

**Адаптивная модель управления стоком загрязняющих  
веществ в море по критериям рентабельности  
производства и биоразнообразия морской среды**

© 2017 И. Е. Тимченко\*, Е. М. Игумнова, И. К. Иващенко

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

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

Поступила в редакцию 18.04.2017 г.

Предложена модель эколого-экономической системы «берег – море», в которой рациональный баланс между экономической выгодой от утилизации в море отходов производства и сохранением экологического состояния морской среды основан на управлении системой по двум критериям: экономической рентабельности производства и индексу биологического разнообразия морской среды. Для экономической подсистемы «берег» и экологической подсистемы «море» использованы балансовые уравнения метода адаптивного баланса влияний с агентами управления, выполняющими локальные действия. В уравнениях модели применен новый метод оценки нормированных коэффициентов влияний, вычисляемых по отношениям средних значений переменных системы. На основе слежения за балансом накопления и ассимиляции загрязнений в морской среде исследовано влияние изменений температуры верхнего слоя моря, модуля скорости приводного ветра и концентрации хлорофилла *a* на сценарии эколого-экономических процессов. Приведены результаты управления рентабельностью производства и уровнем биоразнообразия морской среды в режиме очистки берегового стока от загрязнений. Показано, что эффективность управления береговым стоком загрязняющих веществ определяется не только размерами штрафных санкций, но также интенсивностью процессов биохимического разложения этих веществ и термодинамическими характеристиками морской среды.

**Ключевые слова:** адаптивная модель, эколого-экономическая система, управление рентабельностью производства, баланс накопления и ассимиляции загрязнений в море.

DOI: 10.22449/0233-7584-2017-6-78-92

**Введение.** Прибрежные зоны моря подвержены интенсивному воздействию берегового стока, приносящего с собой взвешенные и растворенные загрязняющие вещества промышленного, сельскохозяйственного и бытового происхождения. Способность морской среды к самоочищению от загрязнений представляет собой важный ассимиляционный ресурс, который активно используется береговой социально-экономической системой. Однако меры, принимаемые для очистки берегового стока от загрязнений, зачастую оказываются недостаточными для сохранения биоразнообразия морской среды. Ассимиляционная емкость морской среды имеет свои пределы, поскольку она зависит от баланса скоростей накопления и деструкции основных видов загрязняющих веществ. Поэтому для контроля экологического состояния прибрежной зоны моря важно связать между собой сценарии экономической выгоды от использования морских ассимиляционных ресурсов с динамикой индекса биоразнообразия морской среды.

Этой цели должны служить модели объединенных эколого-экономических систем «берег – море». Отдельные примеры построения подобных моделей имеются в научной литературе, посвященной проблемам экологической экономики и рационального природопользования [1 – 8]. Перспективным является системный подход к этой проблеме и, в частности, использование принципа адаптивного баланса влияний [9 – 11]. Такой подход был применен в работе [10], в которой была предложена адаптивная модель управления эколого-экономическими процессами накопления и ассимиляции загрязнений, поступающих в прибрежную зону моря от управляемого берегового источника. В настоящей работе продолжены эти исследования с использованием новой адаптивной модели «берег – море», в которой рациональный баланс между экономической выгодой от утилизации в море отходов производства и сохранением экологического состояния морской среды основан на управлении производством по критериям: экономической рентабельности производства, уровню загрязнения и индексу биологического разнообразия морской среды.

С этой целью экономический блок модели был дополнен экосистемным блоком, в состав которого включены химико-биологические процессы, формирующие индекс биоразнообразия морской среды. Для валидации модели проведена серия имитационных экспериментов, в ходе которых исследовано влияние динамики морской среды на баланс накопления и ассимиляции загрязнений в море.

**Концептуальная модель эколого-экономической системы «берег – море».** Для управления эколого-экономической системой «берег – море» по критериям рентабельности производства и биоразнообразия морской среды производство товаров и услуг береговой экономической подсистемы должно зависеть от санкций, налагаемых на нее за ухудшение экологического состояния морской среды в прибрежной акватории. Концептуальная модель управления системой, примененная в данном исследовании, приведена на рис. 1. Для оценки экологического состояния морской экосистемы использованы: текущий уровень концентрации загрязнений  $PL(t)$ , поступающих в море с береговым стоком, интегральный баланс скоростей накопления и ассимиляции загрязняющих веществ  $S(t)$ , а также индекс биоразнообразия морской среды  $BD$ . Критериями управления стали: предельно допустимая концентрация (ПДК) уровня загрязнения  $PL^*$ , оценка ассимиляционной емкости морской среды  $S^*$  и допустимая величина индекса биоразнообразия  $BD^*$ .

В морской блок экосистемы включено минимальное количество процессов, формирующих индекс биоразнообразия морской среды  $BD$ . В качестве индекса биоразнообразия использована динамическая оценка, основанная на интегральном балансе положительных  $LS_k$  и отрицательных  $PL$  факторов влияния:

$$BD = C_{BD} + \sum_{k=1}^l b_k LS_k - a_{BD/PL} PL, \quad (1)$$

где  $l$  – количество живых организмов  $LS_k$  в единичном объеме морской среды, наиболее подверженных воздействию загрязнений, поступающих с береговым стоком;  $b_k$  – относительный вес данного вида организма при оценке экологического состояния морской экосистемы. Пищевая цепь состояла из нижнего звена – концентрации фитопланктона  $PP$  и верхнего – концентрации биоресурса  $BR$ , который включал в себя все другие виды живых организмов. Из химических элементов экосистемы были использованы кислород  $OX$ , детрит  $DT$  и биогенные вещества  $BG$ . Причинно-следственные связи в экосистеме контролировали агенты ресурсного лимитирования биоресурса  $BR$  по фитопланктону, биогенным веществам и кислороду  $AG_{BR}(PP, BG, OX)$  и биогенных веществ  $BG$  по кислороду и детриту  $AG_{BG}(OX, DT)$ .

В экономическом блоке управления стоком загрязняющих веществ в море имела место следующая последовательность операций. Объем производства  $V$  возрастал с ростом спроса на обобщенный продукт  $D$ , что в свою очередь вызывало увеличение объема загрязняющих веществ, поступающих в море. Это вело к увеличению концентрации загрязняющих веществ в морской среде  $PL$ , в результате чего агент управления  $AG_{TX}(PL, PL^*)$  устанавливал санкции  $TX$ , которые увеличивали себестоимость производства  $E$ . Управление объемами выпускаемой продукции осуществлял агент  $AG_V(P, E)$ , который непрерывно сравнивал себестоимость производства с рыночной ценой продукта  $P$ . Когда себестоимость производства становилась выше стоимости:  $E > P$  и нарушалось условие рентабельности производства  $EF$ , этот агент сокращал (или останавливал) выпуск продукции. Дополнительное увеличение штрафа происходило за превышение ПДК загрязнений  $PL^*$ . После сокращения или остановки производства поток загрязняющих веществ в море уменьшался и процессы самоочищения морской среды вели к уменьшению концентрации загрязнений в море. Поэтому наступала обратная последовательность событий: уменьшались размер санкций и величина себестоимости производства. В результате наступления условия  $E < P$  агент управления  $AG_V(P, E)$  восстанавливал выпуск продукции до уровня спроса на него.

Текущий баланс скоростей накопления и ассимиляции загрязнений контролировал агент управления  $AG_{TX}(S, S^*)$ , который увеличивал санкции за загрязнение  $TX$ , когда баланс объемов накопленных и ассимилированных загрязнений  $S(t)$  превышал значение  $S^*$ , определяемое ассимиляционными свойствами морской экосистемы. Кроме того, когда индекс биоразнообразия морской среды опускался ниже заданного предельно допустимого значения  $BD^*$ , агент управления  $AG_{BD}(BD, BD^*)$  также начинал сокращать выпуск продукции.

В модели управления был предусмотрен режим очистки берегового стока от вредных для экосистемы загрязнений. С этой целью в структуру модели рис. 1 был включен фонд новых технологий  $TX_{acc}$ , который формировался из штрафных санкций за загрязнение  $TX$ . Когда размер этого фонда увеличивался до значения  $TX_{acc}^*$ , агент управления  $AG_{PL}(TX_{acc}, TX_{acc}^*)$  имитировал включение режима очистки берегового стока от загрязнений и, как следствие, происходило уменьшение концентрации загрязнений в морской среде  $PL$ .

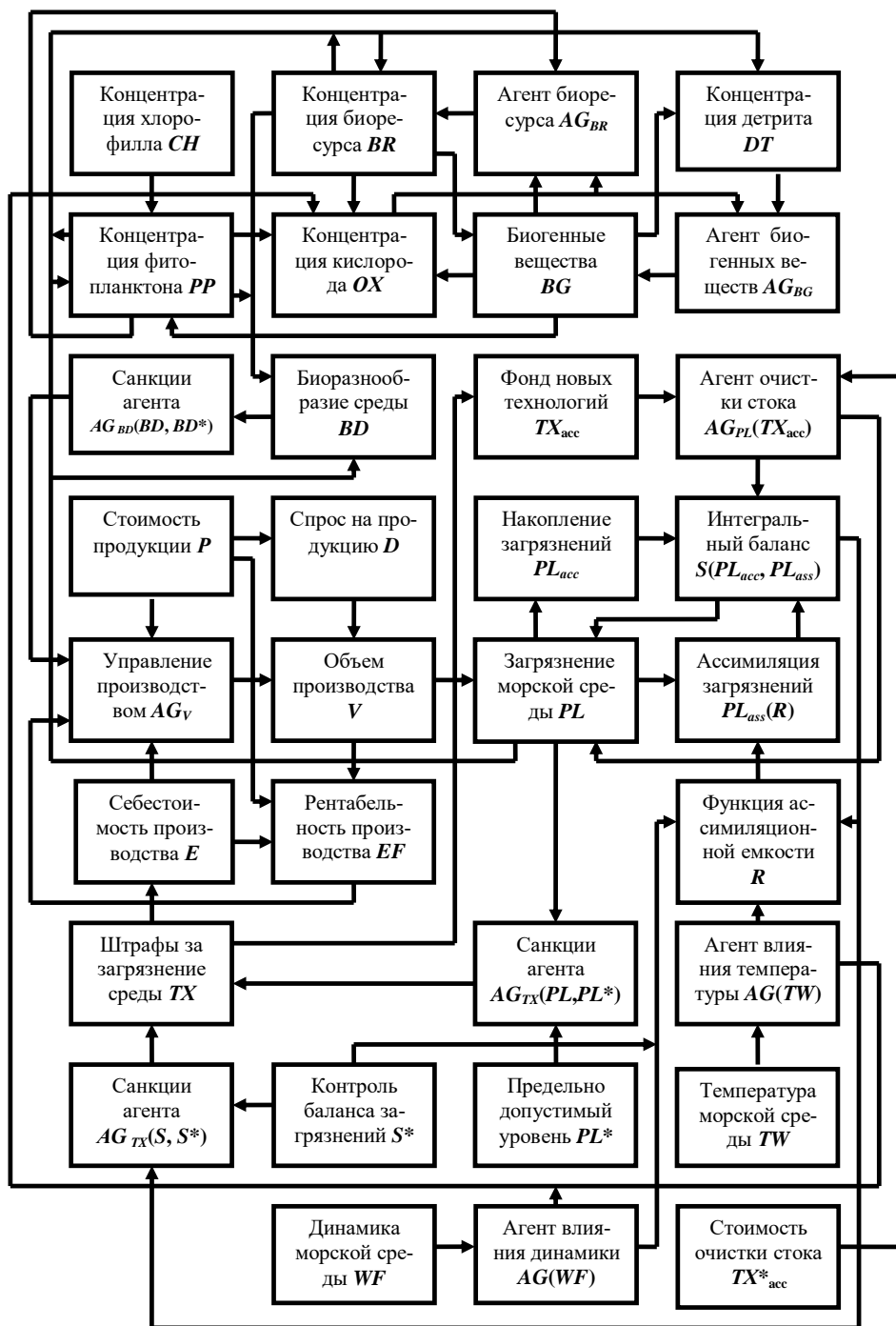


Рис. 1. Концептуальная модель управления эколого-экономической системой «берег – море» по критериям рентабельности производства и биоразнообразия морской среды

Интегральный баланс накопления и ассимиляции загрязняющих веществ представлял собой разность  $S(t)$  двух составляющих:

$$S(t) = S_{acc}(t) - S_{ass}(t) = a_{PL/V} \int_0^t [1 - R(\tau)] V(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $S_{acc}(t)$  – накопленное (аккумулированное) количество загрязнений;  $S_{ass}(t)$  – их накопленное ассимилированное количество;  $R(t)$  – относительная скорость ассимиляции загрязнений – функция ассимиляционной емкости, которая представляла собой отношение накопленного объема ассимилированных загрязнений к их общему аккумулярованному объему  $R(t) = S_{ass} / S_{acc}$ . Ввиду конечной величины ассимиляционной емкости морской среды существовало максимально допустимое для данной экосистемы (предельное) значение функции баланса накопления и ассимиляции загрязнений (2), которое мы обозначим как  $S^*$ . В пределах ассимиляционной емкости, при  $S \leq S^*$ , функция  $R(t)$  принимала постоянные значения  $R_{max}$  из интервала ( $0 \leq R(t) \leq 1$ ). Величина  $S^*$  зависела от интенсивности биохимической деструкции загрязняющих веществ, температуры моря  $TW$ , а также от переноса и турбулентной диффузии водных масс.

Для функции  $R(t)$  была использована следующая модель управления:

$$R(t) = IF\{R(t) > 1; 1; IF[S < S^*; R_{max}; R_{max} \exp(-\alpha_R \tau)] + AG[TW(t)] + AG[WF(t)]\}, \quad (3)$$

$$AG[TW(t)] = a_{R/TW} IF\{TW(t) > 0; 1 - \exp[-b_{R/TW} TW(t)]; 0\},$$

$$AG[WF(t)] = a_{R/WF} IF\{WF(t) > 0; 1 - \exp[-b_{R/WF} WF(t)]; 0\}.$$

**Динамические уравнения экономического блока адаптивной модели эколого-экономической системы.** Уравнения были построены с помощью модульных уравнений метода адаптивного баланса влияний (*ABC*-метод) [10] и схемы причинно-следственных связей моделируемых процессов (рис. 1). Считалось, что для построения модели системы управления использовано множество взаимосвязанных процессов, представленных функциями  $\{u_i\}$ , принимающими значения из сегментов  $0 \leq u_i \leq 2C_i$ , где  $C_i$  – средние значения процессов. Процессы  $u_i$  в соответствии с причинно-следственными связями формировали материальные балансы моделируемых субстанций и были представлены соотношениями

$$u_i = C_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} u_j + A_i, \quad (4)$$

где  $a_{ij}$  – коэффициенты внутрисистемных влияний;  $n$  – число процессов;  $A_i$  – внешние влияния, приложенные к экосистеме. В работах [10 – 14] показано, что система уравнений *ABC*-метода построена таким образом, чтобы сохранялись динамические балансы масс моделируемых субстанций (4). Этой цели соответствует следующая общая система уравнений:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left[ C_i - \left( u_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} u_j - A_i \right) \right] \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (5)$$

в которой  $r_i$  – удельные скорости изменения переменных.

Материальные балансы (4) внутрисистемных и внешних влияний в уравнениях (5) сохраняются в форме приращений количества продуктов реакций по отношению к их средним значениям  $C_i$  при условии, что внутрисистемные и внешние влияния не выводят переменные за пределы областей их определения ( $0 \leq u_i \leq 2C_i$ ):

$$u_i = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)]. \quad (6)$$

На этом предположении основаны методы оценки коэффициентов влияний  $a_{ij}$ , рассмотренные в работах [10 – 14].

Используя уравнения ABC-метода (5) и обозначения причинно-следственных связей на концептуальной модели системы (рис. 1), выпишем уравнения береговой экономической подсистемы.

Уравнение для спроса на продукцию:

$$\frac{dD}{dt} = 2r_D D [C_D - (D_i + a_{D/P} P - D^*)], \quad (7)$$

$$D = IF[D < 0; 0; IF(D > 2C_D; 2C_D; D)],$$

где функция внешнего влияния  $D^*$  определяет динамику спроса, а константа  $C_D$  задает его среднее значение.

Уравнение для объема производства товаров и услуг:

$$\frac{dV}{dt} = 2r_V V \{C_V - [V + AG_V(P, E) + AG_{BD}(BD, BD^*) - a_{V/D} D]\}, \quad (8)$$

$$V = IF[V < 0; 0; IF(V > 2C_V; 2C_V; V)],$$

$$AG_V(P, E) = IF\{P > E; 0; V_E^* [1 - \exp(-b_V \tau)]\},$$

$$AG_{BD}(BD, BD^*) = IF\{BD > BD^*; 0; V_{BD}^* [1 - \exp(-b_{BD} \tau)]\}.$$

Уравнение для концентрации загрязнений:

$$\begin{aligned} \frac{dPL}{dt} = & 2r_{PL} PL \{C_{PL} - [PL - a_{PL/V} IF\{S(t) < S^*; V(t); V(t) + \int_0^t [1 - R(\tau)] V(\tau) d\tau + \\ & + AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*)]\} \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*) = IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; 0; PL [1 - \exp(-b_{PL_{TX}} \tau)]\}, \quad (10)$$

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

Уравнение для штрафных санкций за загрязнение морской среды:

$$\frac{dTX}{dt} = 2r_{TX}TX\{C_{TX} - [TX - a_{TX/PL}PL - AG_{TX/PL}(PL, PL^*) - AG_{TX/S^*}(S, S^*) + TX^*]\}, \quad (11)$$

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

$$AG_{TX/PL}(PL, PL^*) = IF\{PL < PL^*; 0; a_{TX/PL}(PL - PL^*)[1 - \exp(-b_{TX/PL}\tau)]\},$$

$$AG_{TX/S^*}(S, S^*) = IF\{S < S^*; 0; a_{TX/S^*}(S - S^*)[1 - \exp(-b_{TX/S^*}\tau)]\},$$

где  $TX^*$  – константа, регулирующая общий размер санкций.

Уравнение для себестоимости продукции береговой подсистемы:

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

$$E = IF[E < 0; 0; IF(E > 2C_E; 2C_E; E)].$$

Оценка экономической рентабельности производства проводилась при помощи логарифма отношения доходов экономической системы  $I_{acc}(t)$  к расходам  $E_{acc}(t)$ , накопленным за период времени  $(0, t)$ :

$$I_{acc} = \int_0^t P^*V(t)dt, \quad E_{acc} = \int_0^t E(t)V(t)dt, \quad EF = \ln \frac{1 + I_{acc}}{1 + E_{acc}}. \quad (13)$$

**Динамические уравнения экологического блока адаптивной модели эколого-экономической системы.** Модульные уравнения метода адаптивного баланса влияний (5) позволили построить следующую систему уравнений адаптивной модели подсистемы «море».

Уравнение для индекса биоразнообразия:

$$\frac{dBD}{dt} = 2r_{BD}BD[C_{BD} - (BD - a_{BD/PP}PP - a_{BD/BR}BR + a_{BD/PL}PL)], \quad (14)$$

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

Уравнение для концентрации фитопланктона:

$$\frac{dPP}{dt} = 2r_{PP}PP\{C_{PP} - [PP + a_{PP/BR}BR - a_{PP/BG}BG + a_{PP/PL}PL - a_{PP/CH}CH]\}, \quad (15)$$

$$PP = IF[PP < 0; 0; IF(PP > 2C_{PP}; 2C_{PP}; PP)].$$

Уравнение для концентрации биоресурса:

$$\frac{dBR}{dt} = 2r_{BR}BR\{C_{BR} - [BR - AG_{BR}(OX, PP, BG) + a_{BR/PL}PL]\}, \quad (16)$$

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

$$AG_{BR}(OX, PP, BG) = IF[M_{BR}(t) = a_{BR/OX}OX(t); a_{BR/OX}OX(t); 0] + \\ + IF[M_{BR}(t) = a_{BR/PP}PP(t); a_{BR/PP}PP(t); ; 0] + IF[M_{BR}(t) = a_{BR/BG}BG(t); a_{BR/BG}BG(t); 0],$$

где  $M_{BR}(t) = \arg \min[a_{BR/BG}OX(t); a_{BR/PP}PP(t); a_{BR/BG}BG(t)]$ .

Уравнение для концентрации кислорода:

$$\frac{dOX}{dt} = 2r_{OX}OX\{C_{OX} - [OX + a_{OX/BR}BR + a_{OX/BG}BG - a_{OX/PP}PP + \\ + AG[TW(t)] - AG[WF(t)]\} \quad (17)$$

$$OX = IF[OX < 0; 0; IF(OX > 2C_{OX}; 2C_{OX}; OX)].$$

Уравнение для концентрации биогенных веществ:

$$\frac{dBG}{dt} = 2r_{BG}BG\{C_{BG} - [BG - AG_{BG}(OX, DT) + a_{BG/PP}PP + a_{BG/BR}BR]\}, \quad (18)$$

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

$$AG_{BG}(OX, DT) = IF[M_{BR}(t) = IF[M_{BG}(t) = a_{BG/OX}OX(t); a_{BG/OX}OX(t); 0] + \\ + IF[M_{BG}(t) = a_{BG/DT}DT(t); a_{BG/DT}DT(t); 0]$$

где  $M_{BG}(t) = \arg \min[a_{BR/OX}OX(t); a_{BR/DT}DT(t)]$ .

Уравнение для концентрации детрита:

$$\frac{dDT}{dt} = 2r_{DT}DT\{C_{DT} - [DT - a_{DT/BR}BR - a_{DT/PP}PP + a_{DT/OX}OX - a_{DT/PL}PL]\}, \quad (19)$$

$$DT = IF[DT < 0; 0; IF(DT > 2C_{DT}; 2C_{DT}; DT)].$$

**Вычислительные эксперименты с моделью.** С построенной моделью были проведены вычислительные эксперименты. Размерные переменные модели  $u'_i$  и внешние влияния  $A'_i$ , имеющие средние значения  $C_{u'_i}$  и  $\bar{A}'_i$ , были представлены в безразмерной форме  $u_i$  и  $A_i$  путем преобразований:

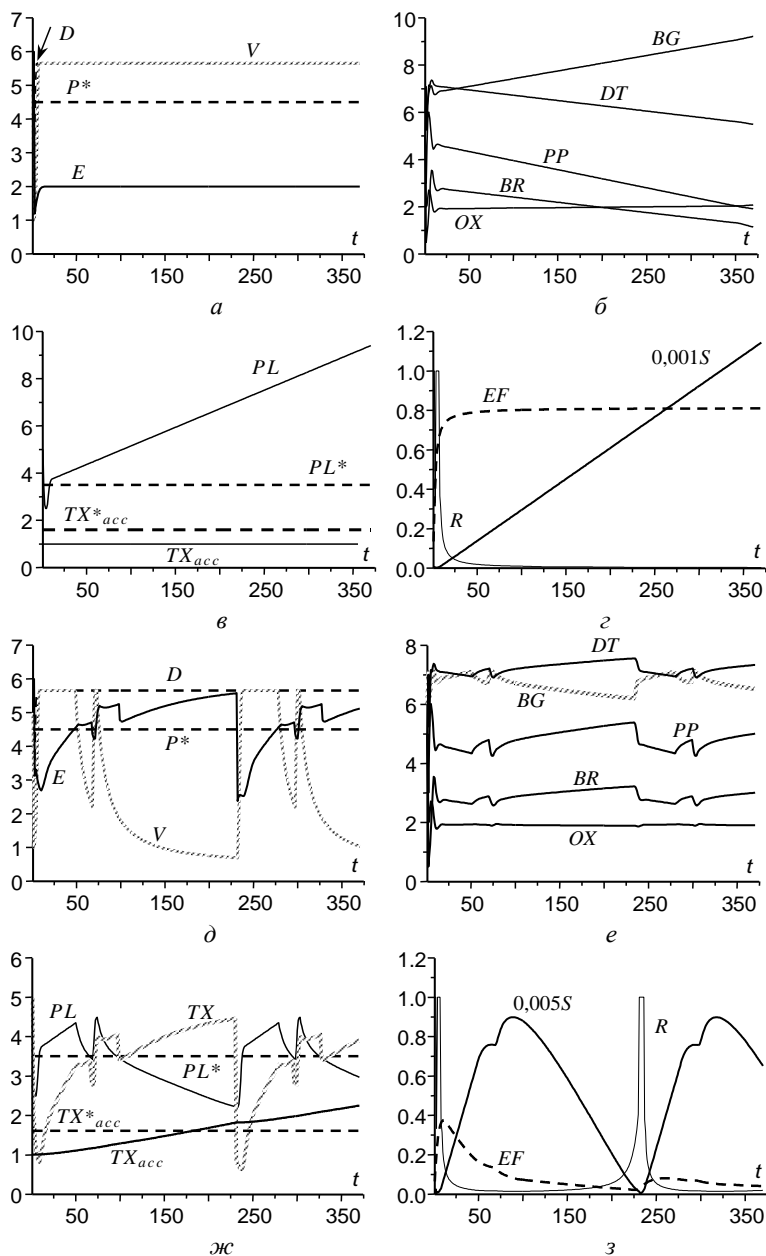
$$C_u u'_i = C_{u'_i} u_i, \quad \bar{A} A'_i = \bar{A}'_i A_i. \quad (20)$$

В соответствии с соотношениями (20) для возврата к исходным размерным значениям переменных достаточно умножить результаты вычислений  $u_i$  на  $C_{u'_i} C_u^{-1}$ . Расчеты проводились на 370 шагов безразмерного времени с шагом вычислений  $\Delta t = 0,1$ . При проведении имитационных экспериментов средние значения переменных были заданы из интервала изменчивости (0, 10), коэффициенты влияний имели значения из интервала чисел (0,1; 0,5).

В первой серии экспериментов были исследованы управляемость модели и ее чувствительность к изменениям параметров, определяющим влияние штрафных санкций на уровень загрязнения и рентабельность производства. Первоначально термодинамические факторы  $TW(t)$  и  $WF(t)$  не учитывались



для того, чтобы впоследствии оценить их влияние на баланс накопления и ассимиляции загрязнений. Были построены сценарии процессов для неблагоприятного для экосистемы случая, когда скорость ассимиляции загрязнений низкая ( $R_{\max} = 0,05$ ), а штрафные санкции за загрязнение отсутствуют ( $TX = 0$ ). Эти сценарии показаны на рис. 2, *a – z*.



**Рис. 2.** Сценарии эколого-экономических процессов без учета влияния динамики морской среды: *a, б, в, г* – рост уровня загрязнения моря, когда выпуск продукции неограничен; *д, е, ж, з* – управление выпуском продукции  $V$  по уровню загрязнения  $PL$  и балансу скоростей накопления и ассимиляции загрязнений  $S$ . Обозначения см. на рис. 1

При отсутствии санкций за загрязнение экономическая система выпускала продукцию на уровне постоянного спроса на нее  $V = D$ , так как условие рентабельности производства  $P > E$  было выполнено (рис. 2, а), а управление выпуском отсутствовало. Ввиду низкой скорости ассимиляции уровень загрязнения морской среды  $PL$  быстро увеличивался (рис. 2, в), что отразилось на сценариях процессов в морской экосистеме (рис. 2, б). Индекс ее биоразнообразия падал, так как уменьшались концентрации фитопланктона  $PP$  и биоресурса  $BR$  и резко увеличивался уровень загрязнения  $PL$ . Рентабельность производства при этом оставалась стабильно высокой (рис. 2, г).

После включения управления выпуском продукции сценарии эколого-экономических процессов претерпели значительные изменения. В начальный период времени с ростом уровня загрязнения моря  $PL$  было превышено установленное значение ПДК  $PL^*$ , что привело к резкому увеличению санкций  $TX$  (рис. 2, ж) и нарушению условия рентабельности производства  $P > E$  (рис. 2, д). Результатом стала последовательность кратковременных и более продолжительных ограничений выпуска продукции, которые показаны на рис. 2, д. В периоды ограничений выпуска уменьшались концентрация загрязнений  $PL$  (рис. 2, ж) и общий баланс накопленных загрязнений  $S$  (рис. 2, з), что постепенно создавало условия для возобновления объема производства на уровне спроса  $V = D$ .

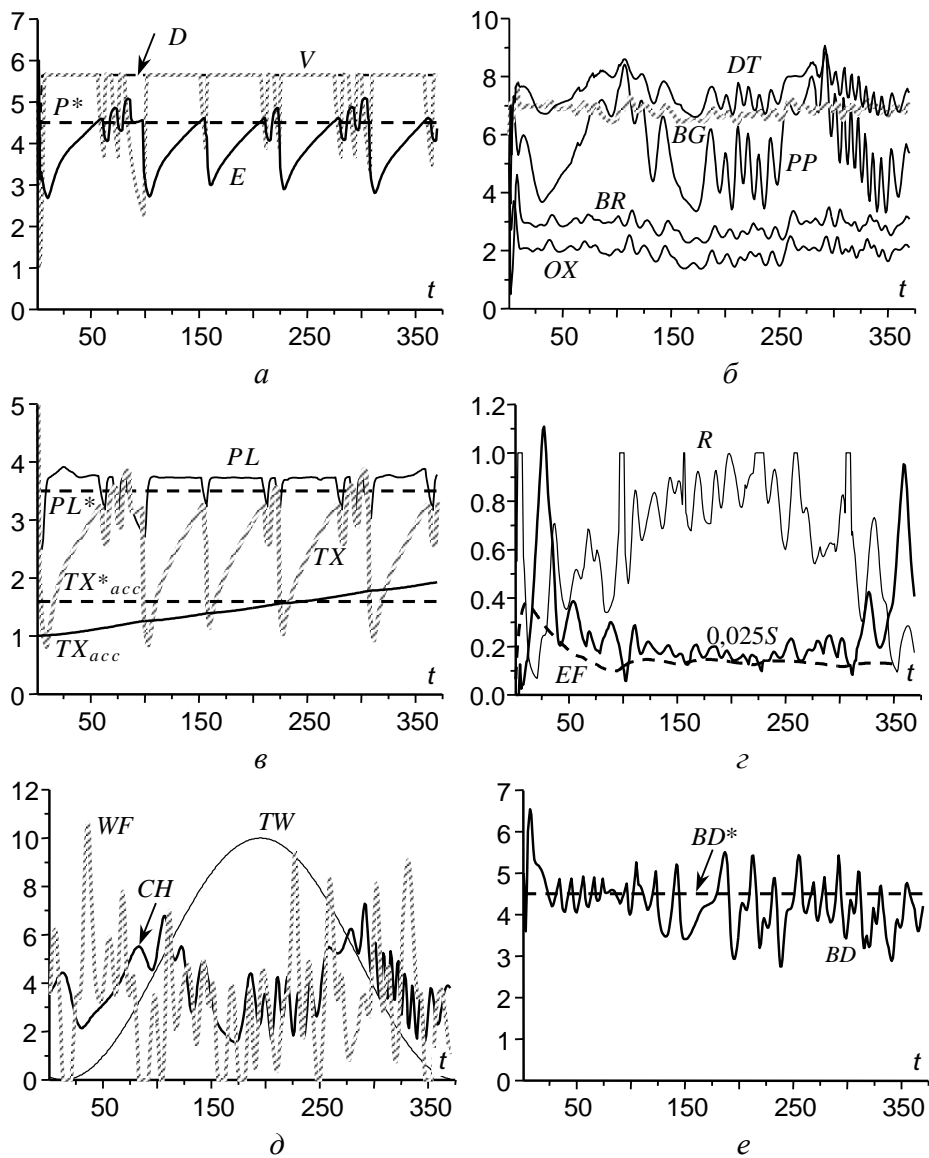
Реакция морской экосистемы на управление уровнем загрязнения морской среды приведена на рис. 2, е. Из сравнения сценариев этих процессов со сценариями на рис. 2, б следует вывод, что управление береговым стоком позволяет контролировать изменчивость концентраций переменных экосистемы и влиять на индекс ее биоразнообразия. Результаты следующей серии экспериментов приведены на рис. 3.

Оценивалась реакция эколого-экономической модели «берег – море» на внешние влияния: наблюдения концентрации хлорофилла  $a$ , температуры моря и модуля скорости приводного ветра. Имитированные сценарии внутригодовой изменчивости этих процессов приведены на рис. 3, д. Коэффициенты и параметры модели были сохранены прежними. Режимы очистки стоковых вод от загрязнений и управления системой по индексу биоразнообразия в этом эксперименте не были использованы.

Внешние влияния существенно изменили ассимиляционные свойства экосистемы. Скорость ассимиляции значительно выросла, а баланс накопления и ассимиляции загрязнений заметно уменьшился (рис. 3, г). В результате концентрация загрязнений  $PL$  при сокращении выпуска продукции стала убывать значительно быстрее, чем в предыдущем эксперименте (рис. 2, ж) и была «привязана» к значению ПДК  $PL^* = 3,5$ . Выпуск продукции происходил в основном на уровне спроса, хотя и сопровождался кратковременными сокращениями объемов выпуска (рис. 3, а). Рентабельность производства (рис. 3, г) выросла примерно в два раза по сравнению с показанной на рис. 2, з.

Сценарии экологических процессов, изображенные на рис. 3, б, демонстрируют высокую изменчивость концентрации фитопланктона  $PP$  и детрита  $DT$ . Менее изменчивой оказалась концентрация кислорода  $OX$ , которая была использована в расчетах ( $a_{OX/PP} = 0,3$ ), вследствие небольшого коэффици-

ента влияния на нее со стороны фитопланктона. Этот характер изменчивости имели сценарии биоресурса  $BR$  и биогенных веществ  $BG$ , поскольку агенты ресурсного лимитирования в уравнениях для этих переменных учитывали минимальные значения концентрации кислорода (рис. 3, б).

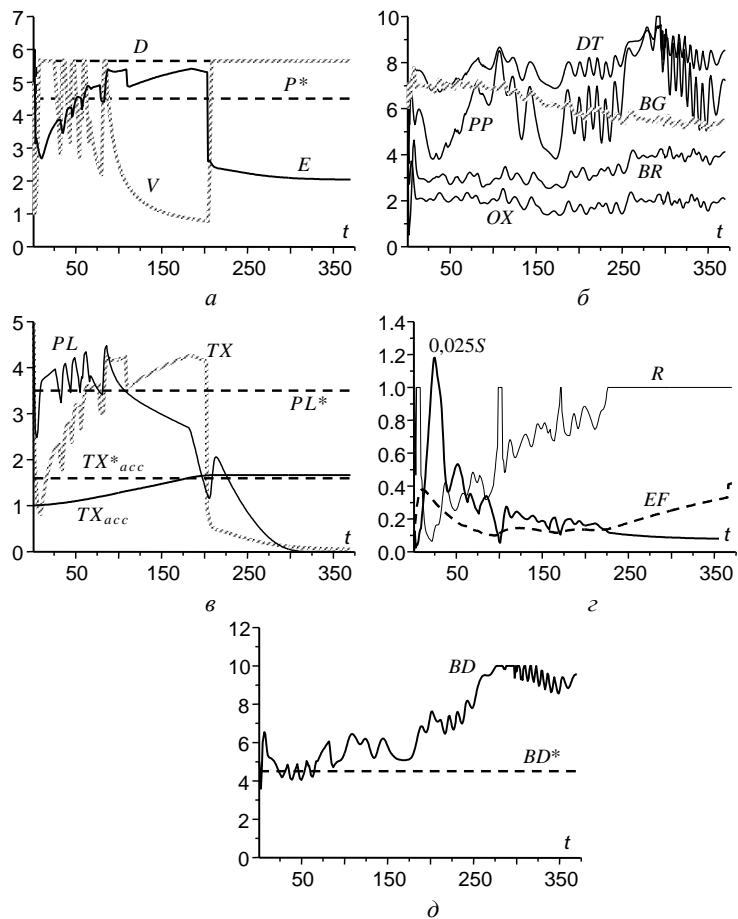


**Рис. 3.** Изменчивость процессов в эколого-экономической системе «берег – море» под влиянием имитированных сценариев температуры  $TW$ , приводного ветра  $WF$  и концентрации хлорофилла- $a$   $CH$ . Режимы очистки стоковых вод от загрязнений и управления системой по индексу биоразнообразия не были использованы. Обозначения – на рис. 1

Сценарий индекса биоразнообразия морской среды, рассчитанный по уравнению (14), приведен на рис. 3,  $e$ . Его значения опускались ниже предельно допустимой величины индекса  $BD^* = 4,5$ , которая была установлена

в данном эксперименте. Управление системой по этому критерию не было предусмотрено, однако данный сценарий был построен для сравнения с результатами последующих экспериментов.

При проведении дальнейших экспериментов были использованы одновременно все имевшиеся возможности управления системой. В уравнении для выпуска продукции (8) был активирован агент управления  $AG_{BD}(BD, BD^*)$ , который сокращал выпуск продукции, когда индекс биоразнообразия морской среды опускался ниже заданного предельно допустимого значения  $BD^* = 4,5$ . В уравнении для уровня загрязнения морской среды (9) был активирован агент управления  $AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*)$ , который имитировал очистку берегового стока от загрязнений, когда средства от штрафных санкций за загрязнение, накапливаемые в фонде новых технологий  $TX_{acc}$ , достигали размера  $TX_{acc}^*$ . Результаты управления уровнем загрязнения морской среды береговым стоком в режиме очистки берегового стока и контроля над индексом биоразнообразия морской среды приведены на рис. 4.



**Рис. 4.** Сценарии эколого-экономических процессов с учетом контроля над индексом биоразнообразия морской среды при включенном на 175-м шаге вычислений режиме очистки берегового стока от загрязнений. Обозначения – на рис. 1

Активация агента управления системой по индексу биоразнообразия привела к непродолжительным ограничениям объемов производства  $V$  (рис. 4, а) уже на начальном отрезке времени эксперимента, до 70-го шага вычислений, поскольку индекс  $BD$  опускался ниже значения  $BD^*$  (рис. 4, д). В это же время резко возрастали штрафные санкции за загрязнение  $TX$  (рис. 4, в), вследствие чего себестоимость производства  $E$  превысила стоимость продукции  $P^*$  (рис. 4, а) и объем производства был ограничен с 70-го до 205-го шага вычислений. В этот период времени концентрация загрязнений  $PL$  уменьшалась, однако санкции за загрязнение сохранялись и даже увеличивались (рис. 4, в), поскольку баланс накопленных и ассимилированных загрязнений  $S$  все еще превышал установленное значение  $S^* = 0,05$ . Скорость падения концентрации  $PL$  резко возросла на 175-м шаге, когда величина фонда новых технологий  $TX_{acc}$  достигла значения  $TX_{acc}^*$  (рис. 4, в).

После включения режима очистки берегового стока от загрязнений относительная скорость ассимиляции загрязнений выросла до максимального значения  $R_{max} = 1$  (рис. 4, з). Концентрация загрязнений  $PL$  упала до нуля (рис. 4, в), а рентабельность производства  $EF$  приобрела тенденцию устойчивого роста (рис. 4, з). Улучшение качества сточных вод существенно повысило индекс биоразнообразия морской среды  $BD$ . Полученный сценарий индекса  $BD$  (рис. 4, д) выгодно отличается от прежнего сценария (рис. 3, е), когда фонд новых технологий не был использован. Уменьшение индекса в конце эксперимента объясняется понижением концентрации фитопланктона (рис. 4, б), которое было вызвано заданным сезонным ходом температуры моря (рис. 3, д).

**Заключение.** Управление сложной системой, включающей в себя береговой социально-производственный комплекс и экосистему прибрежной морской среды, нацелено на получение экономической выгоды от утилизации промышленных и бытовых отходов за счет ассимиляционных ресурсов моря при непременном соблюдении условий, не допускающих необратимую деградацию морской экосистемы [12 – 15]. В данной работе предложены механизмы соблюдения этих условий путем наложения штрафных санкций на производство, которые снижают его рентабельность и ограничивают тем самым поток поступающих в море загрязняющих веществ.

Результаты вычислительных экспериментов с адаптивной моделью «берег – море» показали, что она может быть использована для прогнозов интегральных значений уровня загрязнения и индекса биоразнообразия прибрежной экосистемы параллельно с прогнозами сценариев обобщенных производственных процессов береговой подсистемы (объемы производства, его себестоимость, рентабельность и др.). Благодаря включению в модель агентов управления появилась возможность определять наиболее выгодные режимы использования ассимиляционной емкости морской среды путем вариации размеров штрафных санкций за загрязнение. Учет температуры моря и ветрового перемешивания верхнего слоя существенно увеличивает ассимиляционную емкость морской среды.

Адаптивный подход к совместному описанию морских экологических и береговых экономических процессов необходим для построения информационных технологий управления природопользованием в прибрежной зоне моря. Управление сложной системой «береговой сток – прибрежная морская среда» предполагает конкретизацию источников и химического состава загрязнений, а также использование динамической модели распространения и трансформации загрязнений в море.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2014-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей, на основе современных методов контроля состояния морской среды и гидр-технологий» (шифр «Фундаментальная океанология»).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daly H., Farley J.* Ecological Economics: Principles and Applications. – Washington: Island Press, 2010. – 544 p.
2. *Voinov A.* Systems Science and Modeling for Ecological Economics. – N.-Y.: Academic Press, 2008. – 430 p.
3. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В., Вентцель М.В. и др.* Научное обоснование экологического нормирования антропогенного воздействия на морскую экосистему (на примере Балтийского моря) // Океанология. – 1988. – 28, вып. 2. – С. 34 – 42.
4. *Oftara D.D., Seneca J.J.* Economic Losses from Marine Pollution: a Handbook for Assessment. – Washington: Island Press, 2001. – 320 p. – URL: <https://ageconsearch.umn.edu/bitstream/34963/1/sp07wi01.pdf> (дата обращения: 16.04.2017).
5. *Costanza R., Voinov A., Boumans R. et al.* Integrated ecological economic modeling of the Patuxent River watershed. – Maryland: Ecological Monographs. 72. – 2002. – P. 203 – 231. – URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/97f3/855f11e1b63dd219e989b0987838ebed99ca.pdf> (дата обращения: 14.04.2017).
6. *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. – 6, Iss. 3. – P. 233 – 242.
7. *Crépin A.-S., Norberg J., Mäler K.-G.* Coupled economic-ecological systems with slow and fast dynamics – Modelling and analysis method // Ecol. Economics. – 2011. – 70, Iss. 8. – P. 1448 – 1458. – doi:10.1016/j.ecolecon.2011.02.004
8. *Samhoury J.F., Levin P.S.* Linking land- and sea-based activities to risk in coastal ecosystems // Biol. Conserv. – 2012. – 145, Iss. 1. – P. 118 – 129. – doi:10.1016/j.biocon.2011.10.021
9. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – 225 с.
10. *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
11. *Timchenko I.E., Igumnova E.M., Timchenko I.I.* Adaptive Balance Models for Environmental-Economic Systems. – CreateSpace Indep. Publ. Platf. – 2016. – 486 p.
12. *Halpern B.S., Walbridge S., Selkoe K. et al.* A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems // Science. – 2008. – 319, Iss. 5865. – P. 948 – 952. – doi:10.1126/science.1149345

13. *Elofsson K., Folmer H., Gren I.-M.* Management of eutrophicated coastal ecosystems: a synopsis of the literature with emphasis on theory and methodology // *Ecol. Economics.* – 2003. – 47, Iss. 1. – P. 1 – 11. – doi: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. – 25, No. 6. – P. 1130 – 1133. – doi:10.1111/j.1523-1739.2011.01771.x
15. *Börger T., Beaumont N.J., Pendleton L. et al.* Incorporating ecosystem services in marine planning: The role of valuation // *Mar. Policy.* – 2014. – 46. – P. 161 – 170. – doi:10.1016/j.marpol.2014.01.019

## **Adaptive model for controlling the pollutants' runoff to the sea based on the criteria of the production economic efficiency and the marine environment bio-diversity**

**I. E. Timchenko\*, E. M. Igumnova, I. K. Ivashchenko**

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
\*e-mail: timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru

Proposed is the model of the ecological-economic system “coast – sea” in which rational balance between the economic profits resulted from the production wastes' recycling in the sea and maintaining the marine environment ecological state is based on managing the system according to two criteria: the economic efficiency and the biological diversity index in the marine environment. The balance equations of the method of adaptive balance of causes with the locally acting management agents are used for the economic and environmental subsystems “coast” and “sea”, respectively. A new method for assessing the normalized coefficients of influences calculated based on the ratios of the average values of the system variables is applied in the model equations. Influence of variations of temperature in the sea upper layer, the surface wind speed module and the chlorophyll-*a* concentration upon the ecological-economic processes is studied based on tracing the pollution accumulation-assimilation balance in the marine environment. The results of managing the economic efficiency and the level of the marine environment bio-diversity in the mode of purifying the coastal runoff of pollution are represented. It is shown that effectiveness of managing the polluting coastal runoff is conditioned not only by penalties, but also by intensity of the pollutants' biochemical decomposition processes and by the marine environment thermodynamic characteristics.

**Keywords:** adaptive model, ecological-economic system, management of economic efficiency, balance of pollution accumulation and assimilation in the sea.