

**ВЛИЯНИЕ ВЫЛОВА СТАВРИДЫ  
НА ПРОСТРАНСТВЕННО-  
ВРЕМЕННУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ  
КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ  
«ФИТОПЛАНКТОН –  
ЗООПЛАНКТОН –  
АНЧОУС – СТАВРИДА –  
ПРОМЫСЕЛ СТАВРИДЫ»**

*В. С. Латуш*

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

*Формализация механизированного промысла пелагических рыб и адаптация новой модели к типичным экологическим условиям северо-западного шельфа Чёрного моря позволили проанализировать влияние промысла ставриды на компоненты системы. Практический интерес представляют полученные закономерности влияния вылова ставриды на динамику пространственного распределения удельных биомасс анчоуса и ставриды в тёплое время года.*

**Введение.** На северо-западном шельфе Чёрного моря (СЗШ) анчоус и ставрида находятся в тёплый период года, когда происходит их нагул и нерест. Интенсивный механизированный промысел ставриды на СЗШ проводится в начале и в конце тёплого периода, промысел анчоуса (хамсы) проводится зимой в других районах моря. Ранее автором разработана и адаптирована к условиям СЗШ пространственная динамическая модель системы «фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида» [1]. Модель состоит из семи дифференциальных уравнений в частных производных и соответствующих граничных условий. Учтены следующие процессы: потоки энергии в трофической пирамиде, перенос примесей и планктона течениями и виртуальной диффузией, таксис рыб. Градиентные и ветровые течения задаются по известным натурным данным или вычисляются в отдельном программном блоке с использованием прогноза погодных условий. Изменчивость удельной продуктивности фитопланктона задана параметрически с учётом переноса биогенов течениями.

Дифференциальные уравнения для включения рыбного промысла в эколого-экономические модели получены автором в

работе [2]. Учтены основные технико-экономические характеристики промысла, в том числе перемещения флота за скоплениями рыбы. Уравнения предназначены для использования в математических моделях морских экосистем. Цель данного исследования – с учётом формализации работы рыболовного флота предложить эколого-экономическую модель системы «фитопланктон – кормовой зоопланктон – анчоус – ставрида – промысел ставриды», адаптировать новую модель к типичным экологическим условиям тёплого времени года на СЗШ и проанализировать влияние промысла ставриды на все остальные компоненты указанной системы.

**Содержание модели.** Разработанная эколого-экономическая модель системы «фитопланктон – копеподы – анчоус – ставрида – промысел ставриды» имитирует пространственно-временную изменчивость компонентов системы в тёплое время года в центральной части СЗШ. Эта изменчивость формируется в результате взаимодействия различных процессов. Биогены, солёность и планктон переносятся течениями. Анчоус и молодь ставриды идут в места с достаточной концентрацией копепод. Готовый к нересту анчоус ищет воду определённой солёности. Взрослая ставрида преследует анчоус. В начале и в конце сезона флот ведёт интенсивный промысел ставриды, перемещаясь в места её оптимальной концентрации. Характерными природными воздействиями на систему являются медленный перенос примесей западным стационарным течением и повторяющийся вынос восточными ветровыми течениями распреснённых, эвтрофированных прибрежных вод в центральную часть СЗШ. Заданные течения и коэффициенты турбулентного обмена соответствуют климатическим сведениям о повторяемости ветров, изменчивость продуктивности фитопланктона – изменчивости концентрации биогенов [3]. В модели учтены все статьи промыслового бюджета. Поступления в приходную статью зависят от результатов промысла. Основными расходными статьями являются амортизационные, эксплуатационные, транспортные и маркетинговые отчисления. Денежные единицы конвертируются в единицы энергетического эквивалента выловленной рыбы [2].

В базовом варианте модели учтены характерные для СЗШ экологические условия.

Перед началом путины промысловый флот заходит на акваторию и распределяется там определённым образом. Во время путины (по месяцу в начале и в конце тёплого сезона) активность флота зависит от изменяющейся промысловой обстановки.

Для сохранения преемственности моделей и возможности сравнительного анализа их результатов, новая модель тоже настроена на экологические условия открытой акватории размерами 110 на 200 км в центральной части СЗШ (45°–46°с.ш., 30°–32.5°в.д.). На этой акватории дно сравнительно ровное, средняя глубина равна 35 м, а меридиональная неоднородность характеристик биотопа и биоценоза намного меньше их зональной неоднородности.

Зональная неоднородность характеристик связана с наличием прибрежного гидрологического фронта западнее акватории. Процессы кроссфронтального перемешивания и перенос более солёных, бедных биогенами вод на запад медленным стационарным течением влияют на уменьшение солёности и увеличение концентрации биогенов и планктона вблизи фронтальной зоны. Более сильное влияние на пространственно-временную изменчивость всех характеристик системы оказывают нестационарные ветровые течения восточной четверти, при которых происходит прорыв гидрологического фронта и эвтрофированные, распреснённые прибрежные воды распространяются далеко на восток. Зональная неоднородность характеристик преобладает и в этих условиях. Поэтому при рассмотрении зональной изменчивости характеристик, осреднённых по меридиональным сечениям акватории, сохраняются основные черты пространственной структуры моделируемых процессов. Переход к одномерной по пространству нестационарной задаче является временным, он упрощает вычислительные процедуры и тем способствует преодолению принципиальных трудностей в развитии математического моделирования этой сложной системы.

**Постановка и метод решения задачи.** К основным уравнениям математической модели системы «фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида» [1] добавлены два новых нелинейных уравнения: уравнение для удельной величины активной технической базы промыслового флота ( $L$ ) и уравнение для относительной скорости

перемещения работающего флота ( $W$ ). Изменчивость вылова ставриды является промежуточным результатом вычислительного процесса.

Основные уравнения задачи:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ось  $0x$  направлена на восток, её начало расположено на западной границе акватории. В уравнениях (1–9) использованы следующие условные обозначения:  $S(x,t)$  – солёность морской воды,  $U(x,t)$ ,  $V(x,t)$ ,  $W(x,t)$ ,

– скорости таксиса анчоуса, ставриды и промыслового флота,  $U_a(x,t)$ ,  $V_a(x,t)$ ,  $W_a(x,t)$  – скорости движения анчоуса, ставриды и флота в неподвижной системе координат,  $P(x,t)$ ,  $Z(x,t)$ ,  $F(x,t)$ ,  $G(x,t)$ ,  $L(x,t)$  – энергетические эквиваленты удельных биомасс фитопланктона, кормового зоопланктона, анчоуса, ставриды и удельной величины технической базы активного флота соответственно,  $R_{gl}$  – функция производительности рыболовного флота,  $p(x,t)$  – продуктивность фитопланктона,  $M_p$ ,  $M_z$ ,  $M_f$ ,  $M_g$  – элиминация и самолимитирование в популяциях,  $H$  – единичная функция Хевисайда,  $\text{sign}(S_2 - S)$  – знак разности ( $S_2 - S$ ),  $I_i(t)$  – изменение интенсивности питания ставриды,  $J_i(t)$  – продолжительность путины,  $u(x,t)$  – суммарная скорость ветрового и фонового течений,  $v(x,t)$  – коэффициент горизонтального турбулентного обмена,  $\lambda_f$ ,  $\lambda_g$ ,  $\lambda_l$  и  $\mu_f$ ,  $\mu_g$ ,  $\mu_l$  – коэффициенты стайной вязкости и стайной диффузии,  $q_z$ ,  $q_f$  и  $r_z$ ,  $r_f$  – весовые коэффициенты влияния соответствующих факторов на таксис анчоуса и ставриды,  $c_{pz}$ ,  $c_{zf}$ ,  $c_{zg}$ ,  $c_{fg}$  и  $\delta_{pz}$ ,  $\delta_{zf}$ ,  $\delta_{zg}$ ,  $\delta_{fg}$  – константы и передаточные множители трофических функций,  $S_f$ ,  $S_z$ ,  $q$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\sigma_z$ ,  $\zeta_z$ ,  $\zeta_f$  – константы. Вид функций  $u(x,t)$  и  $p(x,t)$  выбран с учётом рассматриваемых экологических условий (рисунок 1), функция  $v(x,t)$  вычислена по изменчивости скоростей ветра и дрейфового течения [3].

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned}
 S(x,0) = S_{x0}(x), \quad S(0,t) = S_{0t}(t), \quad S(l,t) = S_l = \text{const}, \\
 U(x,0) = U(0,t) = U(l,t) = V(x,0) = V(0,t) = V(l,t) = 0, \\
 W(x,0) = W(0,t) = W(l,t) = 0, \quad P(x,0) = P_{x0}(x), \\
 P(0,t) = P_{0t}(t), \quad \partial P(l,t)/\partial x = 0, \quad Z(x,0) = Z_{x0}(x), \\
 Z(0,t) = Z_{0t}(t), \quad \partial Z(l,t)/\partial x = 0, \quad F(x,0) = F_{x0}(x), \\
 \partial F(0,t)/\partial x = 0, \quad \partial F(l,t)/\partial x = 0, \quad G(x,0) = G_{x0}(x), \\
 \partial G(0,t)/\partial x = 0, \quad \partial G(l,t)/\partial x = 0, \quad L(x,0) = L_{x0}(x), \\
 \partial L(0,t)/\partial x = \partial L(l,t)/\partial x = 0.
 \end{aligned} \quad (10)$$

На рисунках 1 и 2 отражен вид следующих заданных функций:  $S_{x0}(x)$ ,  $S_{0t}(t)$ ,  $P_{x0}(x)$ ,  $P_{0t}(t)$ ,  $Z_{x0}(x)$ ,  $Z_{0t}(t)$ ,  $F_{x0}(x)$ ,  $G_{x0}(x)$ ,  $u$ ,  $L_{x0}(x)$ .

Задача (1–10) в безразмерном виде решена численно с использованием неявной конечноразностной схемы второго порядка точности. Решение устойчиво при изменении основных параметров модели в реальных пределах. Процедура безразмерного масштабирования подобных уравнений изложена в работе [3]. Результаты решения представлены на рисунках 1 и 2 в размерном виде.

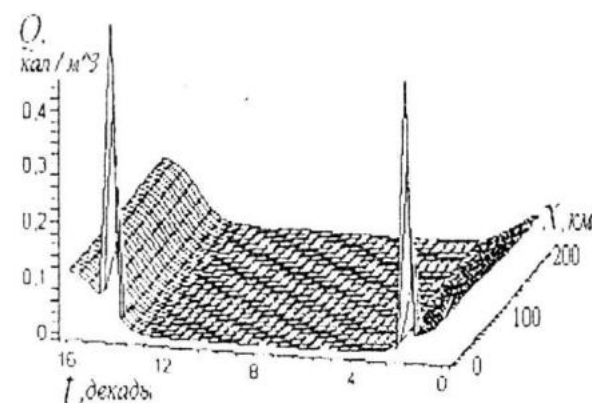
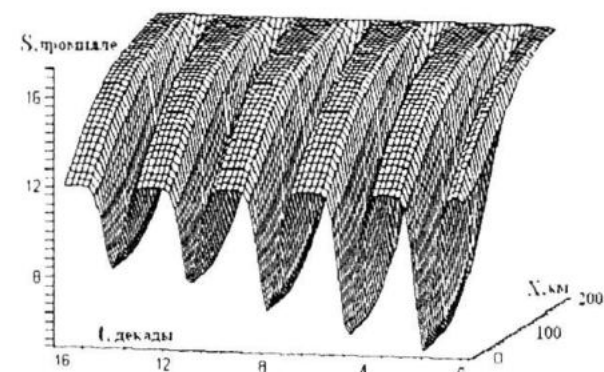
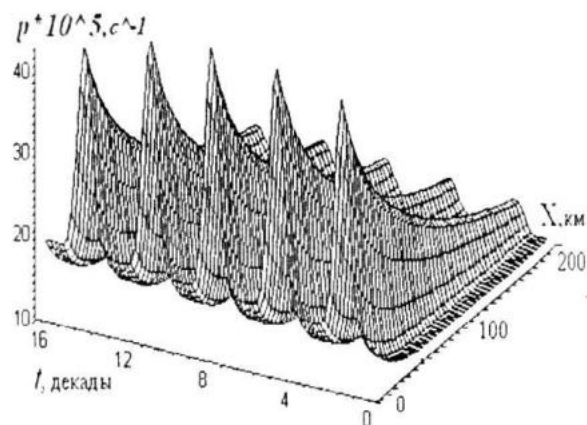
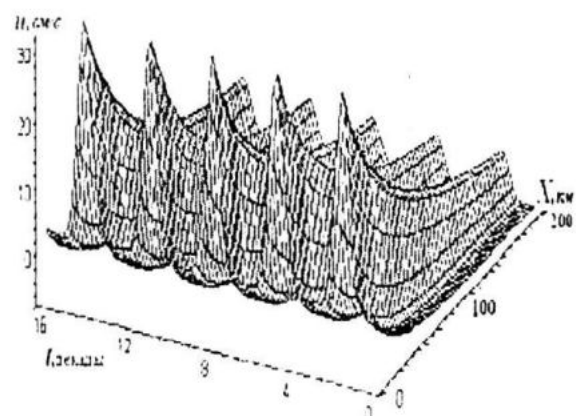


Рисунок 1 – Изменчивость заданных течений ( $u$ ), удельной продуктивности фитопланктона ( $p$ ) и вычисленных распределений солёности ( $S$ ), вылова ставриды ( $Q$ )

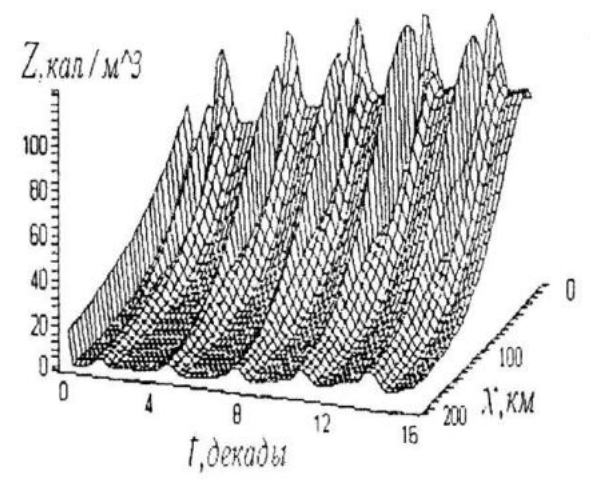
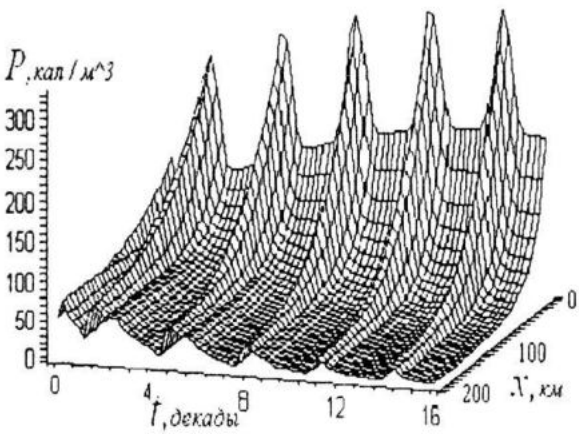
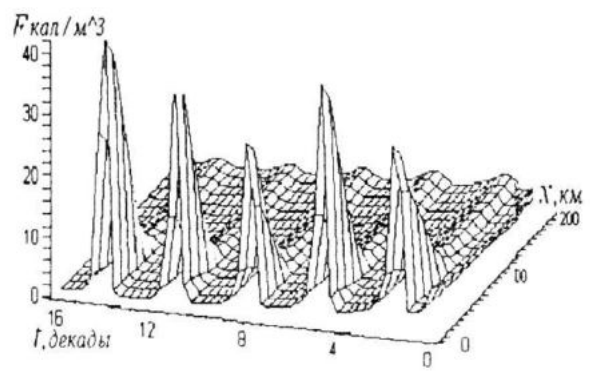
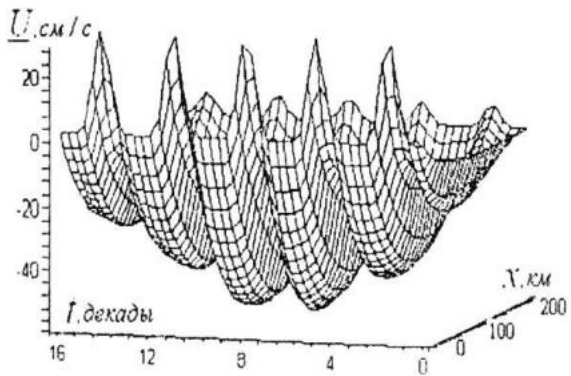
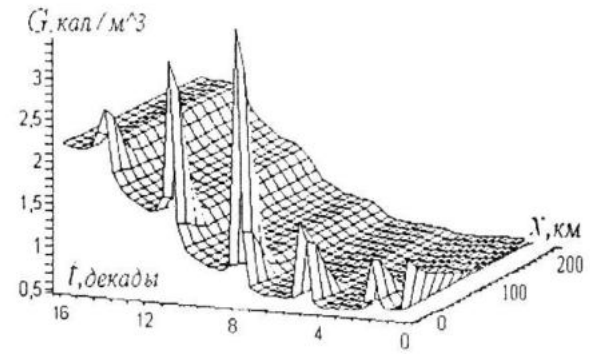
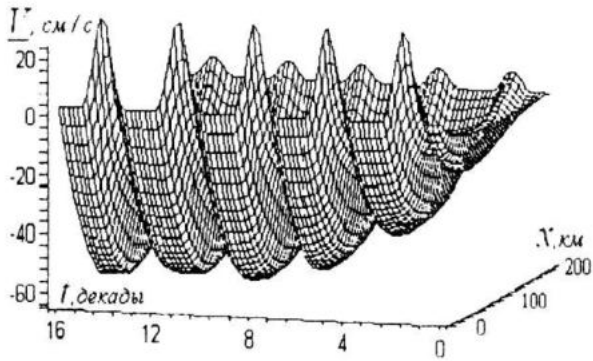
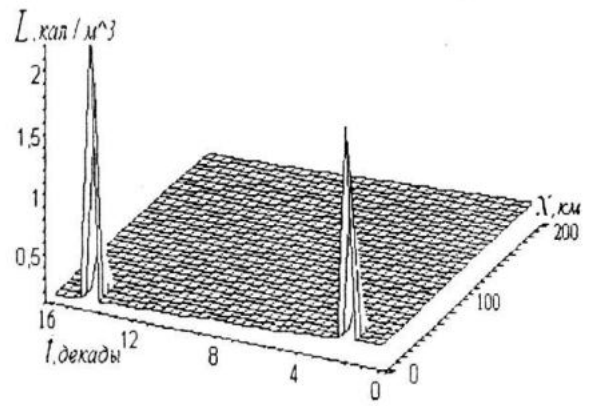
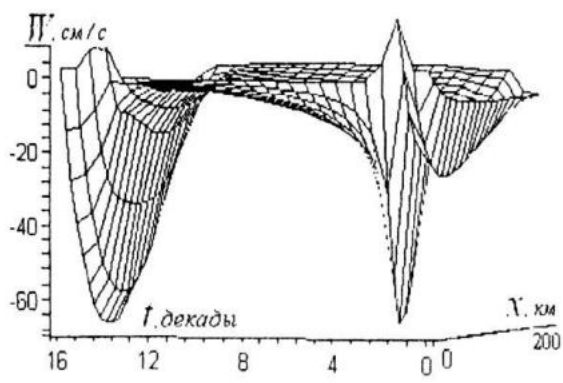


Рисунок 2 – Изменчивость зависимых переменных в тёплый период года

**Адаптация модели к экологическим условиям СЗШ.** Этапами построения модели являются составление, отладка программы численного решения задачи (1–10) и настройка полученного решения на адекватно-устойчивую имитацию функционирования системы в экологических условиях СЗШ. Реальная экосистема устойчива в том смысле, что изменчивость природных воздействий на отдельные компоненты системы не разрушают её. Под адекватной устойчивостью модели мы понимаем её способность, при возможных природных воздействиях на любой компонент системы, сохранять значения остальных компонентов в исторически известных или в экологически допустимых пределах. Отрицательные последствия интенсивных антропогенных воздействий на экосистему можно оценивать по величине выхода её компонентов за эти пределы.

При настройке модели на адекватно-устойчивое функционирование была выполнена оценка значений новых, априори неизвестных параметров задачи. На биологические компоненты системы флот влияет через вылов ставриды  $Q = R_{gl}(G)LJ$ . В работе [2] нами предложена зависимость

$$R_{gl}(G) = \frac{a_k G^m}{b_k + G^m} + c_k, \quad (11)$$

которая может быть аппроксимирована кусочно-линейной функцией

$$R_{gl}(G) \approx (c_1 G - c_2) H(G - G_{min}) + H(G_{max} - G) + R_{max} H(G - G_{max}) \quad (12)$$

При  $G < G_{min}$  промысел прекращается из-за его нерентабельности и  $R = 0$ ; при  $G > G_{max}$  производительность промысла ограничена техническими возможностями флота и  $R = R_{max} = const$ . Для оценки коэффициентов в формулах (11, 12) использован эвристический подход.

Адаптация модели к реальным экологическим условиям потребовала большого числа вычислительных экспериментов. В экспериментах проверена и чувствительность решения к следующим двум процедурам: 1. Изменение дискретизации независимых переменных. 2. Замена гладкой  $S$ -образной функции  $R_{gl}$  (11) её кусочно-линейным аналогом (12). Эксперименты показали, что: 1. При  $\Delta x = 2 - 4$  км и  $\Delta t = 2 - 3$  суток модель воспроизводит реальные особенности функционирования системы.

При уменьшении шагов появляются те мелкомасштабные детали, для верификации которых сегодня ещё нет необходимых натуральных данных. 2. Изменение вида функции  $R_{gl}$  с (11) на (12) незначительно сказывается на вылове ставриды и на изменчивости остальных компонентов системы.

В базовом варианте модели характерная пространственно-временная изменчивость суммарных течений и удельной продуктивности фитопланктона заданы на основе многолетних данных [4]. Не учитывалось динамика транспортных и маркетинговых расходов.

**Основные результаты.** Получено устойчивое численное решение поставленной математической задачи. Модель адаптирована к типичным экологическим условиям СЗШ и позволяет исследовать влияние широкого класса возмущений на функционирование системы «фитопланктон – кормовой зоопланктон – анчоус – ставрида – промысел ставриды». Показан механизм воздействия промысла ставриды на все компоненты биоценоза.

Динамика вылова ставриды и изменчивость поля солёности представлены на рисунке 1. Полученная пространственно-временная изменчивость остальных зависимых переменных задачи (1–10) показана на рисунке 2. Эти графики содержат много интересной информации. Поскольку поведение системы при тех же природных условиях, но без учёта промысла ставриды, исследовано в работах [1, 4], новыми результатами является закономерности влияния вылова ставриды на систему.

Большая активность флота и максимальные уловы ставриды получены в местах её концентрации вблизи западной границы акватории при весеннем и осеннем поступлениях прибрежных эвтрофированных вод. В результате весеннего промыслового изъятия ставриды её суммарная биомасса к началу лета несколько уменьшилась. Ослабление пресса ставриды способствовало дополнительному росту биомассы анчоуса, особенно в западной части акватории, где велика продуктивность фитопланктона и достаточно корма для зоопланктона и анчоуса.

Рост биомассы организмов всех трофических уровней ускорился под влиянием первого летнего течения на восток, у западной границы акватории особенно заметен

рост концентрации анчоуса. В середине лета питание ставриды интенсифицировалось под влиянием прогрева вод, а её промысел прекратился. В результате произошло значительное увеличение суммарной биомассы ставриды.

Максимальная концентрация ставриды получена на западе акватории во время третьего течения на восток. Концентрация анчоуса здесь соответственно понизилась до наименьшего значения за все пять случаев развития таких течений.

Во второй половине лета интегральная биомасса ставриды быстро растёт, что обуславливает медленный рост биомассы анчоуса. Когда восточных течений нет, фоновое течение направлено на запад, а ставрида и анчоус не скапливаются у западной границы. При очередном (четвёртом) развитии восточного ветрового течения, на фоне роста интегральной биомассы ставриды, её концентрация вблизи западной границы акватории уменьшилась, а концентрация анчоуса здесь существенно увеличилась. Изменчивость скорости миграции рыб и скорости перемещения флота по акватории являются содержательными характеристиками моделируемых экологических процессов (рисунок 2, –  $U, V, W$ ).

Под влиянием осенней путины и уменьшения интенсивности питания прирост биомассы ставриды в конце тёплого сезона прекратился. Путина "съела" осенний пик концентрации ставриды, концентрация анчоуса достигла максимальных значений за все предыдущие четыре случая развития восточных течений. Поедание анчоусом копепод уменьшило их биомассу, уменьшение биомассы копепод привело к увеличению биомассы фитопланктона.

Влияние промысла ставриды на планктон несколько сглаживается тем, что копеподы, как и анчоус, входят в рацион ставриды, но служат основным продуктом питания анчоуса. Поэтому прямым следствием вылова ставриды является некоторое увеличение биомассы копепод. Косвенно, через увеличение биомассы анчоуса, промысел ставриды приводит к уменьшению биомассы копепод. В результате, как видно на графике функции  $Z(x,t)$ , во время промысла ставриды увеличивается суммарное потребление копепод рыбами, особенно при развитии восточных ветровых течений. Биомасса фитопланктона, высота и острота

гребней его максимальной концентрации соответственно возрастают (рис. 2).

Во время путины большая подвижность активного промыслового флота обеспечивает быструю концентрацию его удельной технической базы в районах максимального скопления ставриды. Полученные результаты достаточно правдоподобны, но, для адекватной имитации работы флота, необходимо знать его точные производственно-экономические характеристики. Прежде всего, следует определить параметры функции удельной производительности флота, затем – быстроту реакции всех служб флота на изменение промысловой обстановки.

**Заключение.** С учётом формализации промысла пелагических рыб разработана эколого-экономическая модель системы «фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида – промысел ставриды». Модель адаптирована к экологическим условиям северо-западного шельфа Чёрного моря и, как показали вычислительные эксперименты, позволяет исследовать механизмы воздействия естественных и антропогенных факторов на изменчивость биоресурсов данной акватории. Получены закономерности влияния вылова ставриды на динамику пространственного распределения удельных биомасс планктона, анчоуса и ставриды в тёплое время года.

## Л и т е р а т у р а

1. Латун В.С. Эколого-математическая модель системы фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида // Системы контроля окружающей среды / Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. – Севастополь. 2007. – С. 150–155.
2. Латун В.С. Учёт рыбного промысла в эколого-экономических моделях // Системы контроля окружающей среды / Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. – Севастополь. 2007. – С. 147–149.
3. Латун В.С. Моделирование системы «фитопланктон – зоопланктон – рыба – рыбный промысел» / Еремсев В.Н., Тимченко И. Е. Системное моделирование морских эколого-экономических процессов. – Севастополь: «ЭКОСИ-Гидрофизика». 2007. – С. 236 – 289.
4. Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е. Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: МГИ НАНУ. 2007. – 258 с.