

Биоразнообразие и биоресурсная емкость морской среды в адаптивной модели эколого-экономической системы берег – море

И. Е. Тимченко*, Е. М. Игумнова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

*E-mail: timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru

Поступила в редакцию 15.12.2017 г.

Построена адаптивная модель управления процессами потребления морских биоресурсов береговой экономической подсистемой, являющейся частью эколого-экономической системы берег – море. Морская часть модели представлена адаптивным вариантом модели планктонной динамики и круговорота азота, в которой усваиваются наблюдения концентрации хлорофилла *a*. Управление объемом потребляемых биоресурсов основано на слежении за отклонениями индекса биоразнообразия морской среды от своего среднего (невозмущенного) значения, которое представлено как оценка стационарной величины биоресурсной емкости среды. Предложена интегральная модель биоресурсной емкости, контролирующая баланс скоростей потребления и воспроизводства морских биоресурсов. Уравнения модели построены методом адаптивного баланса влияний с коэффициентами влияний, выраженными через нормированные отношения средних значений переменных. Чтобы сохранить биоразнообразие морской среды, правые части уравнений содержат агенты управления сценариями эколого-экономических процессов. Эти агенты обеспечивают наложение на береговую экономическую подсистему штрафных санкций за загрязнение моря. Приведены результаты вычислительных экспериментов, подтверждающие экономическую целесообразность перевода береговой подсистемы на новые технологии, которые способствуют повышению рентабельности потребления биоресурсов и сохраняют биоресурсную емкость морской среды. Показано, что биоресурсная емкость морской среды представляет собой интегральную величину индекса биоразнообразия, определяемую на некотором интервале времени. Таким образом, для рационального использования биоресурсов прибрежной зоны моря необходимо контролировать как биоразнообразие, так и биоресурсную емкость морской среды. Эти два показателя экологического состояния прибрежной зоны моря служили критериями управления интегральной эколого-экономической системой берег – море, использованными для получения экономической выгоды от потребления морских биоресурсов при условии сохранения качества морской среды.

Ключевые слова: адаптивная модель, морская экосистема, биоразнообразие и биоресурсная емкость морской среды, штрафы за загрязнение, агенты управления, сценарии эколого-экономических процессов.

Благодарности. Работа выполнена по теме 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»).

Для цитирования: Тимченко И. Е., Игумнова Е. М. Биоразнообразие и биоресурсная емкость морской среды в адаптивной модели эколого-экономической системы берег – море // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 3. С. 223–236. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-223-236

Biodiversity and Bio-Resource Capacity of Marine Environment in the Adaptive Model of the Ecological-Economic System Coast-Sea

I. E. Timchenko*, E. M. Igumnova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

*e-mail: timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru

The adaptive model of managing consumption of marine bio-resources by the coastal economic subsystem which is a part of the ecological-economic system coast-sea is constructed. The marine part of the model is represented by the adaptive version of the plankton dynamics and nitrogen cycle model in which the chlorophyll *a* concentration observations are assimilated. Management of the consumed bio-resources volume is based on tracing the

deviations of the marine biodiversity index from its average (undisturbed) value which is represented as an estimate of the stationary value of the environment bio-resource capacity. The bio-resource capacity integral model controlling the balance between the rates of consumption and reproduction of marine bio-resources is proposed. The model equations are constructed by the method of adaptive balance of influences; at that the influence coefficients are expressed through the normalized ratios of the variables' mean values. To preserve the marine environment biodiversity, the right-hand sides of the equations contain the agents for managing the scenarios of ecological-economic processes. These agents ensure imposing fines for sea pollution caused by the coastal economic subsystem. Represented are the results of computational experiments confirming economic expediency of introducing new technologies in the coastal subsystem which, in their turn, contribute to economic efficiency of bio-resource consumption and preserve the marine environment bio-resource capacity. It is shown that the marine environment bio-resource capacity is an integral value of the biodiversity index determined for a certain time interval. Thus, in order to use rationally bio-resources of the sea coastal zone, it is necessary to control both biodiversity and bio-resource capacity of the marine environment. These two indices indicating ecological state of the sea coastal zone serve the criteria for managing the integrated ecological-economic system coast-sea which are used to derive economic benefit from consumption of marine bio-resources provided that the marine environment quality is preserved.

Keywords: adaptive model, marine ecosystem, biodiversity and bio-resource capacity of marine environment, fines for pollution, management agents, scenarios of environmental and economic processes.

For citation: Timchenko, I.E. and Igumnova, E.M., 2018. Biodiversity and bio-resource capacity of marine environment in the adaptive model of the ecological-economic system coast-sea. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(3), pp. 223-236. doi:10.22449/0233-7584-2018-3-223-236 (in Russian).

Введение. Одной из основных концепций экологической экономики является тезис о том, что устойчивое развитие экономической системы любого региона поддерживается его экосистемой [1–6]. Экологическая экономика прибрежной зоны моря [7–15] потребляет морские ресурсы, и в этом смысле экономическое развитие прибрежной зоны существенно зависит от способности морской экосистемы к возобновлению потребляемых ресурсов. Главными из них являются биологические, а также ассимиляционные ресурсы, т. е. способность моря утилизировать промышленные, сельскохозяйственные и бытовые отходы береговой социально-экономической системы приморской территории. Ресурсы морской среды имеют ограниченный объем и подвержены изменениям во времени. Поэтому необходимы количественные модели и оценки, позволяющие контролировать их динамику и прогнозировать тенденции развития.

Доступность морских биоресурсов зависит от экологического состояния морской среды, которое традиционно оценивается при помощи индекса биоразнообразия [5]. Наиболее подходящим для подобной оценки состояния морской среды может служить определение, принятое в математической биологии [16] и, в частности, в популяционной динамике [17]. Речь идет о термине “*current capacity*”, употребляемом для оценки способности экосистемы поддерживать существование определенной численности живых организмов. С точки зрения потребления морских биоресурсов береговой экономической системой целесообразно ввести подобную оценку для интегральной характеристики биоресурсной емкости морской среды.

Под биоресурсной емкостью следует понимать объем биоресурсов, доступный для использования береговой экономической системой без ущерба для экологического состояния морской среды. Изъятие в хозяйственных целях части биоресурсов уменьшает концентрации биологических объектов экосистемы, нарушает в ней равновесие биохимических реакций превращения веществ и, как следствие, понижает ее индекс биоразнообразия. Биоресурсная емкость морской среды представляет собой интегральную величину индекса биоразнообразия, определяемую на некотором интервале времени. Она имеет свое

предельно допустимое (пороговое) значение, ниже которого возникает риск неспособности экосистемы восстановить равновесные концентрации биологических объектов. Таким образом, для рационального использования биоресурсов прибрежной зоны моря необходимо контролировать как биоразнообразие, так и биоресурсную емкость морской среды. Эти два показателя экологического состояния прибрежной зоны моря служат критериями управления интегральной эколого-экономической системой берег – море для получения экономической выгоды от потребления морских биоресурсов при условии сохранения качества морской среды.

Подобная задача управления балансом потребления и воспроизводства ассимиляционных ресурсов эколого-экономической системой берег – море рассмотрена в работе [18]. Была предложена адаптивная модель управления стоком загрязняющих веществ в море на основе критериев рентабельности производства и ассимиляционной емкости морской среды по отношению к уровню загрязнения отходами производства. В рассмотренной в настоящем исследовании модификации этой модели основное внимание уделено влиянию потребления морских биоресурсов на изменение биоресурсной емкости и биоразнообразия морской среды. В качестве схемы причинно-следственных связей между процессами в морской экосистеме использован адаптивный вариант модели планктонной динамики и круговорота азота Фэшема, Даклоу и Мак-Кельви [19].

Адаптивная модель биоресурсной емкости и биоразнообразия морской среды. Адаптивные свойства модели означают автоматическую подстройку индекса биоразнообразия под изменяющиеся внешние условия с целью сохранения материального баланса биохимических реакций, формирующих концентрацию биоресурса. Для построения адаптивной динамической модели биоразнообразия воспользуемся методом адаптивного баланса влияний [6, 20]. Особенность метода заключается в использовании для всех причинно-следственных связей между процессами развития u_i системы стандартных уравнений следующего вида:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i [C_i - (u_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} u_j - A_i)] = 2r_i u_i \{C_i - [u_i - F_{u_i}(a_{ij} u_j, A_i)]\}, \quad (1)$$

$$u_i = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_{u_i}; 2C_{u_i}; u_i)], \quad (2)$$

где r_i – удельные скорости изменения процессов; C_i – их средние значения; a_{ij} – коэффициенты внутрисистемных влияний; A_i – внешние управления. Каждое уравнение этой системы содержит отрицательные обратные связи второго порядка между процессами и скоростями их изменения. Эти связи обеспечивают быструю адаптацию процессов развития друг к другу и к внешним влияниям. Для случая, когда в уравнении системы (1) имеется m положительных и $n - m$ отрицательных влияний, коэффициенты a_{ij} могут быть выражены через нормированные отношения средних значений моделируемых процессов:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \{C_i - [u_i - \frac{C_i}{2m} \sum_{j=1, j \neq i}^m C_j^{-1} u'_j + \frac{C_i}{2(n-m)} \sum_{j=m+1, j \neq i}^{n-m} C_j^{-1} u'_j - A_i]\}, \quad (3)$$

где $u'_j = u_j - C_j$.

Будем считать, что концентрация биоресурсов в морской среде пропорциональна значению индекса биоразнообразия BD , для которого используем уравнение вида (3):

$$\frac{dBD}{dt} = 2r_{BD}BD \left[C_{BD} - \left(BD - \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{BD/u_j} u'_j + a_{BD/S} S \right) \right], \quad (4)$$

$$BD = IF[BD < 0; 0; IF(BD > 2C_{BD}; 2C_{BD}; BD)],$$

где u_j – функции, представляющие концентрации живых объектов морской среды в модели экосистемы; C_{BD} – стационарное (равновесное) значение индекса биоразнообразия; а S – интегральный баланс потребления и воспроизводства биоресурсов, определяемый ниже. Выразим коэффициенты влияния через нормированные отношения средних значений переменных $a'_{ij} C_{BD}/C_j$ и будем считать, что в равновесном состоянии экосистемы, когда $u_j = C_j$, скорости потребления и воспроизводства биоресурсов равны. Тогда функция $S = 0$ и уравнение (4) принимает вид

$$\frac{dBD}{dt} = 2r_{BD}BD \left[C_{BD} - \left(BD - \sum_{j=1, i \neq j}^n a'_{ij} \frac{C_{BD}}{C_j} u'_j \right) \right]. \quad (5)$$

Так как в стационарном состоянии положительные и отрицательные влияния уравновешивают друг друга, сумма влияний в уравнении (5) обращается в нуль, и его решением становится стационарное значение индекса биоразнообразия, который мы обозначим $BD^* = C_{BD}$. Это значение удобно принять за интегральную характеристику биоресурсной емкости морской среды в стационарном состоянии. Если значение индекса биоразнообразия выше BD^* , то экосистема устойчива по отношению к изъятию части биоресурсов и к соответствующему понижению этого индекса. В противном случае биоресурсная емкость среды начинает понижаться, что грозит деградацией экосистемы.

Изменения индекса BD происходят в окрестности стационарного значения BD^* , и они зависят от концентраций живых объектов экосистемы. Но концентрации живых объектов определяются факторами, лимитирующими их существование. Положительные факторы способствуют увеличению их концентрации, обеспечивая их питание и дыхание, отрицательными факторами являются наличие хищников и загрязнение морской среды. Поэтому в уравнении (5) должно быть обеспечено лимитирование концентраций живых объектов при помощи агентов управления $AG(M_{BD}, N_{BD})$, которые учитывают только минимальные значения положительных видов ресурсов M_{BD} и только максимальные (по модулю) значения отрицательных видов ресурсов N_{BD} . В общем случае уравнение (4) для индекса биоразнообразия должно быть записано в следующем виде:

$$\frac{dBD}{dt} = 2r_{BD}BD \left\{ BD^* - \left[BD - AG(M_{BD}, N_{BD}) + a_{S_{BD}} S_{BD} \right] \right\}, \quad (6)$$

$$AG(M_{BD}, N_{BD}) = IF \left[a_{BD/u_k} > 0; M_{BD}(t); 0 \right] + IF \left[a_{BD/u_l} < 0; -N_{BD}(t); 0 \right],$$

$$k = 1, 2, \dots, m, l = m + 1, m + 2, \dots, n;$$

$$M_{BD}(t) = \arg \min \left[a_{BD/u_{m+1}} u_{m+1}(t); \dots; a_{BD/u_n} u_n(t) \right],$$

$$N_{BD}(t) = \arg \max \left[a_{BD/u_{m+1}} u_{m+1}(t); \dots; a_{BD/u_n} u_n(t) \right].$$

Тогда рост концентрации хищников, например приносимых течениями, не будет влиять на увеличение индекса биоразнообразия, а вот увеличение объемов поедания ими других видов животных понизит концентрации этих животных и, следовательно, уменьшит величину индекса биоразнообразия.

Для контроля за динамикой потребления и воспроизводства концентрации биоресурсов целесообразно использовать интегральную за период времени $(0, t)$ оценку разности между понижением индекса биоразнообразия, вызванным потреблением биоресурсов $S_{ext}(t)$, и его воспроизводством экосистемой $S_{rec}(t)$:

$$S(t) = S_{ext}(t) - S_{rec}(t) = a_{S/V} \int_0^t [1 - R(\tau)] V(\tau) d\tau. \quad (7)$$

В этом выражении принято, что потребление концентрации биоресурсов пропорционально объему морепродуктов, выпускаемых береговой экономической системой $V(\tau)$. Ее воспроизводством управляет функция (агент) биоресурсной емкости морской среды:

$$R(t) = IF \{ BD > BD^* ; 1; IF [TX_{acc} < TX_{acc}^* ; \exp(-\alpha_R \tau); R(t) + [1 - R(t)] [1 - \exp(-\beta_R \tau)]] \}. \quad (8)$$

Основанием для использования функции $R(t)$ служат следующие предположения. Восстановление изъятой из морской среды части концентрации биоресурсов возможно двумя путями. Во-первых, это происходит за счет естественных биохимических реакций, сопровождающих стремление экосистемы сохранить свое устойчивое состояние. Благодаря этому свойству скорость воспроизводства концентрации биоресурсов увеличивается до скорости их потребления. В результате интегральный баланс $S(t)$ остается равным нулю. Такое состояние экосистемы сохраняется до тех пор, пока индекс биоразнообразия экосистемы BD не опустится ниже предельно допустимого значения BD^* , когда скорость воспроизводства биоресурсов начинает отставать от скорости их потребления. Это отставание учитывает экспоненциальная функция с показателем α_R в выражении (8).

Во-вторых, управление балансом потребления и воспроизводства биоресурсов возможно путем природоохранных действий. Когда падение индекса биоразнообразия объясняется загрязнением морской среды бытовыми и производственными отходами, восстановление концентрации биоресурсов возможно за счет штрафных санкций TX , налагаемых на береговую систему. Санкции увеличивают себестоимость морепродуктов, что приводит к паде-

нию рентабельности производства, к сокращению выпуска продукции и, как следствие, к уменьшению потока загрязняющих веществ в море.

Еще одним вариантом управления объемами потребляемых биоресурсов является перевод производства на ресурсосберегающие технологии. Этот вариант предусматривает условие $TX_{acc} < TX_{acc}^*$ в агенте управления (8). Принято, что наложение штрафных санкций приводит к накоплению средств TX_{acc} в фонде новых технологий, применяемых для природоохранных действий. Когда размер фонда достигает значения TX_{acc}^* , загрязнение морской среды и потребление биоресурсов береговой социально-экономической системой существенно уменьшаются, а индекс биоразнообразия снова возрастает до значения BD^* . Этот процесс происходит с задержкой по времени, которая регулируется параметром β_R в выражении (8).

Схема причинно-следственных связей и уравнения модели эколого-экономической системы берег – море. Схема, изображенная на рис. 1, реализует рассмотренные выше основные задачи управления процессами потребления и воспроизводства морских ресурсов в модели системы берег – море. В качестве экологической части модели использована упрощенная схема планктонной динамики и круговорота азота, взятая из работы [19], в которой объектами пищевой цепи, формирующими индекс биоразнообразия в уравнении (5), служат концентрации фитопланктона P , зоопланктона Z и бактериопланктона B . В качестве химических элементов модели экосистемы использованы концентрации нитратов N_n , аммония N_a , растворенного органического вещества N_d и детрита D . Считалось, что подобная упрощенная модель является достаточной для пояснения предлагаемого принципа управления потреблением биоресурсов в системе берег – море.

Процессы, развивающиеся в экономической части модели, названы и обозначены на рис. 1. Стрелками показаны основные внутрисистемные влияния.

Главную роль играли агенты управления, принимавшие локальные решения. Агент управления производством AG_V следил за тем, чтобы себестоимость продукции E не оказалась выше ее рыночной цены P , агент наложения штрафных санкций $AG_{TX}(PL, PL^*)$ – за тем, чтобы концентрация загрязнений в морской среде PL не превышала предельно допустимое значение PL^* , агент биоразнообразия $AG_{BD}(BD, BD^*)$ следил за тем, чтобы индекс биоразнообразия не опускался ниже своего стационарного состояния BD^* , а агент биоресурсной емкости R контролировал интегральный баланс скоростей потребления и воспроизводства биоресурсов. В качестве новых (ресурсосберегающих) технологий производства был предусмотрен процесс очистки берегового стока от загрязнений. С этой целью агент очистки стока $AG_{PL}(TX_{acc}, TX_{acc}^*)$ включал природоохранные мероприятия, когда фонд новых технологий TX_{acc} достигал значения TX_{acc}^* . Таким образом, управление процессами в системе берег – море было построено на множестве обратных

связей, позволяющих устанавливать и поддерживать режим рационального потребления морских биоресурсов.

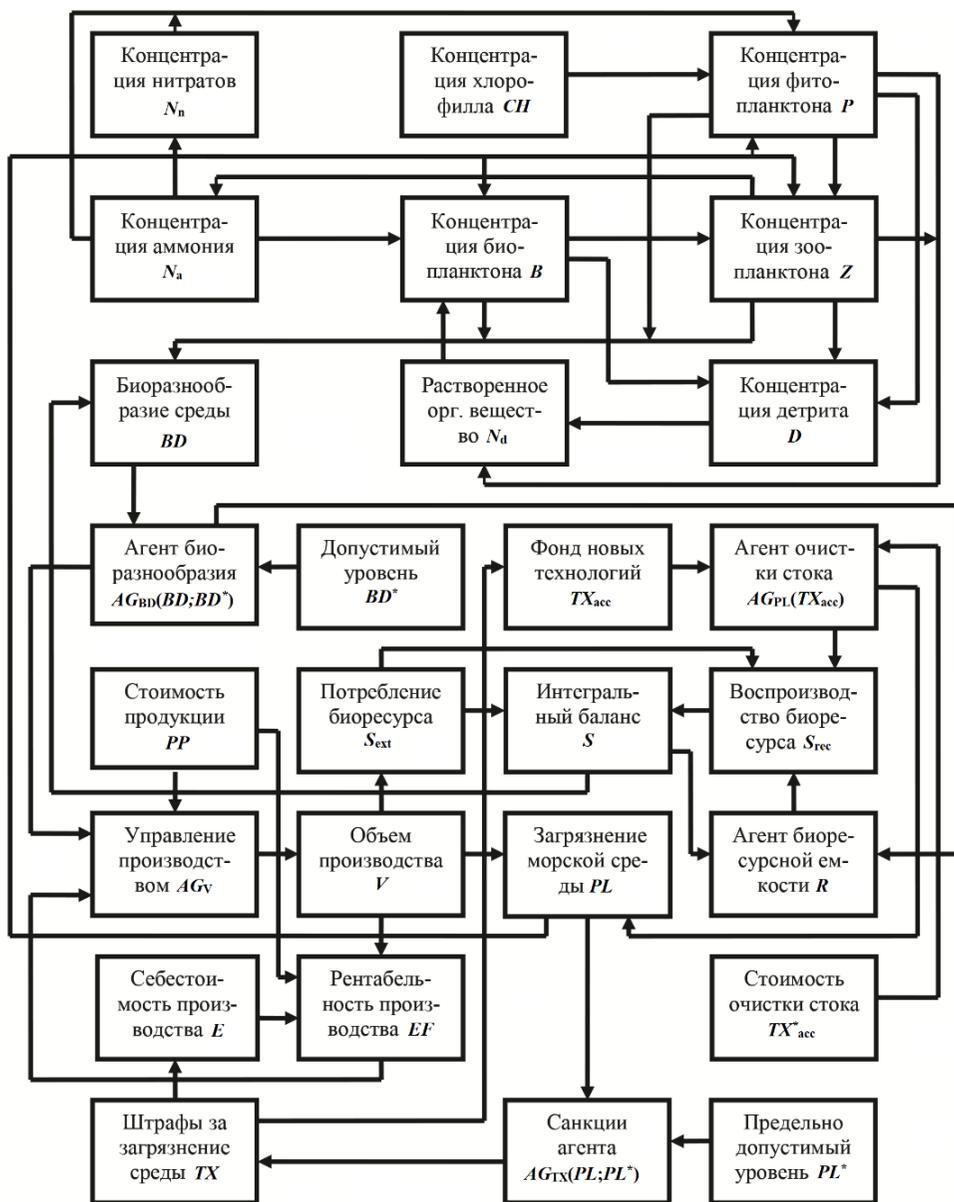


Рис. 1. Модель эколого-экономической системы берег – море
Fig. 1. Model of the ecological-economic system coast-sea

Используя обозначения причинно-следственных связей на концептуальной модели системы (рис. 1) и модульные уравнения метода адаптивного баланса влияний (1)–(2), выпишем уравнения береговой экономической подсистемы и прибрежной экосистемы. Поскольку уравнения АВС-метода имеют модуль-

ную структуру, для каждого из уравнений модели (1)–(2) достаточно выписать только функционалы влияний $F_{u_i}(a_{ij}u_j, A_i)$. Подставим в них вместо u_i, u_j соответствующие обозначения: DM – для спроса на продукцию (товары и услуги), V – для объема выпускаемой продукции, PL – для концентрации загрязнений в морской среде, TX – для штрафов за загрязнение и уменьшение индекса биоразнообразия морской среды, E – для себестоимости производства продукции. Используем также обозначения из работы [19] для концентрации: фитопланктона – P , зоопланктона – Z , бактериопланктона – B , детрита – D , аммония – N_a , нитратов – N_n и растворенного органического вещества – N_d .

Тогда получим:

$$\begin{aligned}
 F_{DM} &= a_{DM/PP}PP - (DM^* - C_{DM}); \\
 F_V &= AG_V(P, E) + AG_V(BD, BD^*) - a_{V/D}D, \\
 AG_V(P, E) &= IF\{P > E; 0; V_E^*[1 - \exp(-b_V\tau)]\}, \\
 AG_{BD}(BD, BD^*) &= IF\{BD > BD^*; 0; V_{BD}^*[1 - \exp(-b_{BD}\tau)]\}; \\
 F_{PL} &= -a_{PL/V}V + AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*), \\
 AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*) &= a_{PL/TX_{acc}} IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; 0; PL[1 - \exp(-b_{PL/TX}\tau)]\}, \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$TX_{acc}(t) = \int_0^t TX(\tau) d\tau;$$

$$\begin{aligned}
 F_{TX} &= -a_{TX/PL}PL - AG_{TX/PL}(PL, PL^*) - AG_{TX/BD}(BD, BD^*) + TX^*, \\
 AG_{TX/PL}(PL, PL^*) &= IF\{PL < PL^*; 0; a_{TX/PL}(PL - PL^*)[1 - \exp(-b_{TX/PL}\tau)]\}, \\
 AG_{TX/BD}(BD, BD^*) &= IF\{BD < BD^*; 0; a_{TX/BD}(BD^* - BD)[1 - \exp(-b_{TX/BD}\tau)]\},
 \end{aligned}$$

где TX^* – составляющая штрафных санкций, не связанная с загрязнением среды и потреблением биоресурса;

$$F_E = -a_{E/TX}TX + E^*,$$

где E^* – составляющая себестоимости, связанная с производственными расходами;

$$F_P = -a_{P/N_a}N_a - a_{P/N_n}N_n + a_{P/Z}Z - a_{P/CH}CH,$$

где через $a_{P/CH}CH$ обозначено внешнее влияние наблюдений хлорофилла a , усваиваемых в уравнении для фитопланктона и служащих внешним драйвом со стороны динамики морской среды для концентраций всех моделируемых веществ в данной экосистеме.

$$F_Z = -a_{Z/B}B - a_{Z/D}D - a_{Z/P}P;$$

$$\begin{aligned}
F_B &= -a_{B/N_a} N_a - a_{B/N_d} N_d; \\
F_D &= -a_{D/P} P - a_{D/Z} Z; \\
F_{N_a} &= a_{N_a/P} P + a_{N_a/B} B - a_{N_a/Z} Z; \\
F_{N_n} &= a_{N_n/P} P; \\
F_{N_d} &= -a_{N_d/P} P - a_{N_d/Z} Z - a_{N_d/D} D + a_{N_d/B} B; \\
F_{BD} &= AG(M_{BD}) + a_{BD/S} S.
\end{aligned} \tag{10}$$

Знаком «*» в выражениях (9)–(10) отмечены заданные константы моделируемых процессов. Экономическая рентабельность производства рассчитывалась при помощи логарифма отношения доходов экономической системы $I_{acc}(t)$ к расходам $E_{acc}(t)$, накопленным за период времени $(0, t)$:

$$I_{acc} = \int_0^t P^* V(t) dt, \quad E_{acc} = \int_0^t E(t) V(t) dt, \quad EF = \ln \frac{1 + I_{acc}}{1 + E_{acc}}. \tag{11}$$

Результаты вычислительных экспериментов по управлению процессами потребления и воспроизводством биоресурсов морской среды. Будем считать, что априори имеется минимальная информация об эколого-экономической системе: известны только средние значения ее переменных C_i , наличие внутрисистемных влияний и их знаки. Для определения коэффициентов влияний $a_{M/N}$ воспользуемся формулами из уравнений (3), в которые подставим известные средние значения C_i и отклонения от них соответствующих переменных. Запишем модель (3), (9)–(11) в конечных разностях, используя предположение, связывающее шаг вычислений по времени с удельной скоростью изменения функций, которую в целях упрощения будем полагать равной единице: $2\Delta t r_i C_i = 1$. Тогда уравнения модели в конечных разностях примут следующий общий вид:

$$\begin{aligned}
u_i^{k+1} &= 2u_i^k \left\{ 1 - \frac{1}{2C_i} [u_i^k - F_{u_i}(u_j^k, A_i^k)] \right\}; \\
u_i^k &= IF[u_i^k < 0; 0; IF(u_i^k > 2C_i; 2C_i; u_i^k)].
\end{aligned} \tag{12}$$

Как показывает опыт применения подобных уравнений [6, 8, 18, 20], итерационные алгоритмы их решения быстро сходятся к устойчивым значениям даже при использовании простейшей схемы Эйлера [21].

Для проверки предложенной схемы управления моделью эколого-экономической системы были построены сценарии процессов развития при различных значениях параметров модели. В качестве средних значений переменных экосистемы были заданы числа одного порядка из интервала $0,5-1,5 \text{ мг/м}^3$, что непринципиально с точки зрения цели моделирования, но делает удобным сравнение между собой сценариев различных процессов.

С этой же целью для сценариев экономических процессов была выбрана общая шкала изменчивости (0, 10) безразмерных единиц. Расчеты проводились на 365 безразмерных шагах по времени.

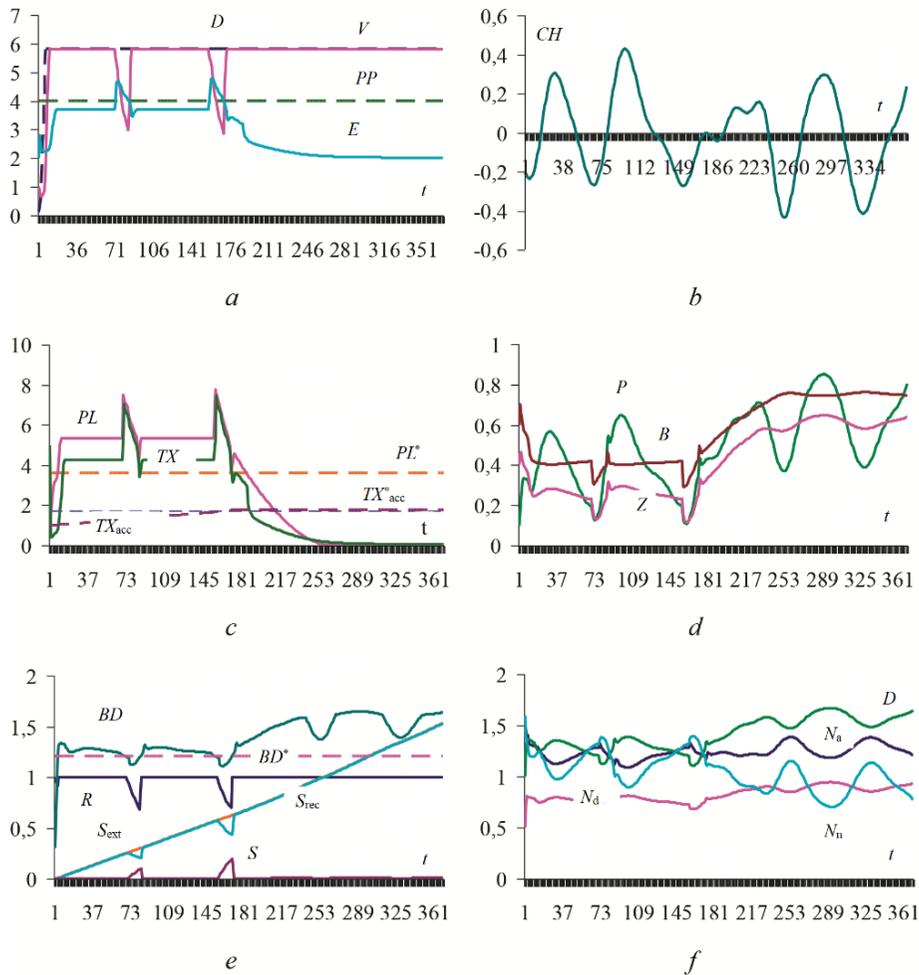


Рис. 2. Сценарии эколого-экономических процессов в системе берег – море, полученные в первом эксперименте

Fig. 2. Scenarios of the ecological-economic processes in the coast-sea system obtained in the first experiment

На рис. 2 и 3 приведены результаты двух экспериментов, выполненных в предположении, что береговая экономическая подсистема стремится удовлетворить постоянный спрос DM на выпуск морепродуктов, загрязняя морскую среду отходами своего производства, концентрация которых PL пропорциональна объему производства V . Условия развития процессов в этих экспериментах были заданы коэффициентами влияний и параметрами модели (9)–(12). Обе характеристики были одинаковыми за исключением незначительных различий в средних значениях процессов и величинах стационарной биоресурсной емкости морской среды BD^* .

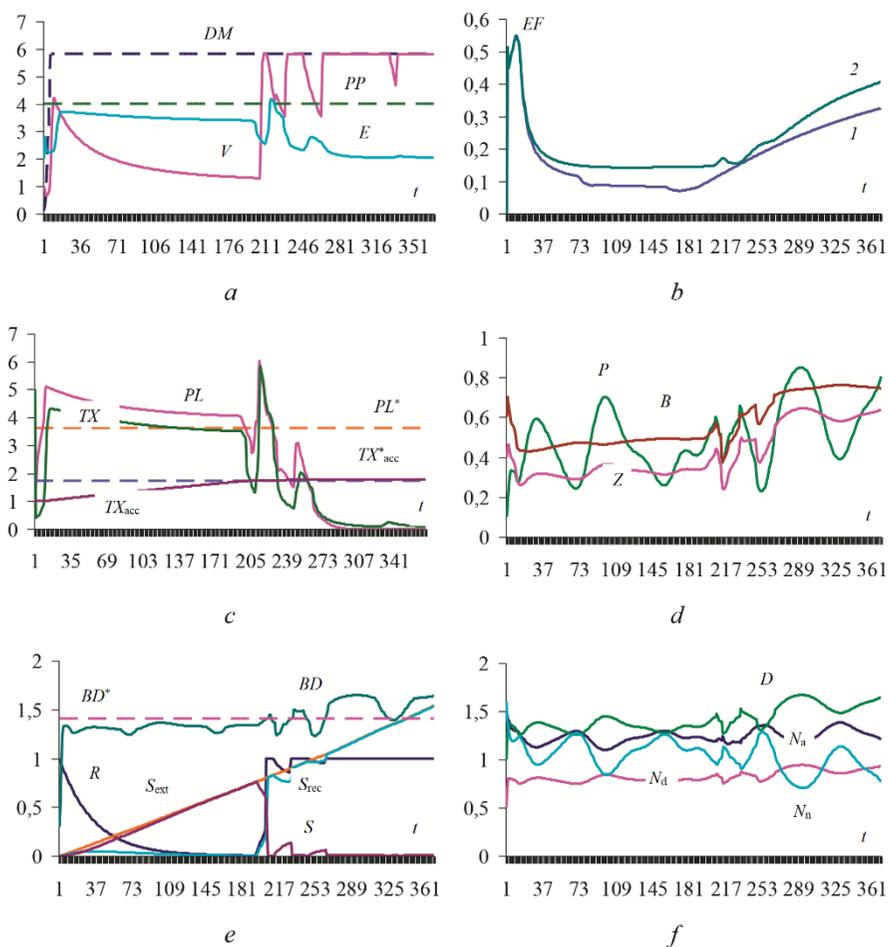


Рис. 3. Сценарии эколого-экономических процессов в системе берег – море, полученные во втором эксперименте
Fig. 3. Scenarios of the ecological-economic processes in the coast-sea system obtained in the second experiment

Рассмотрим процедуру управления системой на примере сценариев первого эксперимента, приведенных на рис. 2. В этом эксперименте параметр биоресурсной емкости BD^* был равен $1,2 \text{ мг/м}^3$. Сценарии процессов в экосистеме формировались под внешним влиянием усваиваемых в модели значений концентрации хлорофилла a , изображенным на рис. 2, b . В начале эксперимента индекс биоразнообразия BD был выше своего среднего значения (рис. 2, e), но концентрация загрязняющих веществ в море PL значительно превышала предельно допустимое значение $PL^* = 3,6$ (рис. 2, c). Это обусловило быстрый рост штрафных санкций за загрязнение (рис. 2, c) и увеличение себестоимости производства E . Однако до 70-го шага по времени производство оставалось рентабельным, так как себестоимость не превышала стоимость морепродуктов ($E < PP$). Поэтому выпуск продукции и понижение индекса биоразнообразия продолжались. С 70-го по 86-й, а затем с 155-го по 183-й

шаг вычислений индекс биоразнообразия опускался ниже своего среднего значения BD^* (рис. 2, *e*). Причиной служило понижение концентраций фитопланктона P и зоопланктона Z (рис. 2, *d*), вызванное двумя последовательными минимумами концентрации хлорофилла a (рис. 2, *b*), приходящимися на эти промежутки времени. Поскольку в уравнении (6) агент управления $AG(M_{BD})$ следил за минимальными значениями функций, формирующими индекс биоразнообразия, его сценарий в этих интервалах времени зависел от концентрации зоопланктона (рис. 2, *d*). Поэтому график сценария опустился ниже допустимого значения BD^* . Потребление биоресурсов должно было быть ограничено, и агент управления $AG_{TX/PL}(PL, PL^*)$ резко повысил штрафные санкции (рис. 2, *c*). Одновременно с этим агенты $AG_V(P, E)$ и $AG_V(BD, BD^*)$, управляющие выпуском продукции, резко уменьшили потребление биоресурсов (рис. 2, *a*).

Существенные изменения в сценариях процессов начались на 170-м шаге эксперимента, когда фонд внедрения ресурсосберегающих технологий TX_{acc} вырос до значения $TX_{acc}^* = 1,7$ и агент $AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*)$ в уравнении для концентрации загрязнений PL включил технологию очистки сточных вод (рис. 2, *c*). С этого момента времени началось падение концентрации загрязнений и концентрации биологических объектов проявили тенденцию к росту (рис. 2, *d*). Как следствие, индекс биоразнообразия экосистемы также начал расти (рис. 2, *e*), несмотря на периодические уменьшения концентрации хлорофилла a (рис. 2, *b*).

Таким образом, благодаря локальным решениям агентов управления системой берег – море, скорости потребления и воспроизводства биоресурсов, характеризуемые интегральными значениями функций S_{ext} и S_{rec} , сохранились равными практически в течение всего времени эксперимента (рис. 2, *e*). Ресурсная емкость морской среды ограничивала использование биоресурсов только в те периоды времени, когда интегральный параметр S был отличен от нуля, а сценарий агента ресурсной емкости R опускался ниже единицы (рис. 2, *e*).

Второй эксперимент был проведен для случая, когда параметр биоресурсной емкости BD^* равнялся $1,4 \text{ мг/м}^3$, а индекс биоразнообразия в начале эксперимента был ниже своего среднего значения (рис. 3, *a*). Реакция агентов управления на изменения сценариев процессов, вызванные колебаниями концентрации хлорофилла a (рис. 2, *b*), и последовательность принятия ими локальных решений были такими же, как и в первом эксперименте. Существенно иными оказались сценарии агента ресурсной емкости R и интегрального баланса потребления и воспроизводства биоресурсов S (рис. 3, *e*). Уже в начале эксперимента интегральный баланс S увеличивался вместе с ростом объема потребляемых биоресурсов, поскольку функция R экспоненциально стремилась к нулю. В этих условиях агент управления выпуском продукции был вынужден сокращать объем производства, хотя оно оставалось рентабельным (рис. 3, *a*). Условие перевода производства на ресурсосберегающие технологии $TX_{acc} >$

$> TX_{acc}^*$ было достигнуто на 200-м шаге эксперимента (рис. 3, *a*), после чего концентрация загрязнения морской среды стала резко убывать (рис. 3, *в*), а сценарии концентраций биологических объектов экосистемы получили тенденции роста (рис. 3, *d*). В результате индекс биоразнообразия с некоторыми колебаниями начал подниматься выше своего среднего значения (рис. 3, *e*), а выпуск продукции стал возрастать до уровня спроса (рис. 3, *a*).

Сравнение результатов двух экспериментов показало существенную зависимость динамики биоресурсной емкости от уровня загрязнения морской среды и от скорости восстановления концентрации биоресурсов. Управление потреблением биоресурсов обеспечило во втором эксперименте более высокую рентабельность производства, поскольку снижение потребления биоресурсов в первой половине эксперимента повлекло снижение загрязнения морской среды, уменьшение штрафов и себестоимости производства (рис. 3, *b*).

Заключение. Вычислительные эксперименты с адаптивной моделью эколого-экономической системы берег – море подтвердили правильность выбранной схемы управления процессами потребления морских биоресурсов, основанной на контроле над уровнем биоразнообразия морской среды. Предложенная концепция биоресурсной емкости морской среды интегрально учитывает динамику индекса биоразнообразия. Она позволяет эффективно использовать логические агенты управления, ограничивающие рентабельность производства, а следовательно, и объемы потребления биоресурсов в тех случаях, когда скорость изъятия их из морской среды начинает опережать скорость их воспроизводства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daly H., Farley J.* Ecological Economics: Principles and Applications. Washington, DC : Island Press, 2010. 544 p.
2. *Voinov A.* Systems science and modeling for ecological economics. New York : Academic Press, 2008. 430 p.
3. *Shogren J. F., Parkhurst G. M., Settle C.* Integrating economics and ecology to protect nature on private lands: models, methods, and mindsets // Environ. Sci. Policy. 2003. Vol. 6, iss. 3. P. 233–242. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(03\)00041-8](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(03)00041-8)
4. *Crépin A.-S., Norberg J., Mäler K.-G.* Coupled economic-ecological systems with slow and fast dynamics – modelling and analysis method // Ecol. Economics. 2011. Vol. 70, iss. 8. P. 1448–1458. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.02.004>
5. *Pearce D., Moran D.* The economic value of biodiversity. London : Earthscan, 1994. 172 p. URL: <https://is.gd/S3Wb9Y> (дата обращения: 30.04.2018).
6. *Timchenko I. E., Igunnova E. M., Timchenko I. I.* Adaptive balance models for environmental-economic systems. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. 486 p.
7. Научное обоснование экологического нормирования антропогенного воздействия на морскую экосистему (на примере Балтийского моря) / Ю. А. Израэль [и др.] // Океанология. 1988. Т. 28, вып. 2. С. 293–299.
8. *Ivanov V. A., Igunnova E. M., Timchenko I. E.* Coastal zone resources management. К. : Academperiodika. 2012. 304 pp.
9. *Ofiara D. D., Seneca J. J.* Economic losses from marine pollution: A handbook for assessment. Washington, DC : Island Press, 2001. 320 p.

10. Integrated ecological economic modeling of the Patuxent River watershed, Maryland / R. Costanza [et al.] // *Ecological Monographs*. 2002. Vol. 72, iss. 2. P. 203–231. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2002\)072\[0203:IEEMOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2002)072[0203:IEEMOT]2.0.CO;2)
11. *Samhouri J. F., Levin P. S.* Linking land- and sea-based activities to risk in coastal ecosystems // *Biol. Conserv.* 2012. Vol. 145, iss. 1. P. 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.10.021>
12. A global map of human impact on marine ecosystems / B. S. Halpern [et al.] // *Science*. 2008. Vol. 319, iss. 5865. P. 948–952. doi:10.1126/science.1149345
13. *Elofsson K., Folmer H., Grey I.-M.* Management of eutrophicated coastal ecosystems: a synopsis of the literature with emphasis on theory and methodology // *Ecological Economics*. 2003. Vol 47, iss. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.09.001>
14. *McCay B. J., Jones P. J. S.* Marine protected areas and the governance of marine ecosystems and fisheries // *Conserv. Biol.* 2011. Vol. 25, iss. 6. P. 1130–1133. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01771.x>
15. Incorporating ecosystem services in marine planning: The role of valuation / T. Börger [et al.] // *Mar. Policy*. 2014. Vol. 46. P. 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.01.019>
16. *Murray J. D.* *Mathematical biology II: Spatial models and biomedical applications*. N.-Y. : Springer, 2008. 736 p.
17. *Sharov A. A.* The Life-system approach: a system paradigm in population ecology // *Oikos*. 1992. Vol. 63, no. 3. P. 485–494. doi:10.2307/3544976
18. *Тимченко И. Е., Иващенко И. К., Игумнова Е. М.* Управление эколого-экономическими процессами накопления и ассимиляции загрязнений в прибрежной морской среде // *Морской гидрофизический журнал*. 2017. № 1. С. 72–88. doi:10.22449/0233-7584-2017-1-72-88
19. *Fasham M. J. R., Ducklow H. W., McKelvie S. M.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer // *J. Mar. Res.* 1990. Vol. 48, no. 3. P. 591–639. <https://doi.org/10.1357/002224090784984678>
20. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И.* Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. 225 с.
21. *Самарский А. А., Гулин А. В.* Численные методы. М. : Наука, 1989. 429 с. URL: <http://bookre.org/reader?file=445121> (дата обращения: 30.04.2018).

Об авторах:

Тимченко Игорь Евгеньевич, заведующий отделом системного анализа, ФГБУН МГИ (Россия, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2), доктор физико-математических наук, профессор, Researcher ID: A-8650-2017, timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru

Игумнова Екатерина Михайловна, ведущий инженер отдела оптики и биофизики моря, ФГБУН МГИ (Россия, 299011, Севастополь, ул. Капитанская, 2)