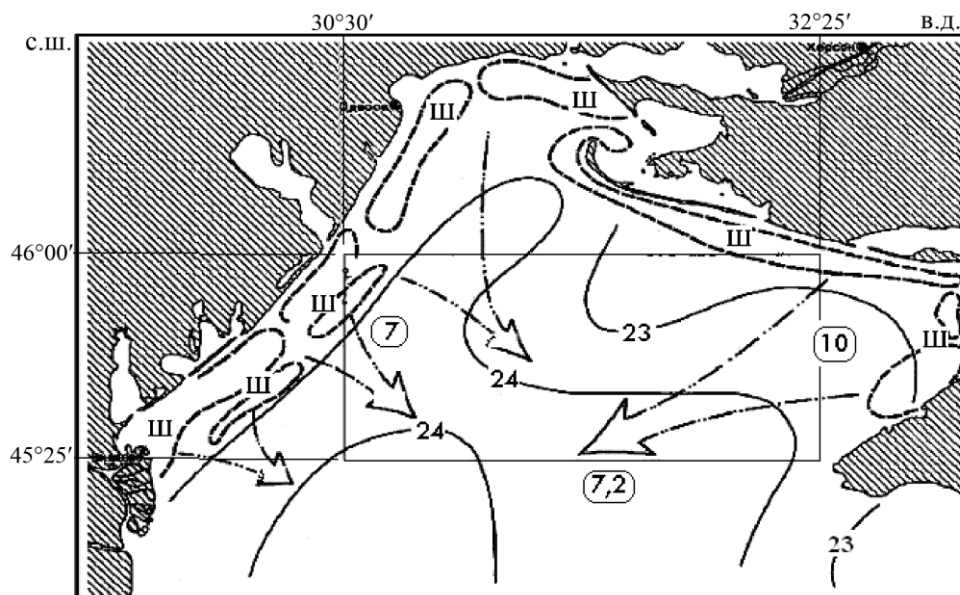
Предложена очередная модификация разрабатываемой автором эколого-экономической модели системы «биогены – фитопланктон – кормовой зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота», которая более адекватно имитирует комплекс реальных процессов при учете летней миграции шпрота с прибрежного мелководья на открытую акваторию северо-западного шельфа Черного моря. В базовом варианте новой модели получены количественные характеристики функциональных зависимостей между компонентами биоценоза. Показана возможность значительно увеличить промысловое изъятие шпрота.

Ключевые слова: экосистема, эколого-экономическая модель, Черное море.

Введение. В недавнем прошлом в результате нерегулируемого рыбного промысла сначала были практически уничтожены запасы черноморской популяции пелагиды, затем катастрофически уменьшены интегральные биомассы анчоуса (хамсы) и ставриды, при этом была нарушена естественная размерно-возрастная структура их нерестовых стад [1]. Шпрота в Черном море всегда было много, но его механизированный промысел начал развиваться только в последние десятилетия. В последовательно усложняемые эколого-экономические модели шпрот как компонент биоценоза был включен после хамсы и ставриды [2]. Обобщенные архивные данные об эволюционных особенностях шпрота и пространственно-временной изменчивости характеристик его популяции [3, 4] использованы для адаптации базового варианта разрабатываемой автором модели к типичным экологическим условиям теплого времени года в северо-западной части Черного моря на акватории с координатами 45,4 – 46° с. ш., 30,5 – 32,5° в. д. [5].

Основная цель данной работы – показать, как вероятное увеличение вылова шпрота повлияет на его промысловые запасы и биомассу других компонентов биоценоза. Для достижения этой цели необходимо модифицировать исходную модель путем включения в нее летней миграции шпрота, т. е. его перехода из прогретых до дна вод прибрежного мелководья на модельную акваторию, где сохраняется придонный слой более холодных вод (рис. 1).

© В.С. Латун, 2013



Р и с. 1. Места скопления шпрота (Ш) весной и пути его миграции в третьей декаде июля (стрелки) (среднемесячная температура воды ($^{\circ}\text{C}$) в приповерхностном слое моря – цифры на изолиниях, в придонном слое – цифры в рамках; прямоугольник – модельная акватория)

Развитие эколого-экономической модели. На основных этапах развития модели в нее последовательно были введены следующие рыбы и их промысел: хамса (*Engraulis encrasicolus ponticus*), ставрида (*Trachurus mediterraneus ponticus*), шпрот (*Sprattus sprattus phalericus*) [2, 5 – 7]. Хамса и ставрида – теплолюбивые рыбы, шпрот – холодолюбив. В теплое время года промысел хамсы на северо-западном шельфе (СЗШ) не проводится, весной и осенью здесь вылавливают ставриду, промысел хамсы и основной вылов ставриды сосредоточены в местах их зимовки. Наиболее перспективным районом для развития механизированного промысла шпрота во время гидрологического лета является акватория с глубинами 35 – 50 м между параллелями 45 и 46° с. ш., на которой у дна сохраняется слой воды с температурой около 8 $^{\circ}\text{C}$. При прогреве прибрежных вод до дна шпрот переходит на эту акваторию, где день проводит в холодных придонных водах, а ночью поднимается в вышележащие слои для питания зоопланктоном. С удалением от берега инерционность гидрологических процессов в придонном слое увеличивается, что облегчает учет температурного таксиса. В последние десятилетия развивается прицельный вылов шпрота разноглубинными травами из придонного слоя.

На каждом этапе развития модели была предложена математическая формализация впервые учитываемых экологических процессов. В задачах рассматриваемых пространственно-временных масштабов обязателен учет таксиса рыб. Выведены уравнения для скоростей кормового и нерестового таксиса хамсы [8], кормового таксиса ставриды с учетом особенностей ее питания [9], кормового и температурного таксиса шпрота [2]. Определенные

трудности были связаны с формализацией рыбного промысла [10]. Все предложенные дифференциальные уравнения выведены для нестационарной двумерной по пространству задачи: рассматривались зависимые переменные, осредненные по вертикальной координате.

Базовые варианты разрабатываемой модели были адаптированы к характерным экологическим условиям модельной акватории. Например, вклад шпрота в рацион ставриды невелик, а бентосные организмы полностью исключены из ее рациона, потому что теплолюбивая ставрида не опускается в холодные придонные воды. Шпрот и хамса – типичные планктонофаги. Рацион хамсы разнообразнее рациона шпрота, но летом на СЗШ основным объектом питания данных рыб служит эвритермная копепода *Acartia clausi* [3], поскольку здесь происходят ежесуточные вертикальные миграции эти рачков [11]. Поэтому ошибочно считать, что в таких экологических условиях шпрот, питаясь копеподой *Acartia clausi*, не конкурирует с теплолюбивой хамсой [4].

Анализ натуральных данных показал, что на модельной акватории зональная изменчивость экологических характеристик значительно превышает их меридиональную изменчивость. Следовательно, основные закономерности изменчивости изучаемых процессов можно имитировать в рамках одномерной по пространству динамической задачи. В натуральных данных обнаружено естественное подобие меридиональных распределений компонентов модели, что на следующем этапе исследования может облегчить численное решение автомодельной двумерной по пространству задачи [12].

Содержание модели. Предлагаемая модель является очередным этапом развития эколого-экономической модели системы «биогены – фитопланктон – кормовой зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота», в которой впервые были учтены промысел шпрота, процессы его жизнедеятельности (в том числе температурный и кормовой таксис), а также влияние изменчивости концентрации биогенов на продуктивность фитопланктона [5]. В исходной модели стимулами к перемещениям шпрота на выделенной акватории служат концентрация кормового зоопланктона и температура придонных вод. Для чистоты сравнительного анализа последовательно усложняемых моделей на боковых границах акватории для всех трех видов рыб ранее задавались одинаковые условия: со времени прихода на СЗШ до времени ухода с него рыбы были «заперты» на модельной акватории. Такой подход имел то преимущество, что давал возможность применить количественный эвристический метод для формализации трофических взаимодействий между компонентами биоценоза. Эти результаты сохраняют свое значение, но ради получения более адекватных рекомендаций по управлению рыбным промыслом на новом этапе моделирования необходимо отказаться от некоторых ограничений. Так, в предлагаемой модели впервые учтена летняя миграция шпрота из прибрежных прогретых вод на модельную акваторию с холодными придонными водами.

На перспективной для увеличения вылова шпрота акватории (модельная акватория на рис. 1) пространственно-временная изменчивость плотности его промысловых скоплений зависит не только от количества пришедшего сюда весной шпрота, локальных процессов нагула, температурного и кормового таксиса, но и от количества шпрота, перешедшего в июле с прибрежного

мелководья на эту акваторию. Пока позволяет температурная стратификация, шпрот остается в богатых зоопланктоном прибрежных водах. С повышением температуры придонных вод до критического значения шпрот переходит на модельную акваторию, где у дна сохраняется слой воды с температурой около 8°C. Мелкомасштабные пульсации скорости перемещения шпрота при летней миграции незначительны, поэтому от горизонтального градиента придонной температуры $T_b(t)$ зависит не ускорение, а скорость движения шпрота $U_T(t)$ (быстрый таксис) [7]. В продолжение подхода автора к выводу новых дифференциальных уравнений в пространственно двумерном виде (горизонтальные координаты) получено следующее уравнение:

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} = \vec{U}_T \vec{\nabla} F_2 = -b_v \vec{\nabla} T_b \vec{\nabla} F_2 H(T_b - T_{st}) H(T_f - T_b), \quad (1)$$

где F_2 – удельная биомасса шпрота; T_{st} , T_f – температура придонного слоя вод в начале и в конце миграции шпрота соответственно; $H(\dots)$ – единичная функция Хевисайда; b_v – коэффициент.

Для одномерной по пространству динамической модели из уравнения (1) следует формула

$$\bar{F}_{2(w,e)} = -b_v \int_{t_1(w,e)}^{t_2(w,e)} \frac{\partial T_{b(w,e)}}{\partial x} \frac{\partial F_{2(w,e)}}{\partial x} H(T_{b(w,e)} - T_{st}) H(T_f - T_{b(w,e)}) dt, \quad (2)$$

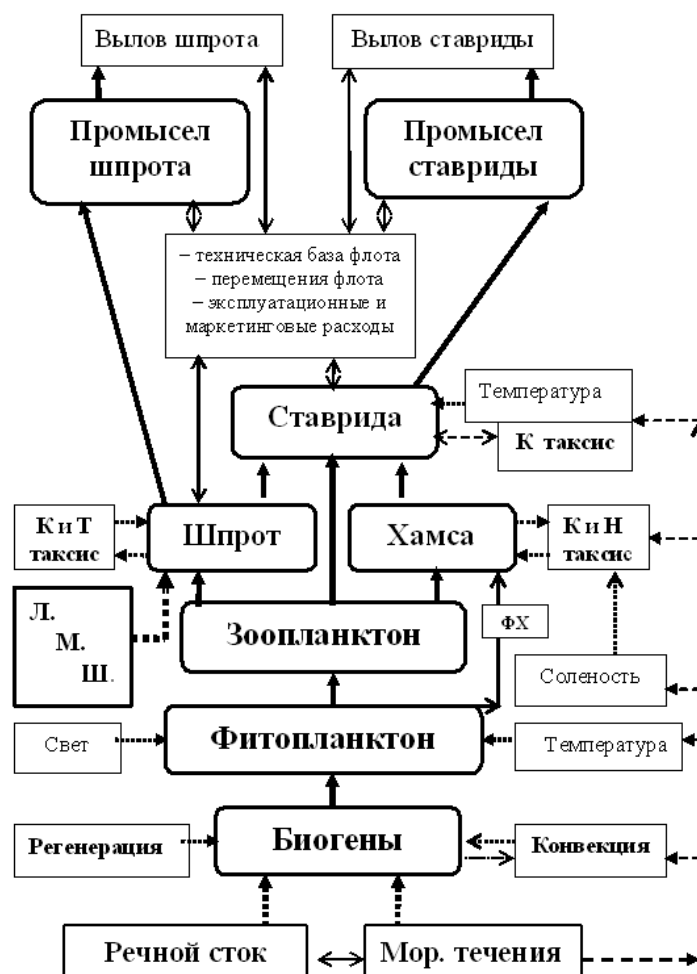
где $\bar{F}_{2(w,e)}$ – биомасса шпрота, перешедшего с прибрежной отмели на модельную акваторию через западную (w) и восточную (e) ее границы.

Переход шпрота на акваторию с комфортной для него придонной температурой происходит ускоренно, поскольку меридиональные границы модельной акватории расположены вблизи прибрежного свала глубин, где горизонтальный градиент придонной температуры увеличивается. Переход может начаться в момент $t_1(w,e)$, когда температура придонных вод на границах повысится до $T_b(t_1) = T_{st} = 7,8^\circ\text{C}$, и закончиться в момент $t_2(w,e)$ при температуре $T_b(t_2) = T_f = 8,2^\circ\text{C}$. За время $\Delta t_{(w,e)} = t_2(w,e) - t_1(w,e)$ шпрот покинет западную и восточную прибрежные отмели, и его промысловый запас на модельной акватории возрастет на величину $\bar{F}_2 = \bar{F}_{2w} + \bar{F}_{2e}$. Летом через западную часть северной границы на модельную акваторию также поступает значительное количество шпрота (рис. 1). Этот рост биомассы шпрота в основном районе промысла учтен в виде соответствующего увеличения значения \bar{F}_{2w} .

Для эвристической адаптации предложенной формализации к экологическим условиям СЗШ имеются климатические данные об изменчивости температуры придонных вод, сведения о максимальной скорости плавания мелких промысловых рыб, а также оценки прироста биомассы шпрота, весной пришедшего на откорм в прибрежные воды. Этих данных достаточно для того, чтобы, изменяя значение коэффициента b_v при реальной зависимости производных $\partial T_{b(w,e)}/\partial x$ и $\partial F_{2(w,e)}/\partial x$ от времени, настроить модель на адекватное функционирование. Следует также учитывать, что северная и меридиональные границы модельной акватории расположены вблизи прибрежного свала глубин, поэтому переход шпрота на акваторию с комфортными условиями

должен происходить интенсивно, т. е. интервалы времени $\Delta t_{(w,e)}$ должны быть невелики. Для формализации перечисленных особенностей летней миграции шпрота потребовалось усложнить соответствующие граничные условия.

На модельной акватории продолжающийся прогрев прилегающих к прибрежной отмели придонных вод приводит к переходу шпрота на более глубокие ее участки, где вблизи дна концентрация шпрота в дневное время значительно увеличивается, и его промысел становится наиболее результативным [5]. В наших исследованиях изменчивость температуры придонных вод задана по большому массиву натуральных данных [13]. Оперативный мониторинг придонной температуры технических трудностей не представляет.



Р и с. 2. Концептуальная схема функциональных зависимостей между компонентами биоценоза и факторами влияния в моделируемой экосистеме (ФХ – влияние условий питания личинок хамсы фитопланктоном на ее пополнение (*recruit stock*); К, Н, Т – кормовой, нерестовый и температурный таксис соответственно; Л. М. Ш. – летняя миграция шпрота)

Концептуальная схема новой модели представлена на рис. 2. Учет летней миграции шпрота позволит научно обосновать предельно допустимые объемы его вылова. Не имеет практического значения попытка установить предел допустимого промыслового изъятия хамсы и шпрота как половину их суммарной биомассы [14].

В период массового нереста (октябрь – март) шпрот рассеивается на большой акватории открытого моря, затем весной, после нереста, мигрирует на нагульные акватории СЗШ и на отмель южнее Керченского пролива [4, 15]. В зависимости от изменившихся экологических условий и объемов локальной добычи шпрота минувшим летом суммарная биомасса мигрирующего шпрота может перераспределяться между этими акваториями. С учетом данных мониторинга и результатов модельных расчетов можно, регулируя вылов шпрота на СЗШ, влиять на динамику его промысловых запасов. Опыт последних десятилетий показал, что механизированный рыбный промысел способен серьезно нарушить устойчивость экосистемы Черного моря [16].

Постановка и метод решения задачи. Основные уравнения модели имеют вид:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -u \frac{\partial S}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (v \frac{\partial S}{\partial x}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{q_z a_z F}{Z + \sigma_z} \frac{\partial Z}{\partial x} + q_s a_s \text{sign}(S_2 - S) [1 - H(S - S_1)H(S_2 - S)] \frac{\partial S}{\partial x} + \lambda_f \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = r_z b_z \frac{G}{Z + \zeta_z} \frac{\partial Z}{\partial x} + r_f b_f \frac{G}{F + \zeta_f} \frac{\partial F}{\partial x} + \lambda_g \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{aL}{G + b} \frac{\partial G}{\partial x} H(G - G_0) + \lambda_w \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = c_q QP - c_{pz} PZ - M_p - u \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (v \frac{\partial P}{\partial x}), \quad (7)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = \delta_{pz} c_{pz} PZ - c_{zf} ZF - c_{fz} ZF_2 - c_{zg} ZGI_t - M_z - u \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (v \frac{\partial Z}{\partial x}), \quad (8)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \delta_{zf} c_{zf} ZF - c_{fg} FGI_t - M_f - U_a \frac{\partial F}{\partial x} + \mu_f \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial G}{\partial t} = (\delta_{zg} c_{zg} Z + \delta_{fg} c_{fg} F + \delta_{fzg} c_{fzg} F_2) GI_t - M_g - V_a \frac{\partial G}{\partial x} + \mu_g \frac{\partial^2 G}{\partial x^2}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial t} = R_{gl}L J_t - W_a \frac{\partial L}{\partial x} + \mu_l \frac{\partial^2 L}{\partial x^2} - k_1 L^q - k_2 |W_a - u|^r - \bar{D}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = r_q \bar{D}_r - (c_{qp}P + c_{qm}\bar{M})Q - u \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (v \frac{\partial Q}{\partial x}), \quad (12)$$

$$\frac{\partial U_{2a}}{\partial t} = (\frac{a_v F_2}{Z+r} \frac{\partial Z}{\partial x} + \lambda_{2a} \frac{\partial^2 U_{2a}}{\partial x^2}) H(T_{st} - T_b), \quad (13)$$

$$\frac{\partial U_{2b}}{\partial t} = (-b_v \frac{\partial T_b}{\partial x} + \lambda_{2b} \frac{\partial^2 U_{2b}}{\partial x^2}) H(T_b - T_{st}), \quad (14)$$

$$\frac{\partial W_2}{\partial t} = (\frac{a_2 L_2}{F_2 + b_2} \frac{\partial F_2}{\partial x} + \lambda_{w_2} \frac{\partial^2 W_2}{\partial x^2}) H(F_2 - F_{2_0}), \quad (15)$$

$$\frac{\partial L_2}{\partial t} = R_{f_2 l_2} L_2 - W_{2a} \frac{\partial L_2}{\partial x} + \mu_{l_2} \frac{\partial^2 L_2}{\partial x^2} - k_3 L_2^{q_2} - k_4 |W_{2a} - u|^{r_2} - \bar{D}_{f_2}, \quad (16)$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} = \delta_{f_2} c_{f_2} Z F_2 H(T_{st} - T_b) - c_{f_2 g} F_2 G I_t - M_{f_2} - U_{2a} \frac{\partial F_2}{\partial x} + \mu_{f_2} \frac{\partial^2 F_2}{\partial x^2}. \quad (17)$$

Ось x направлена на восток, ее начало расположено на западной границе акватории. В уравнениях (3 – 17) использованы следующие условные обозначения: $S(x,t)$ – соленость 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 соответственно; $U_{2a}(x,t)$, $U_{2b}(x,t)$ – 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; $U_a(x,t)$, $U_2(x,t)$, $V_a(x,t)$, $W_a(x,t)$, $W_{2a}(x,t)$ – скорости движения хамсы, шпрота, ставриды и флотов в неподвижной системе координат соответственно; $Q(x,t)$ – концентрация биогенов; $c_{qm}\bar{M}$ – 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; $G_0(x,t)$, $F_{2_0}(x,t)$ – минимально рентабельные для промысла значения концентрации ставриды и шпрота; R_{gl} , $R_{f_2 l_2}$ – функции производительности рыболовных флотов; M_p , M_z , M_f , M_{f_2} , M_g – элиминация и самолимитирование в популяциях; H – единичная функция Хевисайда; $I_t(t)$ – изменение интенсивности питания ставриды; $J_t(t)$ – сроки лова ставриды на СЗШ; $v(x,t)$ – коэффициент гори-

зонтального турбулентного обмена; $\lambda_f, \lambda_g, \lambda_w, \lambda_{w_2}, \lambda_{2z}, \lambda_{2t}$ и $\mu_f, \mu_{f_2}, \mu_g, \mu_l, \mu_{l_2}$ – коэффициенты виртуальной вязкости и стайной диффузии; $q_z, q_s, a_z, a_s, a_v, b_v$ и r_z, r_f – весовые коэффициенты влияния соответствующих факторов на таксис хамсы, шпрота и ставриды соответственно; $c_{qp}, c_{pz}, c_{zf}, c_{zf_2}, c_{zg}, c_{f_2g}, c_q$ и $\delta_{pz}, \delta_{zf}, \delta_{zf_2}, \delta_{zg}, \delta_{fg}, \delta_{f_2g}$ – константы и передаточные множители трофических функций; $S_1, S_2, a, a_2, b, b_2, b_f, b_z, q, q_2, k_1, k_2, k_3, k_4, r, r_2, r_q, \sigma_z, \zeta_z, \zeta_f$ – константы. Вид функции $u(x, t)$ задан с учетом характерного ветрового режима, функция $v(x, t)$ вычислена по изменчивости скоростей ветра, дрейфового течения и глубины моря [6]. Через \overline{D} и \overline{D}_{f_2} обозначены вероятные или известные суммы непрямых расходов на промысле ставриды и шпрота, \overline{D}_r – средняя скорость регенерации биогеоценоза.

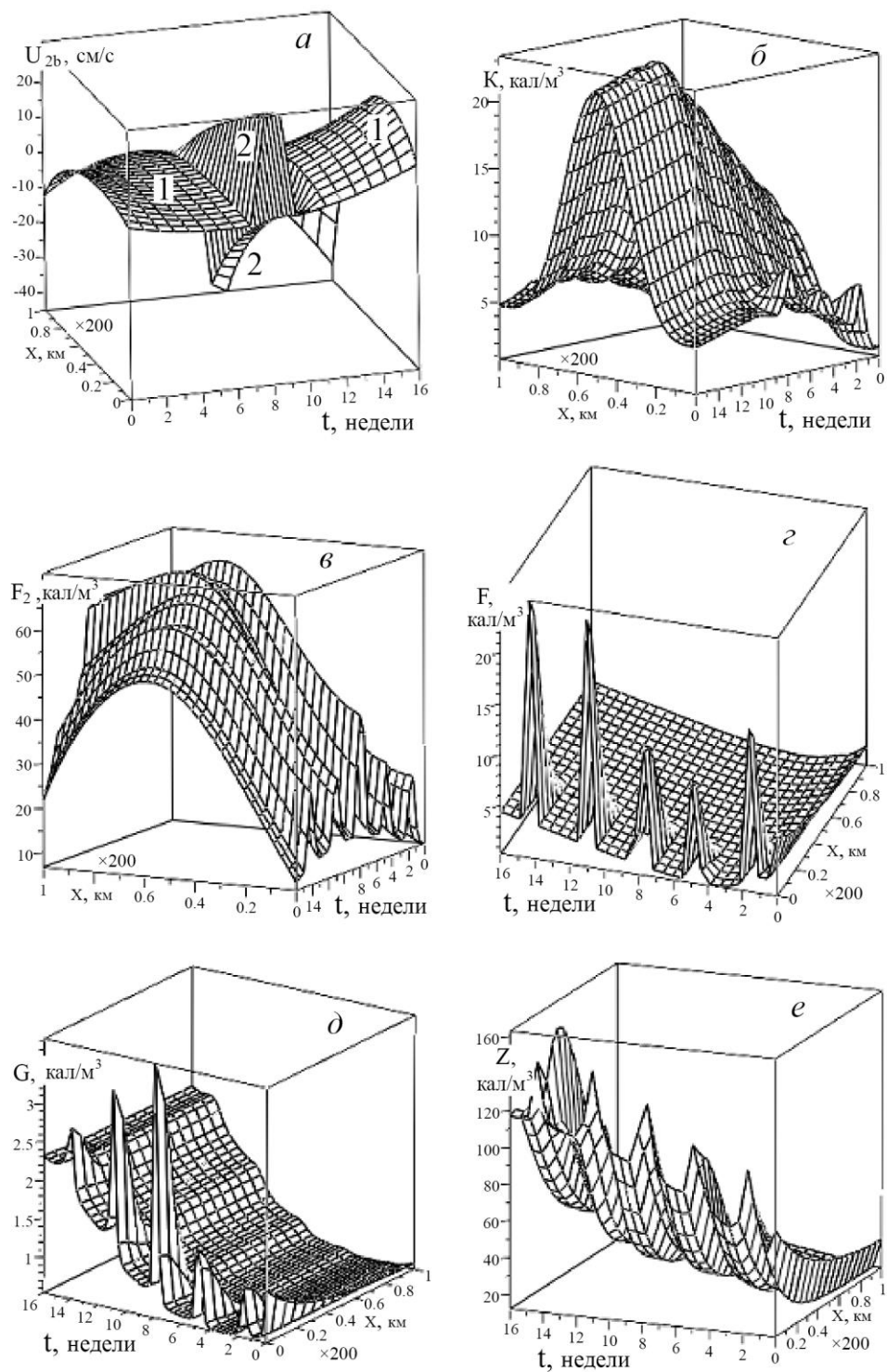
Удельный вылов шпрота $K = R_{f_2 l_2} L_2$ вычисляется в ходе решения задачи и может быть представлен в цифровом или графическом виде (рис 3, б).

Начальные и граничные условия следующие:

$$\begin{aligned}
 & S(x, 0) = S_{x0}(x), \quad S(0, t) = S_{0t}(t), \quad S(l, t) = S_l = \text{const}, \\
 & U(x, 0) = U(0, t) = U(l, t) = V(x, 0) = V(0, t) = V(l, t) = 0, \quad W(x, 0) = W(0, t) = W(l, t) = 0, \\
 & P(x, 0) = P_{x0}(x), \quad P(0, t) = P_{0t}(t), \quad \partial P(l, t) / \partial x = 0, \quad Z(x, 0) = Z_{x0}(x), \quad Z(0, t) = Z(t), \\
 & \partial Z(l, t) / \partial x = 0, \quad F(x, 0) = F_x(x), \quad \partial F(0, t) / \partial x = 0, \quad \partial F(l, t) / \partial x = 0, \quad G(x, 0) = G_{x0}(x), \\
 & \partial G(0, t) / \partial x = 0, \quad \partial G(l, t) / \partial x = 0, \quad L(x, 0) = L_{x0}(x), \quad \partial L(0, t) / \partial x = \partial L(l, t) / \partial x = 0, \quad (18) \\
 & L_2(x, 0) = L_{2x0}(x), \quad Q(x, 0) = Q_{x0}(x), \quad Q(0, t) = Q_{0t}(t), \quad Q(l, t) = Q_l = \text{const}, \\
 & U_{2a}(x, 0) = U_{2a}(0, t) = U_{2a}(l, t) = U_{2b}(x, 0) = 0, \quad U_{2b}(0, t) = -b_x \partial T_{b0t} / \partial x, \quad U_{2b}(l, t) = -b_x \partial T_{blt} / \partial x, \\
 & W_2(x, 0) = W_2(0, t) = W_2(l, t) = 0, \quad \partial L_2(0, t) / \partial x = \partial L_2(l, t) / \partial x = 0, \quad F_2(x, 0) = F_{2x0}(x), \\
 & \partial F_2(0, t) / \partial x = \partial F_{20t}(t) / \partial x, \quad \partial F_2(l, t) / \partial x = \partial F_{2lt}(t) / \partial x.
 \end{aligned}$$

Вид новых начальных и граничных функций для удельной биомассы шпрота отображен на рис. 3, в, заданная изменчивость придонной температуры представлена в работе [5].

Задача (3) – (18) решена численно с использованием неявной разностной схемы второго порядка точности. Решение устойчиво при изменении параметров модели в реальных пределах.



Р и с. 3. Изменчивость: *a* – скорости температурного таксиса (1) и летней миграции шпрота (2), *б* – удельного вылова шпрота, *в, г, д, e* – удельной биомассы шпрота, хамсы, ставриды и кормового зоопланктона соответственно

Адаптация модели к экологическим условиям СЗШ. Постановка математической задачи и устойчивость ее решения позволили адаптировать модель к конкретным экологическим условиям акватории, подверженной влиянию речного стока. Основным шагом дополнительной адаптации является формализованный учет влияния изменчивости температурной стратификации прибрежных вод на летнюю миграцию шпрота и, следовательно, на все моделируемые процессы. Биогены, шпрот и промысел шпрота были включены в предыдущий вариант модели [5], в новом ее варианте учтена также летняя миграция шпрота.

Адаптация модели к характерным экологическим условиям СЗШ представляет определенные трудности, так как для этого необходимо усвоение значительного массива натуральных данных и проведение большого количества вычислительных экспериментов. Для применения модели в качестве одного из инструментов управления рыбным промыслом необходима формализация вероятных природных и антропогенных возмущений. Формализация основных возмущений предложена автором в работах [1, 17]. Реальная экосистема устойчива в том смысле, что природные воздействия на отдельные компоненты системы не разрушают ее. На устойчивость модели накладываются более строгие ограничения [1].

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 – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота» с учетом летней миграции шпрота. Показан механизм воздействия увеличения промыслового запаса и вылова шпрота на все компоненты биоценоза (рис. 3).

Поведение модели при тех же природных условиях, но без учета летней миграции шпрота и соответствующего увеличения его вылова исследовано в работе [5], новыми результатами являются количественные закономерности влияния этих факторов на систему. Максимальное увеличение удельной биомассы и вылова шпрота получено для центральной части модельной акватории после прихода сюда шпрота из прогретых прибрежных вод (рис. 3, а, б, в). Соответственно интенсифицируется работа рыбопромыслового флота. Прогрев придонных вод распространяется от западной и восточной границ модельной акватории к ее центру. В результате во второй половине гидрологического лета в центральной части акватории концентрируется вдвое больше шпрота, чем было до учета его летней миграции.

Летняя миграция шпрота (быстрый температурный таксис через границы акватории) и перемещения шпрота по модельной акватории при повышении температуры придонных вод выше 8°C (медленный температурный таксис) императивны по отношению к кормовому таксису: на время температурного

таксиса кормовой таксис прекращается. При температурном таксисе шпрот движется в относительно малоподвижных водах придонного слоя, поэтому вычисленная скорость летней миграции шпрота близка к скорости его движения в неподвижной системе координат. Во второй половине лета при встречных скоростях медленного температурного таксиса формируется область повышенной промысловой концентрации шпрота. За промысловый сезон изымается около 15% суммарной биомассы шпрота, что влияет на все компоненты биоценоза (рис. 3).

Пищевая конкуренция между шпротом и хамсой особенно обостряется вблизи западной границы акватории в середине теплого сезона при совпадении времени развития очередного восточного течения с временем летней миграции шпрота. При таком совпадении кормовой таксис хамсы направлен навстречу мигрирующему шпроту, в результате возрастает суммарное потребление зоопланктона, уменьшается концентрация хамсы и резко возрастает концентрация ставриды. Столь резкое увеличение концентрации ставриды в середине сезона объясняется влиянием кормового таксиса и значительным усилением интенсивности ее питания при повышении температуры воды. При развитии восточных ветровых течений в начале и в конце теплого сезона промысел ставриды проводится вблизи западной границы модельной акватории, что значительно снижает здесь максимумы ее концентрации.

Существенно сказывается на моделируемой системе совпадение факторов влияния во время предосеннего поступления на акваторию богатых биогенами и планктоном прибрежных вод. Кормовой таксис приводит хамсу к западной границе акватории, температурный таксис уводит отсюда шпрот, промысловые суда следуют за шпротом, а промысел ставриды ведется вблизи этой границы. В результате удельная биомасса хамсы достигает здесь абсолютного максимума, локальный максимум биомассы ставриды невелик, максимумы биомассы шпрота и его вылова смещаются на 100 км к востоку, а максимум биомассы зоопланктона располагается между максимумами биомассы хамсы и шпрота. Естественно, что изменения концентрации фитопланктона связаны с изменениями концентраций биогенов и зоопланктона. Количественные характеристики функциональных зависимостей между основными компонентами биоценоза приведены на рис. 3.

Выводы.

1. Очередная модификация разрабатываемой эколого-экономической модели позволила существенно улучшить имитацию комплекса экологических процессов.
2. Учет летней миграции шпрота показал реальную возможность значительно увеличить его промысловое изъятие.

3. Для получения практически значимых рекомендаций по управлению промыслом шпрота необходимо на основе базового варианта модели провести, с усвоением данных мониторинга нерестовых миграций шпрота, серию вычислительных экспериментов по анализу совместного влияния изменчивости различных экологических факторов на устойчивость состояния моделируемой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Латун В.С.* Экстремальные воздействия природных и антропогенных процессов на систему «биогены – планктон – пелагические рыбы – рыбный промысел» // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2010. – Вып. 13. – С. 132 – 140.
2. *Латун В.С.* Черноморский шпрот в море и в эколого-экономических моделях // Там же. – С. 141 – 145.
3. *Основы биологической продуктивности Черного моря* / Под общ. ред. В.Н. Грезе. – Киев: Наукова думка, 1979. – 391 с.
4. *Юрьев Г.С.* Черноморский шпрот // Сырьевые ресурсы Черного моря / Под ред. К.С. Ткачева, Ю.К. Бенко. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – С. 73 – 92.
5. *Латун В.С.* Эколого-экономическая модель системы «биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриды и шпрота» // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2011. – Вып. 16. – С. 145 – 154.
6. *Латун В.С.* Моделирование системы «фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел» // Системное моделирование морских эколого-экономических процессов / Под ред. В.Н. Еремеева, И.Е. Тимченко. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. – С. 236 – 289.
7. *Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С. и др.* Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – 258 с.
8. *Латун В.С.* Дифференциальное уравнение для скорости кормового и нерестового таксиса хамсы // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – С. 212 – 214.
9. *Латун В.С.* Учет особенностей питания и кормового таксиса черноморской ставриды в эколого-математических моделях // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2006. – С. 218 – 220.
10. *Латун В.С.* Учет рыбного промысла в эколого-экономических моделях // Там же. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – С. 147 – 149.
11. *Ковалев А.В.* Структура зоопланктонных сообществ Атлантики и Средиземноморского бассейна. – Киев: Наукова думка, 1991. – 141 с.
12. *Баренблатт Г.И.* Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 207 с.
13. *Eremeev V.N., Suvorov A.M., Khaliulin A.Kh. et al.* Oceanographic characteristics of the Black Sea: Data base and digital atlas. – Sevastopol: NOAA – ESDIM, 2003. – CD version.
14. *Oguz T., Gilbert D.* Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960 – 2000: Evidence for regime-shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations // Deep-Sea Res. – 2007. – 1, № 54. – P. 220 – 242.

15. *Ivanov L.S., Beverton R.S.H.* The fisheries resources at the Mediterranean // The Black Sea. V. 2. – GFCM, FAO, 1985. – P. 134 – 142.
16. *Латун В.С.* Влияние рыбного промысла на устойчивость экосистемы Черного моря // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / Под ред. В.Н. Еремеева, С.К. Коновалова. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2012. – С. 331 – 353.
17. *Латун В.С.* Учет возмущающих факторов в эколого-экономических моделях системы «биогены – фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – промысел анчоуса и ставриды» // Системы контроля окружающей среды / Средства, информационные технологии и мониторинг. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – С. 430 – 433.

Морской гидрофизический
институт НАН Украины,
Севастополь

Материал поступил
в редакцию 17. 07.12
После доработки 16.08.12

АНОТАЦІЯ Запропонована чергова модифікація еколого-економічної моделі, яка розробляється автором, системи «біогени – фітопланктон – кормовий зоопланктон – анчоус – ставрида – шпрот – промысел ставриди та шпрота», яка більш адекватно імітує комплекс реальних процесів при врахуванні літньої міграції шпрота з прибережного мілководдя на відкриту акваторію північно-західного шельфу Чорного моря. В базовому варіанті нової моделі отримані кількісні характеристики функціональних залежностей між компонентами біоценозу. Показана можливість значно збільшити промислове вилучення шпрота.

Ключові слова: екосистема, еколого-економічна модель, Чорне море.

ABSTRACT New modification of the developed by the author ecological-economical model of the system «biogens – phytoplankton – zooplankton – anchovy – jack mackerel – sprat – jack mackerel and sprat fishery» is proposed. It more adequately simulates a set of actual processes in case a sprat summer migration from the Black Sea coastal shoal to the open part of the northwestern shelf is taken into account. Quantitative characteristics of functional dependences between the biocenosis components are obtained in the basic variant of a new model. Possibility of considerable increase of sprat fishery is shown.

Keywords: ecosystem, ecological-economical model, Black Sea.