

Интегральная модель эколого-экономической системы управления береговым стоком загрязнений в морскую бухту

И. Е. Тимченко*, И. К. Иващенко, Е. М. Игумнова, С. В. Свищев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Поступила в редакцию 30.07.2019 г., после доработки – 23.12.2019 г.

Цель. Цель статьи – описать усовершенствованную интегральную модель эколого-экономической системы берег – бухта, позволяющую контролировать баланс скоростей накопления и деструкции загрязняющих веществ, поступающих в море с береговым стоком.

Методы и результаты. Модель основана на концепции взаимной адаптации отклонений моделируемых процессов от их стационарных значений под действием внешних влияний. В качестве стационарного состояния системы использованы средние многолетние значения моделируемых процессов. Предложена схема причинно-следственных связей между развитием биохимических процессов в морской экосистеме и экономическими процессами потребления и воспроизводства морских биологических и ассимиляционных ресурсов. Схема содержала логические агенты управления сценариями этих процессов по критериям уровня загрязнения и биоразнообразия морской среды. Динамическая модель системы построена методом адаптивного баланса влияний, в котором для оценки коэффициентов влияний применен новый метод нормированных отношений стационарных средних значений. В оценках коэффициентов использованы текущие значения моделируемых процессов. Для проверки адекватности модельных сценариев реальным процессам проведены вычислительные эксперименты с моделью эколого-экономической системы береговой сток – экосистема Севастопольской бухты. В этой модели использованы полученные по данным наблюдений средние многолетние значения концентраций фито-, зоо- и бактериопланктона, а также нитратов, аммония, растворенного органического вещества и детрита.

Выводы. Результаты экспериментов подтвердили возможность управления прогнозируемыми сценариями эколого-экономических процессов в соответствии с заложенными в модель концепциями управления. Показана реакция сценариев на различные варианты внешних управляющих воздействий, что делает подобные модели удобным инструментом планирования природоохранных действий в системах берег – бухта.

Ключевые слова: адаптивная модель, эколого-экономическая система, индекс биоразнообразия, индекс уровня загрязнения, рентабельность, агенты управления, Севастопольская бухта.

Благодарности: постановка исследований ресурсного потенциала прибрежной зоны выполнена по теме: 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей». Разработка модели управления процессами в системе берег – Севастопольская бухта и вычислительные эксперименты проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Севастополя по научному проекту № 18-47-920001 «Исследование принципов построения адаптивных моделей эколого-экономических систем и цифровых информационных технологий для управления сценариями устойчивого развития природно-хозяйственных комплексов Севастопольского региона».

Для цитирования: Интегральная модель эколого-экономической системы управления береговым стоком загрязнений в морскую бухту / И. Е. Тимченко [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2020. Т. 36, № 3. С. 329–341. doi:10.22449/0233-7584-2020-3-329-341

© Тимченко И. Е., Иващенко И. К., Игумнова Е. М., Свищев С. В., 2020

Integrated Model of the Ecological-Economic System for Managing the Coastal Pollution Inflow to the Sea Bay

I. E. Timchenko*, I. K. Ivashchenko, E. M. Igumnova, S. V. Svishchev

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

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

Purpose. The paper is aimed at describing the improved integrated model of the ecological-economic system "coast-bay" permitting to control the balance of rates of accumulation and destruction of the pollutants entering the sea with coastal runoff.

Methods and Results. The model is based on the concept of mutual adaptation of the simulated processes' deviations from their standard values under the influence of external forces. The average multi-year values of the simulated processes are used as a stationary state of the system. The scheme of the cause-effect relationships between the development of the biochemical processes in the marine ecosystem and the economic processes of consumption and reproduction of the marine biological and assimilation resources is proposed. The scheme contains the logical agents for managing the scenarios of these processes based on the criteria of the pollution and biodiversity levels of the marine environment. The system dynamic model was constructed using the method of adaptive balance of causes in which, in order to assess the influence coefficients, a new presentation of the normalized relations of the standard mean values is used. The current values of the simulated processes are used in the coefficient estimates. To test correspondence of the model scenarios to real processes, the computational experiments including the model of the ecological-economic system "coastal runoff-the Sevastopol Bay ecosystem" were performed. The observations-derived average multi-year values of phyto-, zoo-, bacterio-plankton, nitrates, ammonium, dissolved organic matter and detritus concentrations were used in the model.

Conclusions. The results of the experiments confirmed possibility of managing the forecasted scenarios of the ecological and economic processes in accordance with the management concepts embedded in the model. The scenarios' response to different variants of the external managing actions is shown, that makes such models a convenient tool for planning the nature-protection measures within the "coast-bay" systems.

Keywords: adaptive model, ecological-economic system, biodiversity index, pollution level index, profitability, management agents, Sevastopol Bay.

Acknowledgements: resource potential of the coastal zone was investigated within the framework of the state task on theme No. 0827-2018-0004 "Complex interdisciplinary investigations of the oceanologic processes conditioning functioning and evolution of the Black and Azov seas' ecosystems of coastal zones". The model for managing the processes in the system "coast-the Sevastopol Bay" was developed and the computational experiments were performed at the RFBR and Sevastopol government financial support within the framework of scientific project No. 18-47-920001 "Study of the principles for constructing adaptive models of the ecological-economic systems and digital information technologies for managing the scenarios of sustainable development of the nature-economic complexes in the Sevastopol region".

For citation: Timchenko, I.E., Ivashchenko, I.K., Igumnova, E.M. and Svishchev, S.V., 2020. Integrated Model of the Ecological-Economic System for Managing the Coastal Pollution Inflow to the Sea Bay. *Physical Oceanography*, [e-journal] 27(3), pp. 305-316. doi:10.22449/1573-160X-2020-3-305-316

Введение. Одной из проблем экологической экономики прибрежной зоны моря является контроль над уровнем загрязнения и биологического разнообразия морской среды, находящихся под воздействием поступающих с берега отходов бытового, промышленного и сельскохозяйственного происхождения [1–17]. В работах [6, 8, 18–21] предложена концепция управления потоком загрязненных сточных вод по интегральным индексам загрязнения, биоразнообразия и экономической целесообразности сброса этих вод в море

с учетом штрафных санкций, налагаемых за загрязнение. На основе этой концепции методом адаптивного баланса влияний [19] была создана адаптивная модель эколого-экономической системы природно-хозяйственного комплекса берег – море, позволяющая контролировать интегральный баланс скоростей поступления и деструкции в море загрязняющих веществ. Предполагалось, что ассимиляционная емкость морской экосистемы определяется интенсивностью процессов биохимического разложения вредных веществ, которая зависит от ряда природных и антропогенных факторов: характера и объемов поступлений бытовых, речных и дождевых стоков, температуры моря, динамической активности водных масс и др. [7–16, 22].

В зависимости от характера берегового стока каждый участок прибрежной зоны представляет собой отдельный природно-хозяйственный комплекс типа берег – море, имеющий свои особенности. Примером подобного комплекса служит эколого-экономическая система берег – Севастопольская бухта, относящаяся к наиболее загрязненным участкам прибрежной зоны. Несмотря на различие условий накопления и деструкции загрязнений, для всех природных комплексов прибрежной зоны может быть предложена общая интегральная модель управления потоками загрязняющих веществ, основанная на принципах экологического контроля.

Цель. Настоящее исследование посвящено усовершенствованию интегральной модели управления экологическим состоянием морской бухты [20]. Представленная модель основана на идее управления балансом двух взаимосвязанных индексов состояния морской среды: уровня загрязнения и уровня биоразнообразия. Предложен метод контроля за этими индексами по степени их отклонения от предельно допустимых значений, характеризующих пределы устойчивости морской экосистемы. Использован новый метод оценки коэффициентов влияний в адаптивной модели эколого-экономической системы.

Предлагаемая модель управления ассимиляционной емкостью бухты основана на ряде предположений. Задача управления заключалась в наблюдении за интегральным балансом потребления и воспроизводства двух основных видов ресурсов морской среды: биологических и ассимиляционных. В качестве биологического ресурса рассмотрена взвешенная сумма концентраций биологических объектов, составляющих, по данным многолетних наблюдений, основу пищевой цепи морской экосистемы бухты. Этот вид ресурса представлен индексом биоразнообразия BD . Считалось, что благодаря переносу и диффузии водных масс существует осредненная по объему бухты концентрация веществ, формирующая интегральный индекс уровня загрязнения PL , который зависит от интенсивности и продолжительности берегового стока загрязнений. Ассимиляционный ресурс определялся интегральным балансом S объемов поступивших в море загрязнений $PL_{асс}$ и той их части, которая была нейтрализована за определенный отрезок времени $(0, t)$ путем биохимической деструкции. Интегральный баланс характеризовал различие в скоростях поступления и деструкции загрязнений. Предполагалось, что с ростом этого различия увеличивалась концентрация загрязнений PL и уменьшалась величина индекса биоразнообразия BD . Была поставлена задача ограничения потока поступающих в море загрязняющих веществ путем

наложения на береговую социально-экономическую систему штрафных санкций TX , которые удорожают ее функционирование, так как заставляют ее инвестировать дополнительные средства в очистные сооружения для поддержания объемов производства V .

Материалы и методы. Для построения формальной математической модели управления сформулирована концепция адаптивного баланса процессов развития в системе. Концепция предполагала, что известны средние многолетние значения всех моделируемых процессов u_i , которые были приняты за вектор стационарного состояния системы C_i . Модель управления контролировала динамику уровня биоразнообразия $BD' = BD - C_{BD}$, меняющегося в окрестности стационарного значения индекса биоразнообразия C_{BD} , и уровня загрязнения $PL' = PL - C_{PL}$, меняющегося в окрестности стационарного значения C_{PL} . Оба индекса характеризовали ассимиляционную емкость морской среды: они принимали свои предельно допустимые значения BD^* и PL^* , когда равенство возможных скоростей накопления и деструкции загрязнений достигало своего максимума, зависевшего от объемов и характера берегового стока, а также от динамики и экологического состояния морской среды.

Все процессы в системе берег – бухта считались адаптивными, поскольку предполагалось, что система обладает определенной устойчивостью: она возвращалась в свое стационарное состояние, когда внешние причины, выводящие ее из этого состояния, прекращали свое действие. Это предположение позволило применить для построения формальной модели системы метод адаптивного баланса влияний (*ABC-method* [6, 20]), в котором отрицательные обратные связи между процессами u_i и скоростями их изменения заложены в структуры уравнений метода и обеспечивают динамическую подстройку процессов друг к другу и к внешним влияниям. При этом в каждом из уравнений сохранялись материальные балансы реакций взаимодействия веществ:

$$u_i = C_i + \sum_{k=1}^m a_{ik}(u_k - C_k) - \sum_{l=1}^{n-m} a_{il}(u_l - C_l) - A_i, \quad (1)$$

где a_{ik} и a_{il} – коэффициенты положительных и отрицательных влияний, которые учитывали внутрисистемные взаимодействия процессов развития; A_i – внешние влияния.

Система уравнений метода, сохраняющих материальные балансы (1), имела вид

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \sum_{k=1}^m a_{ik}(u_k - C_k) + \sum_{l=1}^{n-m} a_{il}(u_l - C_l) - A_i \right] \right\}; \quad (2)$$

$$u_i' = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)]. \quad (3)$$

где r_i – удельные скорости изменения функций u_i ; n – количество моделируемых процессов; m – количество положительных влияний. Условия (3) кон-

тролировали нахождение решений уравнений модели в пределах интервалов изменчивости переменных ($0 \leq u_i \leq 2C_i$).

Рассмотрим процессы в эколого-экономической системе берег – бухта (показатели экономической активности береговой системы и концентрации веществ в море) как реакции преобразования ресурсов системы в ее продукты. Поскольку количество продукта складывается в результате положительных и отрицательных приращений его массы, положительные влияния процессов друг на друга вызывают положительные приращения массы продуктов, а отрицательные влияния – отрицательные приращения. В данной работе для оценки коэффициентов влияний использован метод, который учитывает относительный вес меняющихся во времени влияний. Все влияния рассматривались как текущие вклады ресурсов $u'_j = u_j - C_j$ в формирование продукта u_i . Поэтому для всех ресурсных переменных, приведенных к размерности продукта путем умножения на отношение средних значений $C_i C_j^{-1}$, были введены текущие относительные веса влияний. Например, для случая двух положительных влияний, подчиненных условию сохранения материального баланса:

$$u_1 = C_1 + a_{12} C_1 C_2^{-1} u'_2 + a_{13} C_1 C_3^{-1} u'_3,$$

текущие коэффициенты относительных влияний имели вид

$$a_{12} = \frac{C_2^{-1} u_2}{C_2^{-1} u_2 + C_3^{-1} u_3}; \quad a_{13} = \frac{C_3^{-1} u_3}{C_2^{-1} u_2 + C_3^{-1} u_3}.$$

Таким образом, коэффициент влияния a_{ij} в случае m влияний мог быть записан следующим образом:

$$a_{ij} = C_j^{-1} u_j \left(\sum_{j=1, j \neq i}^m C_j^{-1} u_j \right)^{-1}. \quad (4)$$

Заметим, что в выражениях для нормированных коэффициентов влияний были использованы не отклонения переменных от средних значений, а сами неотрицательные переменные, что исключало обращение в нуль знаменателей этих коэффициентов.

С учетом предложенных оценок коэффициентов влияний система уравнений адаптивной модели (2) для m положительных и $n - m$ отрицательных влияний была модифицирована следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} = & 2r_i u_i \{ C_i - [u_i - \sum_{k=1, k \neq i}^m C_k^{-1} u_k (\sum_{k=1, k \neq i}^m C_k^{-1} u_k)^{-1} C_i C_k^{-1} u'_k + \\ & + \sum_{l=m+1, l \neq i}^n C_l^{-1} u_l (\sum_{l=m+1, l \neq i}^n C_l^{-1} u_l)^{-1} C_i C_l^{-1} u'_l - A_i] \}. \end{aligned} \quad (5)$$

Анализ результатов. Представим, что береговая социально-экономическая система поставляет в морскую среду бухты постоянный по величине поток загрязняющих веществ, обусловленный объемом производства V . Допустим, что в начальный момент времени морская среда находилась в стационарном экологическом состоянии, при котором баланс накопленных объемов поступивших и ассимилированных средой загрязнений, обозначенный $S(t)$, оставался равным нулю. Это означает, что скорости поступления загрязнений и их деструкции были равны. При увеличении потока загрязнений наступал момент времени, когда скорость их деструкции начинала отставать от скорости их поступления и возникал дисбаланс объемов поступивших и ассимилированных загрязнений. Выше мы обозначили значение индекса биоразнообразия при предельно возможной скорости ассимиляции загрязнений как BD^* , а соответствующее предельно допустимое значение концентрации загрязнений – как PL^* . Начиная с этого момента времени, система управления модели берег – морская бухта должна была ограничить скорость поступления загрязняющих веществ в море, чтобы восстановить нулевой баланс $S(t)$.

Для контроля интегрального баланса скоростей поступления и ассимиляции загрязнений в модели управления был использован логический агент ассимиляционной емкости $R(t)$, который реагировал на превышение индексом уровня загрязнения PL значения PL^* , что соответствовало понижению уровня биоразнообразия до значения $BD < BD^*$. Предполагалось также, что максимальное значение концентрации загрязнений составляло величину $2C_{PL} > PL^*$. Таким образом, система берег – морская бухта при предельно допустимых значениях концентраций загрязнения и биоразнообразия находилась на верхней грани возможных стационарных состояний.

Введенные допущения позволили выразить баланс объемов загрязнений, поступивших и ассимилированных морской средой, формулой

$$S(t) = a_{PL/V} \int_0^t [1 - R(\tau)] V(\tau) d\tau, \quad 0 \leq R(t) \leq 1, \quad (6)$$

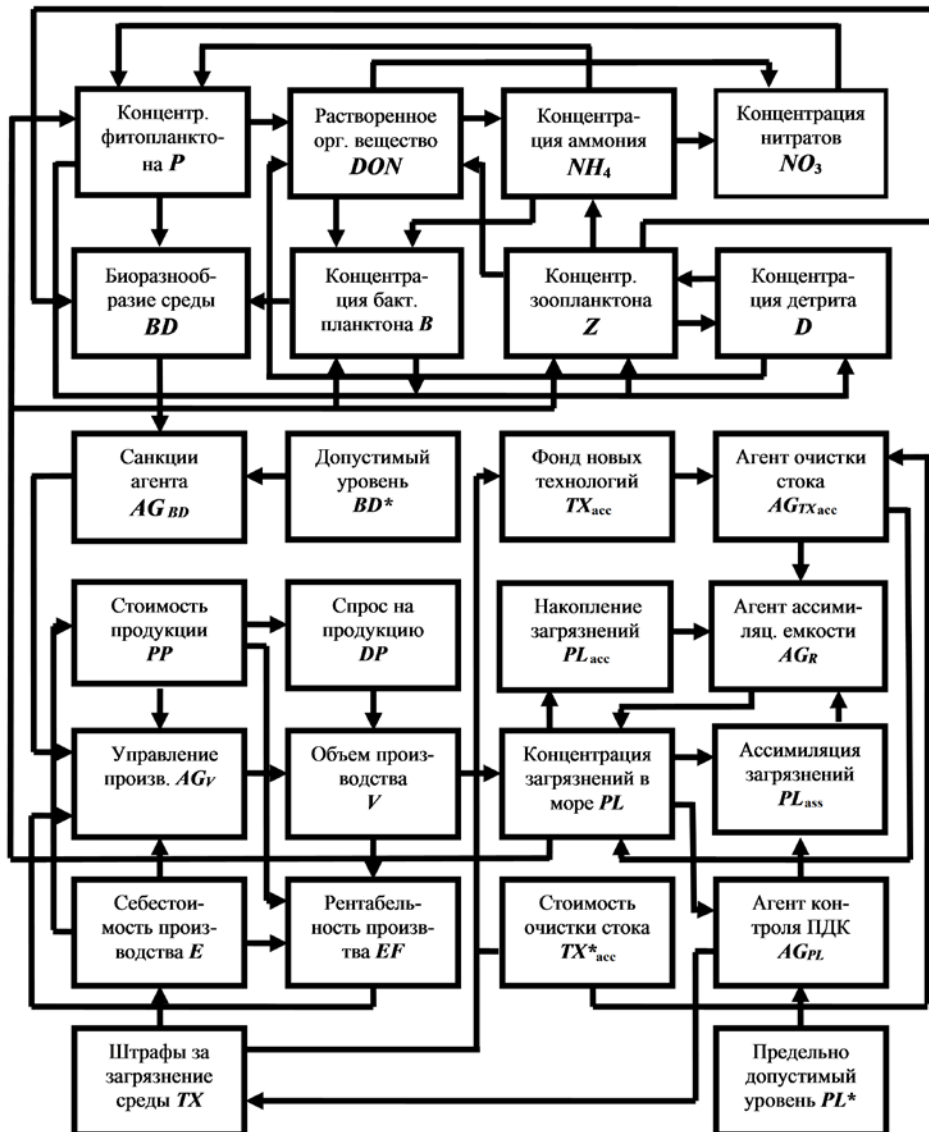
в которой агент ассимиляционной емкости $R(t)$ имел следующее представление:

$$R(t) = IF \left\{ PL < PL^*; 1; IF \left[TX_{acc} < TX_{acc}^*; \exp(-\alpha_R \tau); 1 + (R(t) - 1) \exp(-\beta_R \tau) \right] \right\}, \quad (7)$$

где $a_{PL/V} V$ – текущий объем сбрасываемых загрязнений; TX_{acc} – имеющийся объем средств экономической системы, накопленных для борьбы с загрязнением морской среды; TX_{acc}^* – необходимый объем этих средств.

Для управления экологическим состоянием бухты была предложена схема причинно-следственных связей между процессами производства обобщенного продукта в береговой социально-экономической системе и биохимическими процессами, развивающимися в прибрежной морской экосистеме (рис. 1). С ростом выпуска продукции увеличивался уровень загрязнения моря и изменялся интегральный баланс объемов накопления и деструкции за-

грязнений. Это влекло за собой понижение индекса биоразнообразия BD и отклонение его от предельно допустимого значения BD^* , характеризующего биоресурсную, а следовательно, и ассимиляционную емкость морской среды. Отрицательные значения разности $BD - BD^*$ служили сигналом для системы управления, которая через агентов биоразнообразия AG_{BD} и управления производством AG_V ограничивала объемы стока загрязняющих веществ в бухту.



Р и с. 1. Эколого-экономическая модель управления береговым стоком загрязнений
 F I g. 1. Ecological-economic model for managing the coastal pollution runoff

В основу формальной модели эколого-экономической системы берег – бухта была положена адаптивная модель управления, опубликованная в ряде статей [18, 20]. Отличие данной модели состояло в том, что в ней была применена рассмотренная выше новая схема оценки коэффициентов влияний по отношению средних значений моделируемых процессов. Поэтому схема взаимных влияний, изображенная на рис. 1, позволила построить материальные балансы (1) для всех переменных системы берег – бухта. В качестве элементов морской экосистемы, по аналогии с работой [17], были использованы концентрации фитопланктона PP , зоопланктона ZP , бактериопланктона B , нитратов NO_3 , аммония NH_4 , растворенного органического вещества DON и детрита D . Динамическая модель экосистемы бухты была построена на уравнениях (5), в которых отмеченные штрихами отклонения переменных считались нормированными на соответствующие средние значения, а коэффициенты влияний вычислялись по формулам (4):

$$\begin{aligned} \frac{dPP}{dt} &= 2r_{PP}PP\{C_{PP} - [PP - C_{PP}(a_{14}NO_3' + a_{15}NH_4' - a_{16}DON' - a_{12}Z' - \\ &- a_{17}D' - a_{18}PL')]\}, \\ \frac{dZ}{dt} &= 2r_ZZ\{C_Z - [Z - C_Z(a_{21}P' + a_{23}B' - a_{25}NH_4' - a_{26}DON' - a_{28}PL')]\}, \\ \frac{dB}{dt} &= 2r_BB\{C_B - [B - C_B(a_{36}DON' - a_{32}Z' - a_{35}NH_4' - a_{38}PL')]\}, \\ \frac{dNO_3}{dt} &= 2r_{NO_3}NO_3\{C_{NO_3} - [NO_3 - C_{NO_3}(a_{45}NH_4' + a_{46}DON' - a_{41}P')]\}, \\ \frac{dNH_4}{dt} &= 2r_{NH_4}NH_4\{C_{NH_4} - [NH_4 - C_{NH_4}(a_{52}Z' + a_{53}B' + a_{56}DON' - \\ &- a_{51}P' - a_{54}NO_3')]\}, \\ \frac{dDON}{dt} &= 2r_{DON}DON\{C_{DON} - [DON - C_{DON}(a_{61}P' + a_{62}Z' + a_{67}D' - a_{63}B' - \\ &- a_{64}NO_3' - a_{65}NH_4')]\}, \\ \frac{dD}{dt} &= 2r_DD\{C_D - [D - C_D(a_{71}P' + a_{72}Z' - a_{76}DON')]\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Эта система уравнений была дополнена уравнениями для концентрации загрязнений

$$\frac{dPL}{dt} = 2r_{PL}PL\{C_{PL} - [PL - C_{PL}(a_{PL/V}V' - AG[TX_{acc}, TX_{acc}^*])]\}, \quad (9)$$

которые влияли на биологические переменные экосистемы, а также уравнением для индекса биоразнообразия

$$\frac{dBD}{dt} = 2r_{BD}BD\{C_{BD} - [BD - AG_{BD}(PP, ZP, B)]\}; \quad (10)$$

$$AG_{BD}(PP, ZP, B) = C_{BD} \arg \min(C_{PP}^{-1}PP; C_{ZP}^{-1}ZP; C_B^{-1}B).$$

Следует отметить, что агент индекса биоразнообразия $AG_{BD}(PP, ZP, B)$ контролировал значение этого индекса по тому из видов живых организмов экосистемы, который в данный момент времени имел наименьшую концентрацию по сравнению с другими организмами. Поэтому увеличение концентрации одного из видов не означало увеличение индекса биоразнообразия, если только этот вид не являлся лимитирующим для индекса.

Экономическая часть модели береговой сток – морская бухта включала в себя уравнение для спроса на обобщенный продукт береговой системы DP

$$\frac{dDP}{dt} = 2r_{DP}DP[C_{DP} - (DP + a_{DP/PP}PP')] \quad (11)$$

и уравнение для себестоимости производства E

$$\frac{dE}{dt} = 2r_E E[C_E - (E - a_{E/TX}TX' - E^*)]. \quad (12)$$

В уравнение для объемов производства продукта V

$$\frac{dV}{dt} = 2r_V V\{C_V - [V - a_{V/DP}DP' + AG_V(P, E) + AG_V(BD, BD^*)]\} \quad (13)$$

были включены агенты управления рентабельностью производства

$$AG_V(P, E) = IF\{P > E; 0; C_V[1 - \exp(-\alpha_{V/P}\tau)]\}$$

и уровнем биоразнообразия морской среды

$$AG_V(BD, BD^*) = IF\{BD > BD^*; 0; C_V[1 - \exp(-\alpha_{V/BD}\tau)]\}.$$

Для оценки рентабельности была применена интегральная оценка EF в виде логарифма отношения доходов системы I_{acc} за период времени $(0, t)$ к расходам E_{acc} за этот же период:

$$I_{acc} = \int_0^t P(t)V(t)dt, \quad E_{acc} = \int_0^t E(t)V(t)dt, \quad EF = \ln \frac{1 + I_{acc}}{1 + E_{acc}}. \quad (14)$$

Управление рентабельностью осуществлялось посредством штрафных санкций TX за загрязнение морской среды, которые рассчитывались по уравнению

$$\frac{dTX}{dt} = 2r_{TX}TX\{C_{TX} - [TX - a_{TX/PL}AG_{TX/PL}(PL, PL^*)]\}. \quad (15)$$

Агент управления $AG_{TX/PL}(PL, PL^*)$ устанавливал размер штрафа пропорционально величине концентрации загрязнения, пока она не превышала

предельно допустимое значение PL^* . В противном случае штраф возрастал экспоненциально до удвоенного значения PL^* :

$$AG_{TX/PL}(PL, PL^*) = IF\{PL < PL^*, PL; 2PL^*[1 - \exp(-\gamma_{TX}\tau)]\}. \quad (16)$$

Предполагалось, что штрафные санкции накапливаются в специальном фонде новых технологий TX_{acc} , предназначенном для очистки берегового стока от загрязнений. С этой целью в модели управления был предусмотрен агент, который включал в уравнении (9) режим очистки стока, когда размер фонда достигал значения TX_{acc}^* :

$$AG(TX_{acc}, TX_{acc}^*) = IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; 0; C_{PL}[1 - \exp(-\delta\tau)]\}. \quad (17)$$

Начальными условиями для построения сценариев эколого-экономических процессов служили средние многолетние значения всех переменных, которые предполагались известными из наблюдений. Каждое из уравнений модели было дополнено условиями (3), контролировавшими нахождение переменных в пределах их областей определения.

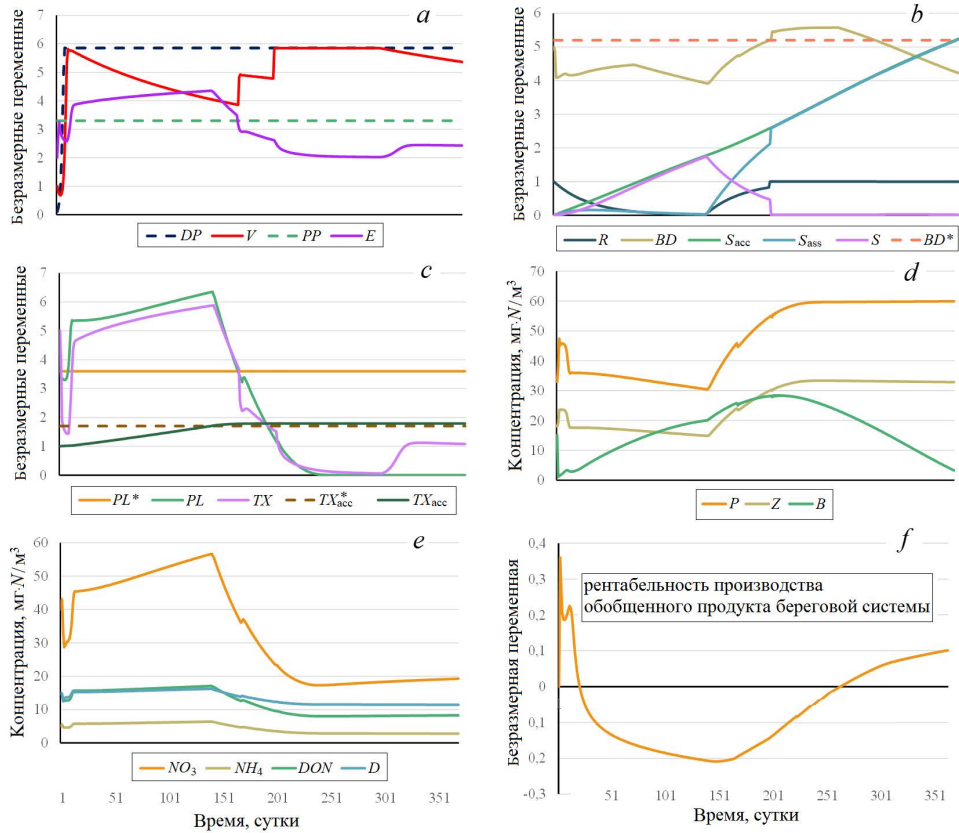
Обсуждение и заключение. Для тестирования модели были использованы материалы наблюдений в системе береговой сток – Севастопольская бухта. Непосредственно в прибрежной зоне Севастополя расположены судостроительные и судоремонтные предприятия, предприятия пищевой промышленности, нефтебазы, ТЭЦ, предприятие «Крымвтормет», инфраструктуры военного, рыбного и грузопассажирского портов, воинские части. Как показано в работе [16], ежегодный сброс сточных вод в Севастопольскую бухту оценивается в 2 млн м³, аварийные выпуски и ливневые стоки составляют еще около 1,5 млн м³. С водами р. Черной в бухту ежегодно поступает не менее 1000 т взвешенных веществ, 52 т минерального азота и 6 т фосфора [14, 16, 22].

На рис. 2 представлены сценарии управления береговым стоком по схеме (см. рис. 1) в условиях постоянного спроса на обобщенный продукт и постоянной стоимости этого продукта.

За стационарное состояние экосистемы бухты были приняты следующие средние многолетние значения концентраций веществ (мг·N/м³): $C_p = 37,74$, $C_z = 18,87$, $C_B = 15$, $C_{NO_3} = 42,35$, $C_{NH_4} = 5,60$, $C_{DON} = 15$, $C_D = 15$. Кроме того, был использован средний по акватории бухты годовой ход концентрации бактериопланктона. Расчеты по модели (6)–(17) были выполнены на 365 суток условного года.

Как следует из рис. 2, *a*, *c*, в начале эксперимента поток загрязняющих веществ превышал ассимиляционные возможности бухты, агент ассимиляционной емкости экспоненциально понижал значение индекса $R(t)$ и скорость накопления загрязнений S_{acc} существенно опережала скорость их деструкции S_{ass} (рис. 2, *b*). Концентрация загрязнений в море PL значительно превышала предельно допустимое значение PL^* (рис. 2, *c*), а уровень биоразнообразия BD был ниже допустимого значения BD^* (рис. 2, *b*). Поэтому агенты управ-

ления начали ограничивать производство продукции, а следовательно, и скорость поступления загрязнений в море (рис. 2, *c*). Размеры штрафов TX за загрязнение уменьшились (рис. 2, *c*), и себестоимость производства E на 166-м шаге эксперимента стала ниже стоимости продукта PP (рис. 2, *a*). Однако интегральная рентабельность производства оставалась отрицательной (рис. 2, *f*).



Р и с. 2. Управление сценариями экономических (*a, b, f*) и экологических (*c, d, e*) процессов, рассчитанными по многолетним данным о состоянии экосистемы Севастопольской бухты

F i g. 2. Managing the scenarios of the economic (*a, b, f*) and environmental (*c, d, e*) processes calculated based on the multi-year data on the Sevastopol Bay ecosystem state

Такое положение сохранялось до 140-го шага вычислений, когда объем средств, накопленных в фонде новых технологий, достиг установленной величины $TX_{acc}^* = 1,7$ условных единиц. Начиная с этого момента времени, агент очистки стока от загрязнений имитировал применение новых технологий предварительной очистки, в результате чего концентрация загрязняющих веществ PL начала резко убывать (рис. 2, *c*). Одновременно стали увеличиваться концентрации фито- и зоопланктона (рис. 2, *d*), что в конечном итоге привело к росту индекса биоразнообразия BD , который на 200-м шаге вычислений превысил допустимое значение $BD^* = 5,2$ условных единиц. Отметим, что использованный в расчетах средний многолетний сценарий концентрации

бактериопланктона (рис. 2, *d*) являлся лимитирующим фактором при оценке величины биоразнообразия.

После восстановления баланса скоростей накопления и ассимиляции загрязнений агент ассимиляционной емкости принял значение $R(t) = 1$ (рис. 2, *b*), ограничение выпуска продукции было снято, и объем производства увеличился до уровня спроса DP (рис. 2, *a*).

С этого момента времени рентабельность выпуска продукции стала быстро возрастать, несмотря на существенные штрафные санкции, примененные к экономической системе в начальный период времени эксперимента, и на 270-м шаге она вышла на положительные значения (рис. 2, *f*).

Выводы. Таким образом, вычислительные эксперименты подтвердили свойство предложенной адаптивной модели прогнозировать сценарии эколого-экономических процессов, согласующиеся с заложенными в модель концепциями управления. Примененный метод оценки коэффициентов уравнений адаптивной модели по нормированным текущим отношениям средних значений процессов позволил построить количественную модель системы берег – бухта по минимальному объему наблюдений – средним многолетним значениям моделируемых процессов. Возможность имитировать отклики модели на различные варианты внешних управляющих воздействий делает подобные модели удобным инструментом планирования природоохранных действий в системах берег – бухта.

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. 432 p.
3. *Shogren J. F., Parkhurst G. M., Settle C.* Integrating economics and ecology to protect nature on private lands: models, methods, and mindsets // Environmental Science & 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 // Ecological 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: 10.04.2020).
6. *Timchenko I. E., Igumnova 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. 34–42.
8. *Ivanov V. A., Igumnova E. M., Timchenko I. E.* Coastal zone resources management. Kiev : Academperiodika, 2012. 304 p. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.192.304>
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. *Samhour J. F., Levin P. S.* Linking land- and sea-based activities to risk in coastal ecosystems // *Biological Conservation* 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. *Орехова Н. А., Вареник А. В.* Современный гидрохимический режим Севастопольской бухты // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34, № 2. С. 134–146. doi:10.22449/0233-7584-2018-2-134-146
15. Incorporating ecosystem services in marine planning: the role of valuation / T. Börger [et al.] // *Marine Policy*. 2014. Vol. 46. P. 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.01.019>
16. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / В. А. Иванов [и др.]. Севастополь, 2006. 90 с. (Препринт / МГИ НАНУ). URL: http://mhi-ras.ru/assets/files/gidrologogidrohimicheskij_rezhim_sevastopolskoj_buhty_2006.pdf (дата обращения: 20.05.2020).
17. *Fasham M. J. R., Ducklow H. W., McKelvie S. M.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer // *Journal of Marine Research*. 1990. Vol. 48, no. 3. P. 591–639. <https://doi.org/10.1357/002224090784984678>
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. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И.* Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. 225 с.
20. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Свищев С. В.* Применение принципов адаптивного моделирования морских экосистем к гидрохимическим наблюдениям в Севастопольской бухте // *Морской гидрофизический журнал*. 2019. Т. 35, № 1. С. 70–84. doi:10.22449/0233-7584-2019-1-70-84
21. *Свищев С. В.* Адаптивное моделирование нитрификации в Севастопольской бухте // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. 2018. № 2. С. 60–65. doi:10.22449/2413-5577-2018-2-60-65
22. О перспективах и возможностях оценки самоочистительной способности акватории Севастопольской бухты / Е. Е. Совга [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2014. Вып. 28. С. 153–164.

Об авторах:

Тимченко Игорь Евгеньевич, заместитель главного редактора, заведующий отделом системного анализа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: A-8650-2017, ORCID ID: 0000-0003-4673-7609**, timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru

Иващенко Игорь Кондратьевич, ответственный секретарь редколлегии, старший научный сотрудник отдела системного анализа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат экономических наук, **SPIN-код: 7626-4616 Author ID: 941046**, journal@mhi-ras.ru

Игумнова Екатерина Михайловна, ведущий инженер, отдел оптики и биофизики моря, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5950-7785 Author ID: 861018**, igumnova.syst.analysis@mhi-ras.ru

Свищев Сергей Владимирович, младший научный сотрудник, отдел системного анализа, ФГБУН ФИЦ МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **ResearcherID: T-1962-2018, ORCID ID: 0000-0003-4673-7609**, sergsvishchev09@gmail.com