

Е.М. Игумнова, И.Е. Тимченко

*Морской гидрофизический институт РАН, г. Севастополь***УПРАВЛЕНИЕ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ РЕСУРСОВ
ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ МОРЯ**

Рассмотрено применение метода адаптивного баланса влияний для разработки модели управления балансом потребления и воспроизводства морских ресурсов прибрежной зоны моря. Построена адаптивная модель эколого-экономической системы, которая связывает экономические показатели использования возобновляемых ресурсов с балансом скоростей их потребления и воспроизводства. Предложен метод оценки коэффициентов модели по нормированным отношениям средних значений моделируемых процессов. Управление потреблением ресурсов основано на применении множества агентов управления, контролирующих экологическое состояние морской среды и налагающих экономические санкции на производство за загрязнение моря своими отходами. Приведен пример эколого-экономической системы управления концентрацией биоресурса в морской среде. Построены сценарии процессов в этой системе без учета и с учетом влияния на них динамики морской среды. Показано, что для интегрального контроля за объемами потребления и воспроизводства биоресурса могут быть эффективно использованы индекс биоразнообразия и агент биоресурсной емкости морской среды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *метод адаптивного баланса влияний, сохранение материальных балансов, нормированные коэффициенты влияний, адаптивная модель управления, влияние динамики морской среды*

doi:10.22449/2413-5577-2018-1-13-22

Введение. Прибрежная зона моря служит источником биологических и ассимиляционных ресурсов морской среды, которые интенсивно используются эколого-экономическими системами «берег – море» для выпуска морепродуктов и утилизации в море промышленных, сельскохозяйственных и бытовых отходов. Проблема управления запасами этих возобновляемых видов ресурсов обусловлена необходимостью компромисса между растущими объемами их потребления и ограниченными возможностями их воспроизводства морской экосистемой. Решением проблемы занимается экологическая экономика прибрежной зоны моря [1]. В ряде исследований отмечена необходимость системного подхода к управлению потреблением ресурсов [2, 3], основанному на использовании численных моделей эколого-экономических систем [4, 5]. Подобные модели позволяют прогнозировать сценарии рентабельности выпуска продукции береговой экономической подсистемой параллельно с контролем над уровнем биоразнообразия морской среды [6]. Перспективным в этом отношении является метод адаптивного баланса влияний (АВС-метод) [7], предложенный для построения подобных моделей.

В [5] этим методом построена модель эколого-экономической системы «берег – море», в которой управление потреблением ассимиляционных ресурсов морской среды основано на одновременном контроле над биоразнообразием и ассимиляционной емкостью морской среды. В настоящем ис-

следовании проблема управления потреблением морских ресурсов рассмотрена в более общей постановке. Введено понятие ресурсной емкости морской среды по отношению к любому виду ресурсов: пищевых, минеральных, ассимиляционных, рекреационных и др. В модели эколого-экономической системы прибрежной зоны моря управление ресурсной емкостью осуществляет агент, контролирующий баланс скоростей потребления и воспроизводства концентрации данного вида ресурса в морской среде.

В качестве внешнего влияния на систему помимо спроса на производство продукции DM использована функция DYN , имитировавшая суммарное влияние динамических факторов морской среды (температуры, течений и диффузии) на изменение концентраций всех компонентов экосистемы.

Общие уравнения адаптивной модели управления концентрацией возобновляемых ресурсов морской среды. Рассмотрим построение адаптивной модели системы управления в общем виде, не конкретизируя вид ресурса, потребляемого береговой социально-экономической системой прибрежной зоны моря. Введем множество переменных модели $\{u_i\}$, которые представляют процессы превращения веществ в морской экосистеме, а также экономические процессы производства морепродуктов. Определим средние значения процессов $\{C_i\}$ и установим схему причинно-следственных связей между ними. Будем предполагать, что существуют коэффициенты влияний внутрисистемных процессов a_{ij} , которые связывают между собой переменные u_i и u_j соотношениями $u_i = a_{ij}u_j$ и обеспечивают стационарное (равновесное) состояние системы $\{\bar{u}_i = C_i\}$. Коэффициенты влияний сохраняют свои значения при осреднении процессов, поскольку они определяют, в каком количестве участвующие в реакциях вещества вступают во взаимодействие друг с другом.

Выразим переменные в единицах их средних значений: $u_i/C_i = a'_{ij}u_j/C_j$. При таком преобразовании появляются безразмерные множители a'_{ij} , и все влияющие функции u_j приводятся к общему с основной переменной u_i интервалу изменчивости ($0 \leq u_i \leq 2C_i$). Приложенные к системе внешние влияющие функции A_i обеспечивают положительные или отрицательные отклонения процессов от стационарных значений ($u_i - C_i$).

Рассмотрим материальный баланс формирования концентрации ресурса, представленного в модели переменной u_i , как стационарное значение C_i , дополненное суммой влияний ($u_j - C_j$), вызванных отклонениями влияющих переменных от своих средних значений. Тогда получим:

$$u_i = C_i + \sum_{j=1, i \neq j}^n a_{ij}(u_j - C_j) = C_i + \sum_{j=1, i \neq j}^n a'_{ij} \frac{C_i}{C_j} (u_j - C_j). \quad (1)$$

Целесообразно предположить, что все множители a'_{ij} имеют одинаковые значения, так как они одинаково транслируют влияния функций u_j на функцию u_i . Пусть, например, имеется m положительных множителей $a'_{ik}+$ и $n - m$ отрицательных $-a'_{il}-$. Тогда соотношение (1) переписется в виде:

$$u_i = C_i + \sum_{k=1}^m a'_{ik}+ \frac{C_i}{C_k} (u_k - C_k) - \sum_{l=1}^{n-m} a'_{il}- \frac{C_i}{C_l} (u_l - C_l), \quad (2)$$

Анализ этого выражения показывает, что модули сумм для каждой из двух групп множителей a_{ik}^{t+} и $-a_{il}^{t-}$ должны быть нормированы к 0,5.

Уравнения метода адаптивного баланса влияний построены таким образом, чтобы они сохраняли материальные балансы реакций внутрисистемных взаимодействий веществ (2), а их решения соответствующим образом адаптировались к приложенным к системе внешним воздействиям A_i [4, 7]. Эти уравнения имеют стандартный (модульный) вид:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \{C_i - [u_i - F_{u_i}(a_{ij} u_j, A_i)]\}, \quad (3)$$

где r_i – размерные параметры, имеющие смысл относительных скоростей изменения функций u_i . Или с учетом выражения (2):

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \frac{C_i}{2m} \sum_{k=1}^m C_k^{-1} (u_k - C_k) + \frac{C_i}{2(n-m)} \sum_{l=1}^{n-m} C_l^{-1} (u_l - C_l) - A_i \right] \right\}, \quad (4)$$

$$n > m, i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Для того чтобы решения уравнений удовлетворяли установленным интервалам изменчивости переменных ($0 \leq u_i \leq 2C_i$), система уравнений модели (5) дополняется логическими агентами управления:

$$u_i = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)]. \quad (5)$$

Введем обозначение MR для концентрации ресурса морской среды, потребляемого береговой социально-экономической системой. Ресурсная емкость морской среды зависит от интегрального баланса скоростей потребления и воспроизводства данного вида ресурса. Обозначим объем потребления ресурса за период времени $(0, t)$ $S_{ext}(t)$, а объем его воспроизводства $S_{rec}(t)$. Тогда интегральное изменение концентрации ресурса можно оценить по формуле:

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

в которой воспроизводством ресурса управляет функция (агент) ресурсной емкости морской среды $R(t)$, а функция $V(\tau)$ обозначает объем морепродуктов, которые производит береговая экономическая система при использовании данного вида ресурса. Поясним роль агента ресурсной емкости в формуле (6).

Примем, что в стационарном состоянии скорости потребления и воспроизводства ресурса в морской экосистеме равны, функция $R(t) = 1$ и дефицит воспроизводства ресурса $S(t) = 0$. Под действием внешних влияний на экосистему концентрация ресурса $MR(t)$ отклоняется от значения в стационарном состоянии экосистемы C_{MR} . В силу природной устойчивости экосистем с ростом скорости потребления ресурса экосистема стремится увеличить скорость его воспроизводства. Однако существует естественный предел значения концентрации ресурса MR^* , начиная с которого скорость воспроизводства отстает от скорости потребления. Как следствие, функция $R(t)$ устремляется к нулю, а дефицит воспроизводства ресурса возрастает $S(t) > 0$. Поэтому значение MR^* следует считать индексом ресурсной емкости морской среды по данному виду ресурса. Следовательно, агент ресурсной емкости может быть представлен логическим оператором управления:

$$R(t) = IF[MR > MR^*; 1; \exp(-\alpha_R \tau)]. \quad (7)$$

С учетом введенных предположений динамика концентрация ресурса может быть представлена уравнением ABC-метода:

$$\frac{dMR}{dt} = 2r_{MR} MR \{C_{MR} - [MR - \sum_{i=1}^k a_{MR/u_j} (u_i - C_i) + a_{MR/S} S]\}, \quad (8)$$

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

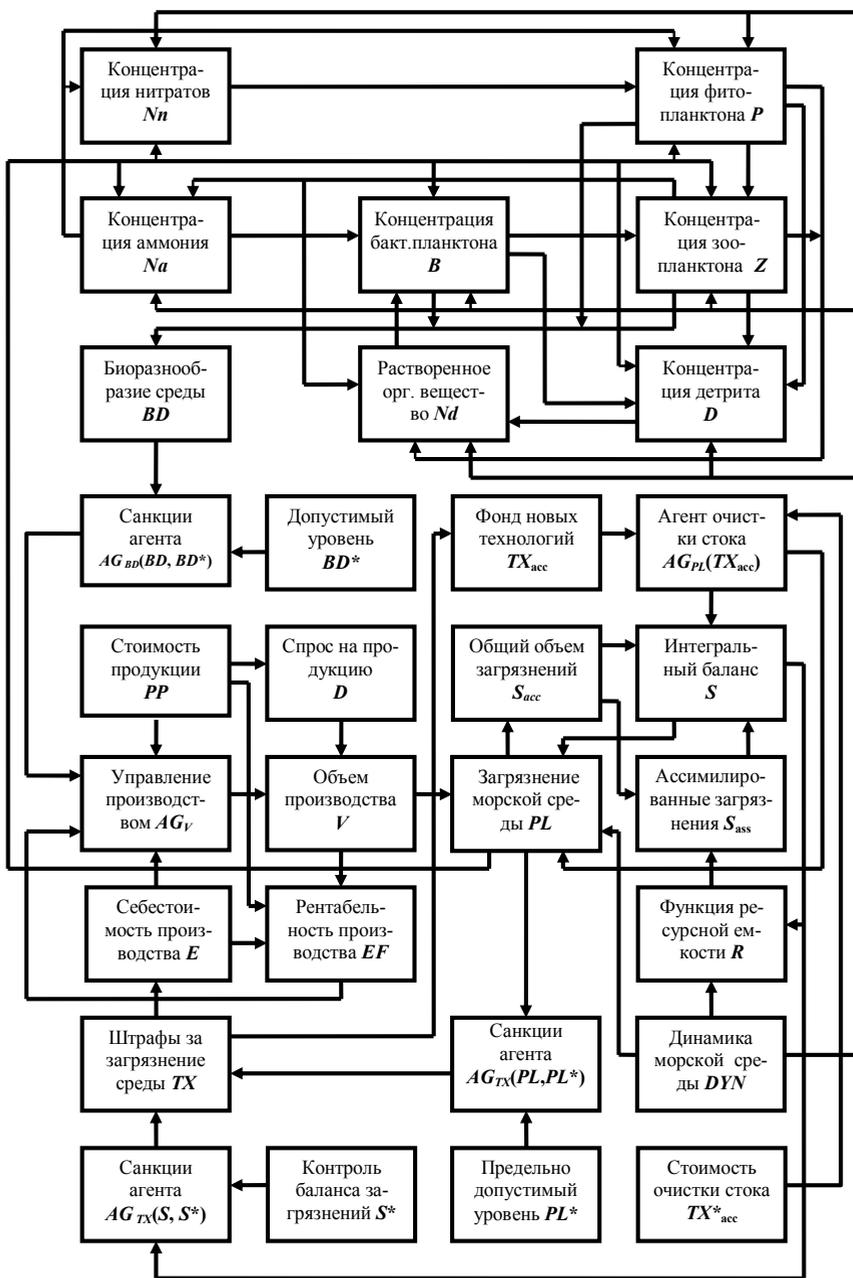
где u_j – концентрации биохимических веществ экосистемы, формирующих качество ресурса, необходимое для его использования береговой экономической системой.

Адаптивная модель управления потреблением биоресурса в эколого-экономической системе прибрежной зоны моря. Управление потреблением биоресурса основано на отрицательной обратной связи между скоростью потребления морских ресурсов и способностью их воспроизводства. Организацию управления рассмотрим на примере адаптивной модели эколого-экономической системы потребления биоресурсов морской среды BD с учетом ее ассимиляционной емкости. Концептуальная модель эколого-экономической системы управления приведена на рис.1. В качестве морской экосистемы, формирующей концентрацию биоресурса, используем модель планктонной динамики и круговорота азота в морской среде Фэшема, Даклоу и Мак-Кельви [8]. В этой модели было принято, что концентрация биоресурса BD формируется концентрациями трех биологических компонентов пищевой цепи морской экосистемы: фитопланктона P , зоопланктона Z и бактериопланктона B . Считалось, что в равновесном состоянии эти концентрации поддерживаются концентрациями аммония Na , нитратов Nn , растворенного органического вещества Nd и детрита D . В экономической части модели учитывались объемы производства V , которые определяли скорость потребления биоресурса, цена продукции PP , ее себестоимость E , концентрация загрязняющих веществ PL , поступающих в море в качестве отходов производства, а также штрафные санкции TX , налагаемые на производство за загрязнение морской среды. Предполагалось, что накопление санкций в специальном фонде TX_{acc} позволяет осуществить очистку берегового стока от загрязнений, когда величина фонда достигнет размера TX^*_{acc} .

Примем, что концентрация биоресурса в морской среде пропорциональна величине индекса биоразнообразия BD , адаптивная модель которого будет представлена уравнением (8) с заменой MR на BD . Тогда u_j станут концентрациями живых объектов морской среды, а C_{BD} – стационарным (равновесным) значением индекса биоразнообразия.

Оператор агента биоресурсной емкости (7) наделим возможностью восстанавливать баланс скоростей потребления и воспроизводства концентрации биоресурса, когда выполняется условие $TX_{acc} > TX^*_{acc}$ и используется фонд новых технологий для очистки берегового стока от загрязнений. Для этого перепишем его в виде:

$$R(t) = IF\{BD > BD^*; 1; IF[TX_{acc} < TX^*_{acc}; \exp(-\alpha_R \tau)]; \\ R(t) + [1 - R(t)][1 - \exp(-\beta_R \tau)]\}. \quad (9)$$



Р и с . 1 . Схема причинно-следственных связей адаптивной модели управления потреблением возобновляемых ресурсов прибрежной зоны моря.

Уравнения адаптивной модели эколого-экономической системы потребления биоресурса прибрежной зоны моря были построены на основе ее концептуальной модели (рис.1) и стандартных уравнений АВС-метода (3). Для краткости выпишем только их правые части, используя общие обозначения для функционалов внутрисистемных и внешних влияний $F_{u_i}(a_{ij}u_j, A_i)$ и для агентов управления $AG_{u_i}(u_i, u_j)$:

$$\begin{aligned}
F_{DM} &= a_{DM/PP}(PP - C_{PP}) + (DM^* - C_{DM}); \\
F_V &= AG_V(P, E) + AG_V(BD, BD^*) - a_{V/DM}(D - C_{DM}), \\
AG_V(P, E) &= IF\{P > E; 0; V_E^*[1 - \exp(-b_V \tau)]\}, \\
AG_{BD}(BD, BD^*) &= IF\{BD > BD^*; 0; V_{BD}^*[1 - \exp(-b_{BD} \tau)]\}; \quad (10) \\
F_{PL} &= -a_{PL/V}(V - C_V) + AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*), \\
AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*) &= a_{PL/TX_{acc}} IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; 0; PL[1 - \exp(-b_{PL_{TX}} \tau)]\}, \\
F_{TX} &= -a_{TX/PL}(PL - C_{PL}) - AG_{TX/PL}(PL, PL^*) - AG_{TX/BD}(BD, BD^*) + TX^*, \\
AG_{TX/PL^*}(PL, PL^*) &= IF\{PL < PL^*; 0; a_{TX/PL^*}(PL - PL^*)[1 - \exp(-b_{TX/PL^*} \tau)]\}, \\
AG_{TX/BD}(BD, BD^*) &= IF\{BD > BD^*; 0; a_{TX/BD}(BD^* - BD)[1 - \exp(-b_{TX/BD} \tau)]\} \\
F_E &= -a_{E/TX}(TX - C_{TX}) + E^*, \\
F_P &= -a_{P/N_a}(N_a - C_{N_a}) - a_{P/N_n}(N_n - C_{N_n}) + a_{P/Z}(Z - C_Z) - a_{P/DYN}DYN, \\
F_Z &= -a_{Z/B}(B - C_B) - a_{Z/D}(D - C_D) - a_{Z/P}(P - C_P) - a_{Z/DYN}DYN; \\
F_B &= -a_{B/N_a}(N_a - C_{N_a}) - a_{B/N_d}(N_d - C_{N_d}) - a_{B/DYN}DYN; \\
F_D &= -a_{D/P}(P - C_P) - a_{D/Z}(Z - C_Z) - a_{D/DYN}DYN; \\
F_{N_a} &= a_{N_a/P}(P - C_P) + a_{N_a/B}(B - C_B) - a_{N_a/Z}(Z - C_Z) - a_{N_a/DYN}DYN; \\
F_{N_n} &= a_{N_n/P}P - a_{N_n/DYN}DYN; \\
F_{N_d} &= -a_{N_d/P}(P - C_P) - a_{N_d/Z}(Z - C_Z) - a_{N_d/D}(D - C_D) + \\
&+ a_{N_d/B}(B - C_B) - a_{N_d/DYN}DYN \\
F_{BD} &= AG(M_{BD}) + a_{BD/S}S.
\end{aligned}$$

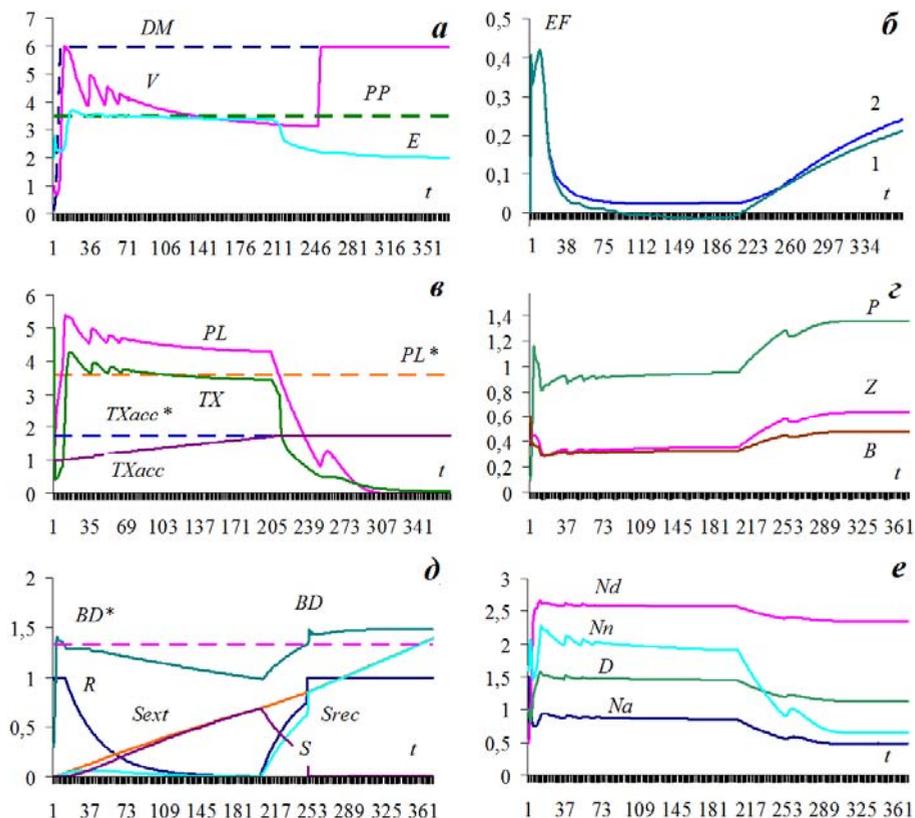
Звездочками в выражениях (10) отмечены заданные константы моделируемых процессов, через *DYN* обозначено внешнее влияние динамики морской среды на концентрации моделируемых веществ в данной экосистеме. Агент $AG(M_{BD})$ в уравнении для концентрации биоресурса обеспечивал лимитирование индекса биоразнообразия по минимальной концентрации живых объектов экосистемы [4, 5].

Для определения эффективности потребления биоресурса использовалась интегральная оценка в виде логарифма отношения доходов экономической системы $I_{acc}(t)$, к расходам $E_{acc}(t)$, накопленным за период времени $(0, t)$:

$$\begin{aligned}
I_{acc} &= \int_0^t P^*V(t)dt, \quad E_{acc} = \int_0^t E(t)V(t)dt, \\
EF &= \ln \frac{1 + I_{acc}}{1 + E_{acc}}, \quad TX_{acc}(t) = \int_0^t TX(\tau)d\tau. \quad (11)
\end{aligned}$$

Влияние динамики морской среды на сценарии эколого-экономических процессов потребления и воспроизводства биоресурса. Изменение температуры моря, а также перенос и диффузия водных масс должны оказывать влияние на концентрацию биоресурса в морской среде. С целью оценить чувствительность модели управления (3) – (11) к влиянию этих динамических факторов были проведены вычислительные эксперименты, результаты которых суммированы на рис.2 и 3. На рис.2 приведены сценарии процессов, полученные без учета динамики морской среды. Был установлен режим потребления биоресурса, сопровождающийся в начале эксперимента значительным загрязнением морской среды PL и высокими штрафами TX (рис.2, в), а также повышенной себестоимостью продукции E по сравнению с ее ценой PP . Это обусловило объемы выпуска продукции V существенно ниже спроса на нее D (рис.2, а) и низкую рентабельность производства (сценарий 1 на рис.2, б). Скорость воспроизводства биоресурса существенно отставала от скорости потребления, дефицит воспроизводства ресурса $S(t) > 0$ возрастал, а индекс биоразнообразия BD опустился ниже предельно допустимого значения BD^* (рис.2, д).

На 200-ом шаге эксперимента средства, накопленные в фонде новых технологий TX_{acc} , достигли величины TX^*_{acc} и был включен режим очистки стока от загрязнений. В результате резкого падения концентрации загрязне-



Р и с . 2 . Сценарии эколого-экономических процессов потребления биоресурса морской среды без учета влияния динамических процессов.

ний PL (рис.2, $в$). Произошли существенные изменения в сценариях всех превысил порог допустимых значений (рис.2, $д$), а объем выпускаемой продукции достиг величины спроса на нее (рис.2, $а$). Реакция концентраций процессов. Скорость воспроизводства концентрации биоресурса резко пошла вверх и на 250-ом шаге вычислений сравнялась по величине со скоростью потребления (рис.2, $д$). Индекс биоразнообразия в этот момент времени биохимических элементов экосистемы на падение уровня загрязнения морской среды приведена на рис.2, $з, е$.

В следующем эксперименте, результаты которого приведены на рис.3, было имитировано влияние динамических факторов морской среды на процессы потребления и воспроизводства биоресурса. Считалось, что изменения температуры, перенос и диффузия водных масс независимо друг от друга и в равной степени влияют на концентрации всех компонентов экосистемы. Поэтому их суммарное влияние было учтено путем добавления в правые части уравнений, описывающих эти концентрации, функции $DYN(t)$, показанной на рис.3, $б$.

Изменения концентраций компонентов экосистемы, показанные на рис.3, $з, е$, привели к значительным колебаниям индекса биоразнообразия относительно уровня BD^* (рис.3, $д$), что отразилось на сценарии биоресурсной емкости $R(t)$. Синхронно с изменениями этой функции скорость вос-

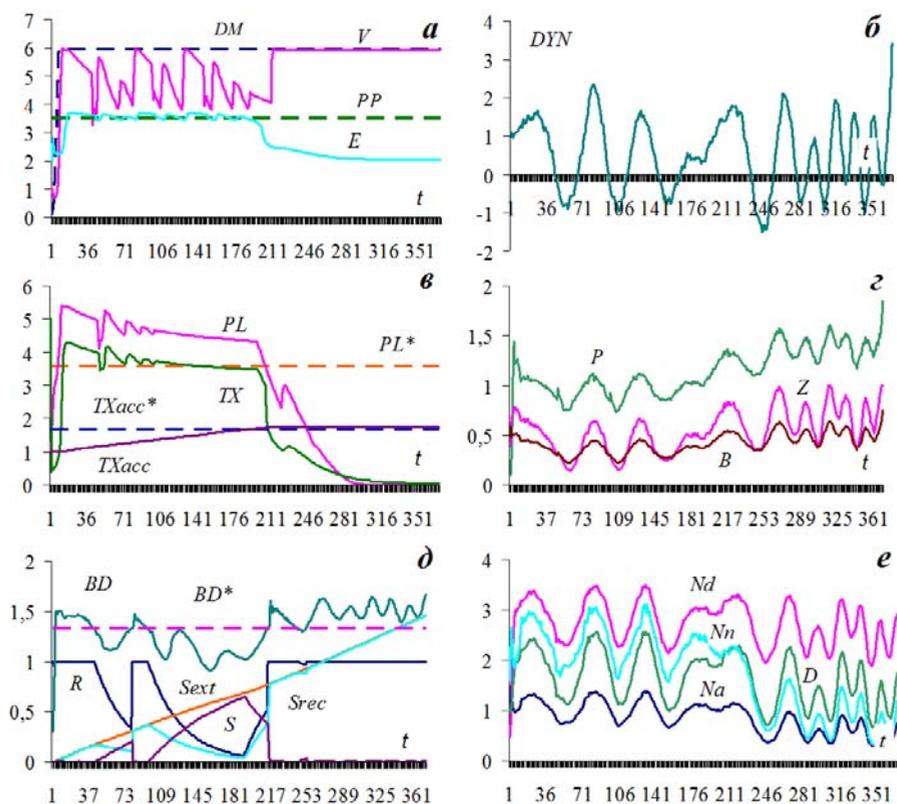


Рис. 3. Сценарии эколого-экономических процессов потребления биоресурса морской среды с учетом влияния динамических процессов.

производства концентрации биоресурса отставала от скорости ее потребления. Следствием этого явился сложный сценарий выпуска продукции $V(t)$ (рис.3, а): он испытывал значительные колебания, благодаря контролю над уровнем биоразнообразия, который осуществлял агент $AG_1(BD, BD^*)$. В итоге рентабельность производства в этом эксперименте (сценарий 2 на рис.3, б) оказалась несколько выше, чем в предыдущем (сценарий 1 на рис.2, б).

Заключение. Результаты проведенных экспериментов показали, что использование концепции ресурсной емкости морской среды и применение агентов управления, контролирующих режимы потребления возобновляемых ресурсов, позволяет создавать адаптивные модели эколого-экономических систем рационального природопользования в прибрежной зоне моря. Уравнения адаптивных моделей сохраняют материальные балансы реакций взаимодействия веществ в морских экосистемах, что дает возможность оценивать коэффициенты влияния, выражающие эти взаимодействия, через нормированные отношения средних значений моделируемых процессов. Проведенные исследования позволили оценить степени влияния динамических процессов в морской среде на сценарии эколого-экономических процессов потребления биоресурсов.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-214-0010 «Комплексные междисциплинарные исследования океанических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем Черного и Азовского морей на основе современных методов контроля состояния морской среды и гридтехнологий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daly H., Farley J.* Ecological Economics: Principles and Applications. 2-nd ed.– Washington DC: Island Press, 2010.– 544 p.
2. *Ivanov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E.* Coastal Zone Resources Management.– Kiev: Academperiodica, 2012.– 304 p.
3. *Voinov A.* Systems science and modeling for ecological economics.– Academic Press, 2008.– 430 p.
4. *Timchenko I.E., Igumnova E.M., Timchenko I.I.* Adaptive balance models for environmental-economic systems.– Create Space Independent Publishing Platform, 2016.– 486 p.
5. *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.
6. *Pears D., Moran D.* The Economic Value of Biodiversity.– London.: Earthscan Publications, 1994.– 172 p.
7. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000.– 225 с.
8. *Fasham, M., Ducklow, H., McKelvie, S.* A Nitrogen-Based Model of Plankton Dynamics in the Oceanic Mixed Layer // J. Mar. Res.– 1990.– 48 (3).– P.591-639.

Материал поступил в редакцию 15.01.2018 г.

E.M.Igumnova, I.E.Timchenko

MANAGEMENT OF RENEWABLE RESOURCES CONSUMPTION IN THE COASTAL SEA AREA

The method of adaptive balance of causes is applied to develop a model for managing the balance of consumption and reproduction of coastal zone marine resources. An adaptive model of the ecological and economic system has been built, which links the economic indicators of the use of renewable resources with the balance of their consumption and reproduction rates. A method is proposed for estimating the coefficients of the model from the normalized ratios of the mean values of the simulated processes. The management of resource consumption is based on the use of a variety of management agents controlling the ecological state of the marine environment and imposing economic sanctions on the production for its marine pollution wastes. An example of an ecological- economic control system for the marine bioresource concentration management is given. Scenarios of processes in this system without taking into account and taking into account the influence of marine environment dynamics have been constructed. It is shown that the biodiversity index and the marine bioresource capacity agent can be effectively used for the integral control over the volumes of bioresource consumption and reproduction.

KEYWORDS: method of adaptive balance of causes, conservation of material balances, normalized coefficients of causes, adaptive control model, influence of marine environment dynamics