

## Управление балансом потребления и воспроизводства ресурсов морской среды в эколого-экономической системе «берег – море»

И. Е. Тимченко , Е. М. Игумнова, С. В. Свищев

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

 *timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 09.07.2020 г.

*Цель.* Построить адаптивную модель эколого-экономической системы прибрежной зоны моря, предназначенную для управления объемами потребления морских ассимиляционных и биологических ресурсов береговой социально-экономической системой – целью данной работы.

*Методы и результаты.* Предложена модель, основанная на слежении за интегральным балансом скоростей загрязнения морской среды и очищения ее от загрязнений вследствие природных физических и биогеохимических процессов, а также в результате природоохранных действий. Применена концепция стационарного состояния морской экосистемы, в качестве которой использованы средние многолетние значения ее переменных. Для условий формирования области загрязнения прибрежной морской среды предложен алгоритм, учитывающий соотношение скоростей роста концентрации загрязнителей, поступающих от берегового источника, и их деструкции вследствие естественных механизмов очищения морской среды. Управление береговым стоком загрязнений осуществлялось путем наложения штрафных санкций на экономическую систему, которая была вынуждена сокращать выпуск обобщенного продукта при увеличении его себестоимости. В модели морской экосистемы были использованы нижние звенья пищевой цепи: концентрации фитопланктона, зоопланктона и бактериопланктона. Их взвешенная сумма составляла индекс биоразнообразия морской среды, который был принят за концентрацию биоресурса, потребляемого береговой экономической системой. Считалось, что между индексом биоразнообразия и концентрацией загрязнителей существует обратная зависимость. Поэтому ориентировочный допустимый уровень концентрации загрязнителей оценивался по величине допустимых значений индекса биоразнообразия. Наряду с контролем экономической рентабельности потребления морских ресурсов в модели предусмотрено слежение за тем, чтобы индекс биоразнообразия не опускался ниже допустимых значений. В этом случае агент управления, включенный в модель, ограничивал производство. Уравнения модели построены методом адаптивного баланса влияний, который сохранял материальные балансы реакций взаимодействия как экологических, так и экономических процессов. Модульные уравнения метода позволили использовать известное стационарное состояние экосистемы для получения оценок коэффициентов влияний. Показано, что прогнозируемые сценарии обеспечивают нахождение компромиссов между рентабельностью производства береговой экономической системы и способностью морской экосистемы восстанавливать потребляемые ассимиляционные и биологические ресурсы.

*Выводы.* Предложенная модель позволяет прогнозировать сценарии эколого-экономических процессов, обеспечивающие баланс потребления и воспроизводства ресурсов морской среды.

**Ключевые слова:** адаптивная модель управления, ассимиляционные и биологические ресурсы, береговая экономическая система, морская экосистема, адаптивный баланс влияний, загрязнение морской среды, индекс биоразнообразия, агенты управления стоком, прогнозируемые сценарии, влияние динамики моря

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей». Вычислительные эксперименты с моделью эколого-экономической системы «берег – Севастопольская бухта» проведены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Севастополя в соответствии с грантом № 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:** Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Свищев С. В. Управление балансом потребления и воспроизводства ресурсов морской среды в эколого-экономической системе «берег – море» // Морской гидрофизический журнал. 2021. Т. 37, № 2. С. 258–274. doi:10.22449/0233-7584-2021-2-258-274

## Managing the Balance of Consumption and Reproduction of Marine Resources in the “Coast – Sea” Ecological-Economic System

I. E. Timchenko ✉, E. M. Igumnova, S. V. Svishchev

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia*  
✉ [timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru](mailto:timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru)

*Purpose.* The work is aimed at constructing an adaptive model of the ecological-economic system of the sea coastal zone intended to control the volume of consumption of marine assimilation and biological resources by the coastal socio-economic system.

*Methods and Results.* The model based on tracking the integral balance of the rates of marine environment pollution and its purification due to the natural physical and biogeochemical processes and to the environmental actions is proposed. The average multi-year values of the ecosystem variables are used in the applied concept of stationary state of the marine ecosystem. To describe the conditions forming the polluted area in the coastal marine environment, proposed is the algorithm taking into account the ratio between the rate of growth of concentration of the pollutants inflowing from the coastal sources and the rate of their destruction resulting from natural purification of marine environment. Coastal pollution runoff was managed by the penalties imposed on the economic system, which was forced to reduce the generalized product output simultaneously increasing its prime cost. In the marine ecosystem model, the main lower links of the food chain were used: concentrations of phytoplankton, zooplankton and bacterioplankton. Their weighted sum constituted the marine biodiversity index, which was taken as a concentration of bio-resource consumed by the coastal economic system. It was believed that there was an inverse relationship between the biodiversity index and the pollution concentration. Therefore, the maximum permissible pollution concentration was assessed based on the permissible values of the biodiversity index. Along with control of the economic efficiency of marine resource consumption, the model provided for the biodiversity index monitoring so that it did not fall below its permissible values. In this case, the management agent included in the model, limited production. The model equations are constructed by the method of adaptive balance of causes, which preserved the material balances resulting from the interaction between the environmental and economic processes. The modular equations of the method permitted to use the known stationary state of the ecosystem to obtain the estimates of the influence coefficients. It is shown that the forecasted scenarios provide the compromises between the efficiency of the coastal economic system and the ability of marine ecosystem to restore the consumed assimilation and biological resources.

*Conclusions.* The proposed model makes it possible to forecast the scenarios of the ecological and economic processes that provide a balance of consumption and reproduction of marine resources.

**Keywords:** adaptive management model, assimilation and biological resources, coastal economic system, marine ecosystem, adaptive balance of causes, marine pollution, biodiversity index, runoff management agents, forecasted scenarios, influence of sea dynamics

**Acknowledgements:** The research was carried out within the framework of the state task on theme No. 0827-2018-0004 “Complex interdisciplinary investigations of the oceanology processes conditioning functioning and evolution of the Black and Azov seas’ ecosystems of coastal zones”. The computational experiments using the model of the ecological-economic system “coast – Sevastopol Bay” were performed at the RFBR and Sevastopol government financial support within the framework of scientific project No. 18-47-920001 “Research of the principles of constructing adaptive models of ecological-economic systems and digital information technologies for managing scenarios of sustainable development of natural-economic complexes in the Sevastopol region”.

**For citation:** Timchenko, I.E., Igumnova, E.M. and Svishchev, S.V., 2021. Managing the Balance of Consumption and Reproduction of Marine Resources in the “Coast – Sea” Ecological-Economic System. *Physical Oceanography*, [e-journal] 28(2), pp. 238-254. doi:10.22449/1573-160X-2021-2-238-254

## Введение

Жилищное строительство, развитие промышленности, сельского хозяйства и другие формы интенсивного освоения приморских территорий увеличивают береговой сток загрязнений в море и стимулируют рост объемов потребления морских ресурсов прибрежной зоны моря. Это ведет к изменению экологического состояния морской среды. Поэтому одна из главных задач экологической экономики прибрежной зоны заключается в управлении балансом потребления и воспроизводства морских ресурсов [1–3].

Проблеме контроля за состоянием морских ресурсов посвящено большое количество научных работ. В наиболее общей постановке эта проблема рассмотрена в моделях социальных эколого-экономических систем прибрежной зоны моря [4–10]. Важным аспектом этих исследований стала оценка возможности сложной морской экосистемы воспроизводить свое равновесное экологическое состояние при антропогенной нагрузке. В работах [11–14] был развит системный подход к интегральному контролю баланса скоростей загрязнения и самоочищения морской среды от загрязнений, поставляемых в море береговой экономической системой. Этот подход основан на применении системного принципа взаимной адаптации процессов в эколого-экономических системах «берег – море» друг к другу и к внешним влияниям. Он позволяет контролировать допустимые объемы ресурсов, изымаемые из морской среды в целях хозяйственного использования. В частности, была предложена адаптивная модель эколого-экономической системы «берег– море», в которой управление интенсивностью потребления морских биологических и ассимиляционных ресурсов поставлено в зависимость от экологических параметров – индекса биоразнообразия и уровня загрязнения морской среды [12].

Цель настоящей работы заключается в построении адаптивной модели управления эколого-экономическими процессами потребления и воспроизводства ассимиляционных и биологических ресурсов морской среды с применением новой модели формирования концентрации загрязнителей в море, поступающих с береговым стоком.

## Методы и результаты

Ассимиляционная емкость морской среды была определена как предельно возможная скорость самоочищения от загрязнений, при которой в морской экосистеме еще не начинаются необратимые изменения, препятствующие ее

возвращению в равновесное стационарное состояние. В общем случае ресурсная емкость была представлена предельным значением скоростей изъятия и восстановления концентрации конкретного вида ресурсов, когда эти скорости еще равны, но уже находятся на верхней границе их возможных значений.

Для построения динамической модели контроля над потреблением и воспроизводством морских ресурсов введены количественные меры потребляемого ресурса в единице объема морской среды: индекс биоразнообразия ( $BD$ ) для биоресурса и индекс уровня загрязнения ( $PL$ ) для ассимиляционного ресурса. Множество положительных и отрицательных факторов, формирующих сценарии изменения концентрации каждого вида ресурсов, определило схему причинно-следственных связей модели морской экосистемы. Концентрация ресурса была выражена взвешенной суммой концентраций тех веществ, которые входят в уравнение материального баланса, образующего данный вид ресурса в конкретном объеме среды. Динамическая модель экосистемы состоит из дифференциальных уравнений метода адаптивного баланса влияний [11], сохраняющих указанные материальные балансы. Поэтому в задачи исследований входят разработка метода определения коэффициентов влияний в уравнениях адаптивной модели морской экосистемы и проведение вычислительных экспериментов для проверки адекватности предлагаемой модели имеющимся представлениям о влиянии берегового стока загрязнений на сценарии эколого-экономических процессов в прибрежной зоне моря.

Известно общее свойство адаптации природных экосистем к внешним воздействиям, оно выражается в стремлении системы к сохранению состояния устойчивого равновесия, при котором существует баланс сил (влияний) и поддерживается динамический режим «действие равно противодействию». В адаптивных моделях морских экосистем равенство скоростей изъятия ресурса и его воспроизводства обеспечивается отрицательной обратной связью между количеством изымаемого ресурса и его воспроизводства. Уменьшение концентрации ресурса вызывает (в определенных пределах) увеличение скорости его воспроизводства до уровня, компенсирующего возросшую скорость изъятия ресурса.

### **Интегральная модель формирования сценария изменения концентрации загрязнителей морской среды**

Рассмотрим один из возможных вариантов интегральной модели формирования сценария изменения концентрации загрязнителей в прибрежной морской среде, которые поступают от распределенного берегового источника. В этом случае речь идет о потреблении ассимиляционного ресурса морской среды и ее ассимиляционной емкости. Изменения концентрации являются результатом двух противоположных процессов – накопления загрязнений и самоочищения от них благодаря биохимической деструкции. С целью упрощения можно считать, что индекс уровня загрязнения представлен концентрацией  $PL$  одного конкретного вида загрязняющего вещества.

Предположим, что в ограниченный объем морской среды с постоянной (фоновой) концентрацией загрязнителей  $PL_n$  начал поступать поток загрязняющего вещества, имеющий концентрацию  $PL_A$ . Тогда сценарии изменения

концентрации загрязнителей в объеме среды начнут формироваться по некоторому закону. Будем считать, что этот закон определяется двумя основными факторами: перемешиванием, равномерно распространяющим загрязнители по всему объему среды, и биохимическими реакциями разложения загрязнителей, происходящими в морской экосистеме. Примем также  $PL_n \ll PL_A$ , т. е. фоновая концентрация загрязнителей  $PL_n$  в море много меньше концентрации загрязнителей в поступающих в море стоках  $PL_A$ . Принятые допущения означают, что концентрация загрязнителей в морской среде изменяется в пределах  $PL_n \leq PL \leq PL_A$ .

Без учета биохимических реакций самоочищения, разлагающих загрязнение, концентрация  $PL^{(+)}(t)$  будет увеличиваться за счет динамики морской среды от начального значения  $PL_n$  до значения  $PL_A$  по экспоненциальному закону с насыщением:

$$PL^{(+)}(t) = PL_n + [PL_A - PL_n][1 - \exp(-\alpha t)]. \quad (1)$$

Показатель экспоненты  $\alpha$  определяет скорость роста концентрации загрязнителей в море под влиянием молекулярной и турбулентной диффузии, т. е. скорость потребления источником загрязнения (береговой социально-экономической системой) ассимиляционного ресурса морской среды.

Одновременно с этим процессом биохимические реакции самоочищения среды будут стремиться вернуть концентрацию загрязнителей к равновесному фоновому значению  $PL_n$ , уменьшая ее от  $PL^{+}(t)$  до  $PL_n$ . При этом скорость воспроизводства ассимиляционного ресурса будет определять параметр  $\beta$  в формуле

$$PL(t) = PL^{(+)}(t) + [PL_n - PL^{(+)}(t)][1 - \exp(-\beta t)]. \quad (2)$$

С учетом переменной мощности источника загрязнения концентрация загрязнителей является функцией времени  $PL_A(t)$ . Подставляя в (2) вместо  $PL^{(+)}(t)$  его выражение (1), получим общий закон изменения концентрации загрязнителей в море под влиянием как динамических, так и биохимических факторов:

$$PL(t) = PL_n + [PL_A(t) - PL_n][1 - \exp(-\alpha t)]\exp(-\beta t). \quad (3)$$

Таким образом, динамический баланс скоростей загрязнения и самоочищения среды определяется параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ , которые устанавливают скорости потребления и воспроизводства ассимиляционного ресурса. При постоянном источнике загрязнения морской среды  $PL_A$ , дифференцируя последнее равенство и приравнявая производную нулю, найдем условие, связывающее время достижения максимальной концентрации загрязнителей со скоростями потребления и воспроизводства ассимиляционного ресурса:

$$t^* = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{\alpha + \beta}{\beta}. \quad (4)$$

В стационарном состоянии экосистемы, когда скорости потребления и воспроизводства ассимиляционной емкости совпадают ( $\alpha = \beta$ ), время достижения максимума концентрации загрязнителей  $PL_A$  составляет  $t^* = \alpha^{-1} \ln 2$  условных единиц.

Предлагаемый механизм формирования сценария изменения концентрации загрязнителей должен существовать в пределах возможностей экосистемы сопротивляться росту загрязнения, когда концентрация загрязнителей не превышает ориентировочный допустимый уровень  $PL^*$ . Эта величина является критической по определению, поскольку при ней скорость воспроизводства индекса биоразнообразия морской среды начинает отставать от скорости его потребления. Когда уровень загрязнения превышает значение  $PL^*$ , начинается ослабление биохимических реакций разрушения загрязнений, что может стать причиной деградации морской экосистемы. Естественно предположить, что при  $PL(t) \geq PL^*$  скорость самоочищения от загрязнений будет уменьшаться. Для того чтобы учесть это обстоятельство, необходимо включить в формулу (2) агент управления  $\beta(\tau)$ , который будет замедлять скорость биохимического самоочищения путем изменения величины коэффициента  $\beta$ , когда  $PL > PL^*$ :

$$PL(t) = PL_n + [PL_A(t) - PL_n][1 - \exp(-\alpha t)] \exp[-\beta(\tau)t], \quad (5)$$

$$\beta(\tau) = \beta^* IF[PL < PL^*; 1; \exp(-\gamma\tau)], \quad (6)$$

где  $\beta^*$  – параметр в стационарном состоянии экосистемы.

Таким образом, динамика уровня загрязнения ограничена сегментами значений  $0 \leq PL(t) \leq PL^* \leq PL_A$ , пределы которых зависят от соотношения скоростей потребления и воспроизводства ассимиляционного ресурса морской среды.

### Управление скоростью самоочищения в уравнении концентрации загрязнителей

Выражение (3) может быть использовано в качестве внешнего источника влияния в правой части динамического уравнения концентрации загрязнителей, построенного методом адаптивного баланса влияний [11]. В адаптивном уравнении скорость изменения концентрации загрязнителей связана отрицательной обратной связью второго порядка [13, 14] с самой концентрацией:

$$\frac{dPL}{dt} = 2r_{PL}PL\{C_{PL} - [PL - (A_{PL} - C_{PL})]\}, \quad (7)$$

где  $r_{PL}$  – относительная скорость изменения концентрации  $PL$ ;  $A_{PL}$  – внешний источник, отклоняющий эту концентрацию от стационарного (среднего) значения  $C_{PL}$ .

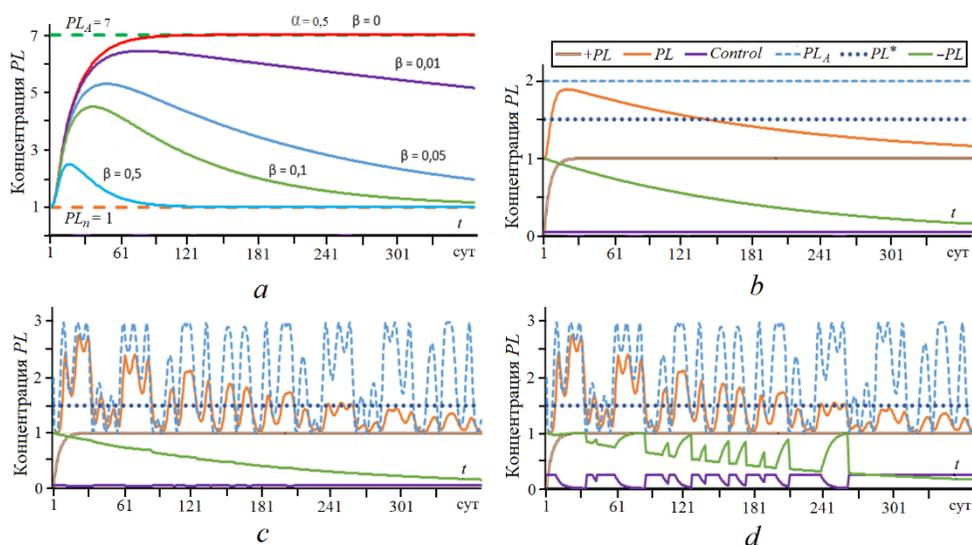
Будем считать, что в начальный момент времени концентрация загрязнителей имеет стационарную фоновую величину  $PL_n = C_{PL}$ , которая соответствует средним многолетним значениям ( $C_i$ ) переменных модели ( $u_i$ ) морской экосистемы. Тогда из формулы (3) определится внешний источник загрязнения  $A_{PL}$  в уравнении (4) и оно примет следующий вид:

$$\frac{dPL}{dt} = 2r_{PL}PL(C_{PL} - \{PL - [PL_A(t) - C_{PL}][1 - \exp(-\alpha t)]\exp[-\beta(\tau t)]\}). \quad (8)$$

Для проверки предложенной модели формирования сценария изменения концентрации загрязнителей проведены вычислительные эксперименты. Уравнение (8) представлено в конечных разностях с интервалом дискретизации по времени  $\Delta t$ . Для упрощения алгоритма решения было принято дополнительное условие  $2r_{PL}C_{PL}\Delta t = 1$ , которое всегда можно удовлетворить выбором интервала времени  $\Delta t$ . В итоге был предложен следующий итерационный процесс:

$$PL^{k+1} = 2PL^k \left( 1 - (2C_{PL})^{-1} \{ PL^k - [PL_A^k - C_{PL}][1 - \exp(-\alpha \Delta t k)] \exp[-\beta(\Delta t l) \Delta t k] \} \right). \quad (9)$$

На рис. 1 приведены сценарии изменения концентрации загрязнителей, полученные при различных условиях. Как следует из формулы (3), при постоянных коэффициентах  $\alpha$  и  $\beta$  эти сценарии имеют единственный максимум, положение которого определяет выражение (4). Концентрации загрязнителей должны стремиться к стационарному значению  $PL_n = C_{PL}$  при  $t \rightarrow \infty$ .



**Рис. 1.** Изменение концентрации загрязняющих веществ  $PL$  в морской среде при постоянном ( $a, b$ ) и переменном ( $c, d$ ) источниках загрязнения  $PL_A$  по сценариям, согласно которым: скорости самоочищения среды различны ( $a$ ); управление скоростью самоочищения среды (график *Control*) выключено ( $b, c$ ); управление включено ( $d$ )

**Fig. 1.** Change of the pollutants  $PL$  concentration in the marine environment with constant ( $a, b$ ) and variable ( $c, d$ ) sources of pollution  $PL_A$  by the scenarios according to which: the speeds of the environment self-purification are different ( $a$ ); control of the environment self-purification speed (graph *Control*) is turned off ( $b, c$ ); control is on ( $d$ )

Этот вывод подтверждается семейством сценариев (рис. 1, *a*), полученных при различных скоростях самоочищения среды, когда стационарное значение концентрации загрязнителей, интенсивность источника и скорость роста концентрации в море постоянны. На рис. 1, *b – d* показаны графики функций (формирующих сценарии концентрации загрязнителей в море), которые имеют следующие обозначения:  $+PL$  – увеличение концентрации по формуле (1),  $-PL$  – уменьшение концентрации по формуле (2), *Control* – управление скоростью самоочищения экосистемы по формуле (6). Для имитации случайных вариаций концентрации загрязняющих веществ в море была использована случайная функция  $PL_A$ , изображенная на рис. 1, *c, d*. Из сравнения сценариев  $PL$  на рис. 1, *a, b* следует, что управление скоростью самоочищения экосистемы привело к росту загрязнения в периоды времени, когда  $PL(t) \geq PL^*$ . Таким образом, вычислительные эксперименты подтвердили правильность концепции формирования уровня загрязнения морской среды, заложенной в модели (8) – (9).

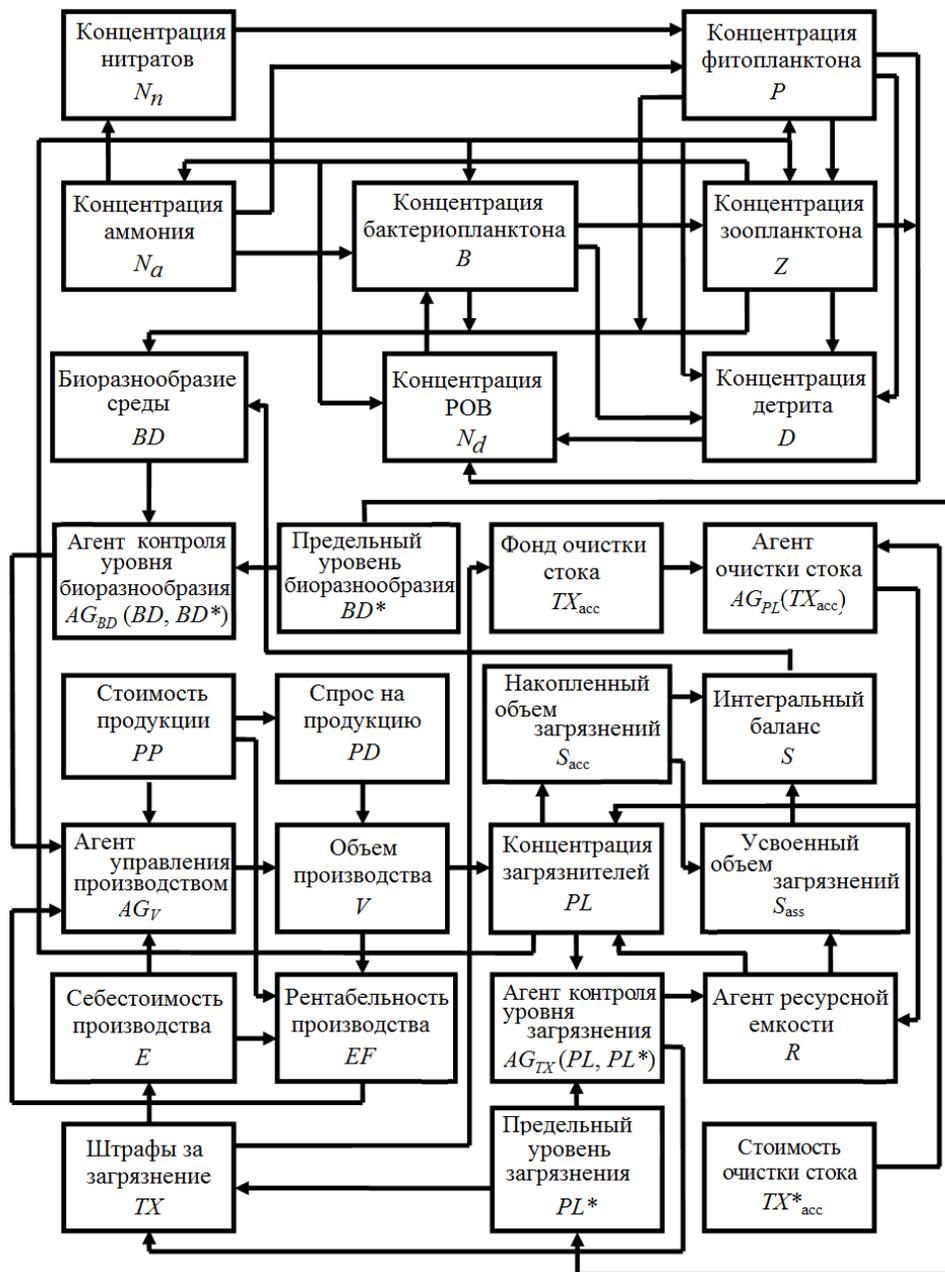
### Адаптивная модель управления эколого-экономической системой «берег – море»

Концептуальная модель управления балансом потребления и воспроизводства ассимиляционных и биологических ресурсов морской среды приведена на рис. 2. Модель состоит из двух связанных между собой подсистем – экономической («берег») и экологической («море»). Управление системой «берег – море» осуществляется агентами  $AG_V$  и  $AG_{BD}$ , которые контролируют экономическую рентабельность использования береговой социально-экономической системой ассимиляционной и биоресурсной емкостей морской среды [12] с учетом предложенной выше модели формирования уровня загрязнения моря.

Основное условие управления системой состоит в том, чтобы индекс биоразнообразия  $BD$  не опускался ниже ориентировочного допустимого значения  $BD^*$ , которое принято за «нормальное» экологическое состояние морской среды. Предполагается, что существует обратная функциональная связь между индексом биоразнообразия  $BD^*$  и ориентировочным допустимым уровнем загрязнения в море  $PL^*$ . Интегральный баланс накопленных и ассимилированных загрязнений  $S$  на интервале времени  $(0, t)$  контролирует агент ресурсной емкости морской среды  $R(t)$ :

$$R(t) = IF \left\langle \begin{array}{l} PL < PL^*; 1; IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; \exp(-\alpha_R \tau)\}; \\ R(t) + [1 - R(t)][1 - \exp(-\beta_R \tau)] \end{array} \right\rangle. \quad (10)$$

Логический оператор управления (10) следит за превышением уровня загрязнения  $PL^*$  с учетом различия скоростей накопления загрязнителей в блоке  $S_{acc}$  и их ассимиляции в блоке  $S_{ass}$  (рис. 2). Агент очистки морской среды от загрязнений активирует режим очистки стока, когда значение фонда очистки  $TX_{acc}$  превышает величину  $TX_{acc}^*$ .



**Р и с. 2.** Схема причинно-следственных связей в адаптивной модели управления балансом потребления и воспроизводства ассимиляционных и биологических ресурсов морской среды  
**F i g. 2.** Scheme of cause-effect relations in the adaptive model of managing the balance of consumption and reproduction of the assimilation and biological resources of marine environment

Система уравнений модели, описывающая изображенные на рис. 2 связи между элементами экосистемы  $u_i$ , состоит из  $n$  модульных уравнений метода адаптивного баланса влияний [12–14], которые имеют следующий общий вид:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - [u_i - \sum_{k=1, k \neq i}^m a_{ik} (u_k - C_k) + \sum_{l=m+1, l \neq i}^n a_{il} (u_l - C_l) - A_i] \right\}. \quad (11)$$

Для оценки коэффициентов влияний в (11) использовано предположение о том, что известны средние многолетние значения  $C_i$  всех переменных модели и интервалы изменчивости переменных имеют вид  $0 \leq u_i \leq 2C_i$ . Уравнения (11) описывают процессы адаптации продуктов  $u_i$  системы «берег – море» к ее ресурсам – положительным ( $u_k$ ) и отрицательным ( $u_l$ ). Процессы адаптации отражают реакцию модели системы на отклонения ее переменных от среднего (стационарного) состояния под влиянием внешних воздействий  $A_i$ . Коэффициенты влияний  $a_{ik}$  и  $a_{il}$  показывают, какое приращение концентрации продукта дает приращение влияющего на него ресурса:  $u_i - C_i = a_{ij}(u_j - C_j)$ . Предположение об известном стационарном состоянии системы «берег – море» позволяет ввести оценки коэффициентов влияний для этого состояния и распространить их на произвольные моменты времени с поправками на текущие значения переменных.

Для получения подобных оценок коэффициентов  $a_{ij}$  процессы  $u_j$ , влияющие на процесс  $u_i$ , приведены к размерности этого процесса путем следующего преобразования:  $u_i = a'_{ij} C_i C_j^{-1} u_j$ . Далее выполняется нормировка безразмерных множителей  $a'_{ij}$  с учетом текущих значений всех влияющих процессов. Тогда систему уравнений (11) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \{ & C_i - [u_i - 0,5 \sum_{j=1, j \neq i}^m C_j^{-1} u_j (\sum_{k=1, k \neq i}^m C_k^{-1} u_k)^{-1} C_i C_k^{-1} (u_k - C_k) + \\ & + 0,5 \sum_{j=m+1, j \neq i}^{n-m} C_j^{-1} u_j (\sum_{l=m+1, j \neq i}^{n-m} C_l^{-1} u_l)^{-1} C_i C_l^{-1} (u_l - C_l) - A_i \} \}. \end{aligned} \quad (12)$$

Уравнения для каждой переменной модели эколого-экономической системы с учетом внутрисистемных и внешних влияний, изображенных на рис. 2, имеют следующий вид:

$$\frac{dPP}{dt} = 2r_{PP} PP \{ C_{PP} - [PP - C_{PP} (a_{21} NO'_3 + a_{23} NH'_4 - a_{25} - a_{26} DON' - a_{27} D' - a_{28} PL'_Z)] \},$$

$$\frac{dZ}{dt} = 2r_Z Z \{ C_Z - [Z - C_Z (a_{21} P' + a_{23} B' - a_{25} NH'_4 - a_{26} DON' - a_{27} D' - a_{28} PL'_Z)] \},$$

$$\frac{dB}{dt} = 2r_B B \{ C_B - [B - C_B (a_{36} DON' - a_{32} Z' - a_{35} NH'_4 - a_{38} PL'_B)] \},$$

$$\frac{dNO_3}{dt} = 2r_{NO_3} NO_3 \{ C_{NO_3} - [NO_3 - C_{NO_3} (a_{45} NH'_4 + a_{46} DON' + a_{48} PL'_{NO_3})] \},$$

$$\begin{aligned} \frac{d\text{NH}_4}{dt} &= 2r_{\text{NH}_4} \text{NH}_4 \{ C_{\text{NH}_4} - [\text{NH}_4 - C_{\text{NH}_4} (a_{52}Z' + a_{53}B' + a_{56}DON' - a_{51}P' - \\ &- a_{54}\text{NO}'_3 + a_{58}PL'_{\text{NH}_4})] \}, \\ \frac{dDON}{dt} &= 2r_{DON} DON \{ C_{DON} - [DON - C_{DON} (a_{61}P' + a_{62}Z' + a_{67}D' - a_{63}B' - \\ &- a_{64}\text{NO}'_3 - a_{65}\text{NH}'_4 + a_{68}PL'_{DON})] \}, \\ \frac{dBD}{dt} &= 2r_{BD} BD \{ C_{BD} - [BD - AG_{BD}(PP, ZP, B)] \}, \end{aligned} \tag{13}$$

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

$$\frac{dD}{dt} = 2r_D D \{ C_D - [D - C_D (a_{71}P' + a_{72}Z' - a_{76}DON' + a_{78}PL'_D)] \},$$

$$\begin{aligned} \frac{dPL}{dt} &= 2r_{PL} PL \{ C_{PL} - \{ PL - [C_{PL} (a_{PL/V} C_V^{-1} V') - \\ &- C_{PL}] [1 - \exp(-\alpha t)] \exp[-\beta(\tau)t] + AG[TX_{\text{acc}}, TX_{\text{acc}}^*] \} \}, \end{aligned}$$

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

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

$$\frac{dPD}{dt} = 2r_{DP} PD \{ C_{DP} - (PD + a_{DP/PP} PP') \},$$

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

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

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

$$\frac{dTX}{dt} = 2r_{TX} TX \{ C_{TX} - [TX - C_{TX} C_{PL}^{-1} PL' - AG_{TX}(PL, PL^*) - AG_{TX}(BD, BD^*) - TX^*] \},$$

$$AG_{TX}(PL, PL^*) = C_{TX} IF\{PL < PL^*; 0; k_{TX1}[1 - \exp(-\alpha_{TX}\tau)]\},$$

$$AG_{TX}(BD, BD^*) = C_{TX} IF\{BD > BD^*; 0; k_{TX2}[1 - \exp(-\alpha_{TX}\tau)]\}.$$

Штрихами в уравнениях (13) обозначены отклонения переменных от своих средних значений, звездочками – заданные величины. Агент  $AG_{BD}(PP, ZP, B)$  в уравнении для индекса биоразнообразия лимитирует этот индекс по значению минимальной концентрации живых объектов экосистемы. Эффективность потребления ресурса морской среды оценивается интегрально

путем соотношения доходов экономической системы  $I_{acc}(t)$  и ее расходов  $E_{acc}(t)$  за период времени  $(0, t)$ :

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

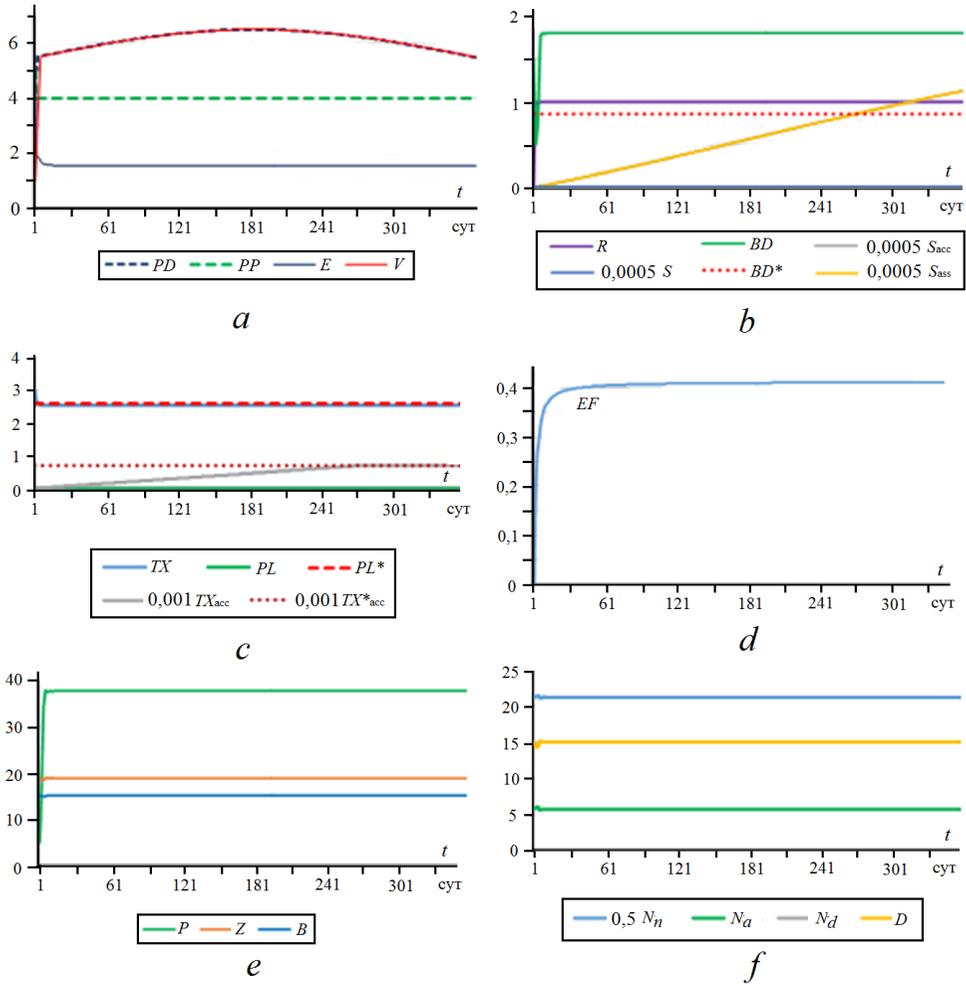
Коэффициенты влияний в уравнениях морской экосистемы вычислялись по нормированным отношениям средних значений, как это показано в системе уравнений (13).

### **Управление процессом очищения морской среды от загрязнений в адаптивной модели эколого-экономической системы «берег – Севастопольская бухта»**

Интегральное управление уровнем загрязнения морской среды береговым стоком в Севастопольскую бухту рассмотрено в работах [12–14] без учета предлагаемой в данном исследовании модели самоочищения среды в уравнении для концентрации загрязнителей. Для построения сценариев эколого-экономических процессов нами используются известные из многолетних наблюдений средние значения концентраций (в мгN/м<sup>3</sup>) моделируемых веществ в экосистеме бухты, которые были приняты за стационарное состояние экосистемы: фитопланктона – 37,74, зоопланктона – 18,87, бактериопланктона – 12,0, нитратов – 42,35, аммония – 5,60, растворенных органических форм азота – 18,0, детрита – 15,0. Примем, что береговая экономическая подсистема производит обобщенный продукт и направляет поток загрязнений в бухту, пропорциональный объему производства. Система уравнений записана в конечных разностях для построения итерационных циклов, аналогичных (9). Оценки коэффициентов влияний в уравнениях экосистемы бухты рассчитываются по нормированным отношениям средних значений переменных по формулам, использованным в системе уравнений (12). Применяется система безразмерных экономических переменных, приведенных к единой шкале  $(0, 10)$ . Вычисления выполняются на один год (365 шагов по времени).

На рис. 3 приведены сценарии эколого-экономических процессов в системе «берег – Севастопольская бухта», которые воспроизвела модель (12) – (14), когда не происходило загрязнения бухты береговой экономической подсистемой, а следовательно, отсутствовали контроль и управление уровнем загрязнения.

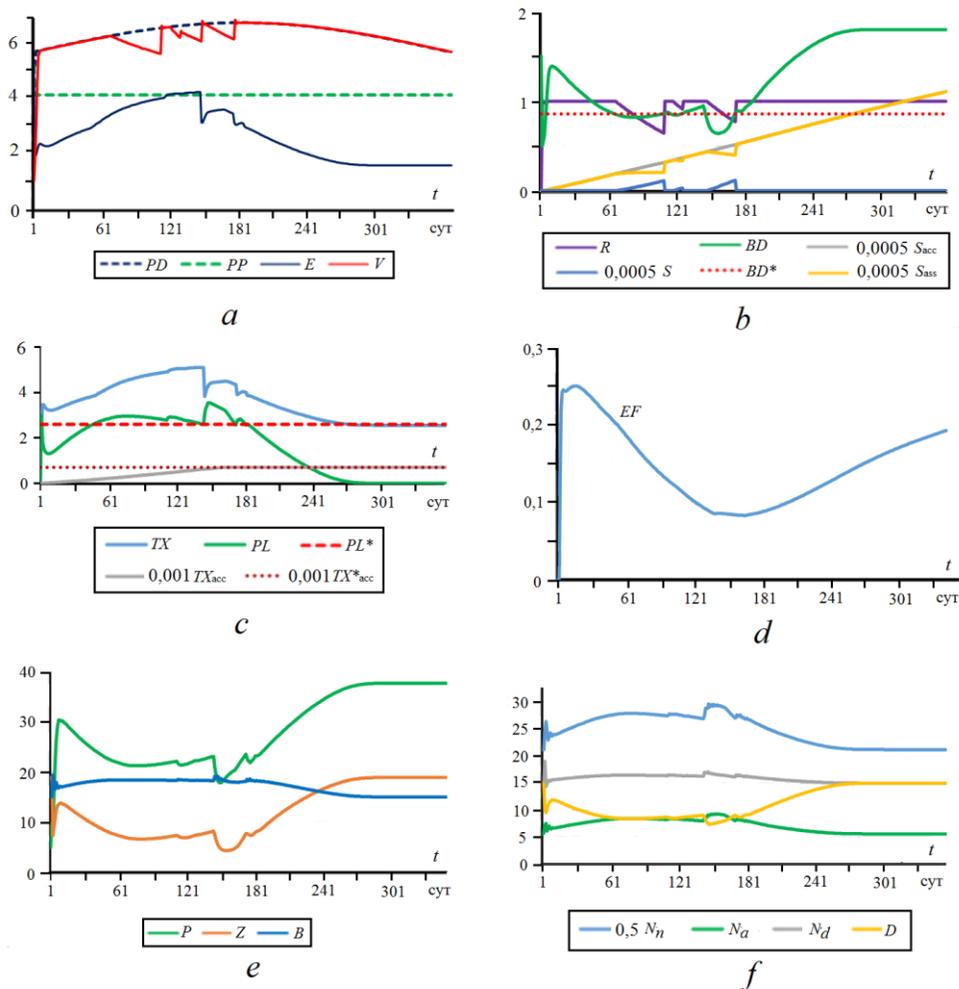
Выпуск продукции  $V$  повторяет заданный сезонный ход спроса на нее  $PD$  (рис. 3, *a*). Скорости потребления и воспроизводства ресурсов бухты равны, а значения индекса биоразнообразия  $BD$  существенно выше допустимого уровня  $BD^*$  (рис. 3, *b*). Несмотря на отсутствие загрязнений в бухте, в системе продолжает взиматься штраф за загрязнение, пропорциональный объемам производства. Он рассматривается как природоохранный налог, пополняющий фонд очистки стока от загрязнений  $TX_{acc}$  (рис. 3, *c*). Рентабельность производства достигает устойчивого максимума (рис. 3, *d*), а экосистема бухты находится в устойчивом стационарном состоянии (рис. 3, *e, f*).



**Р и с. 3.** Сценарии процессов в эколого-экономической системе «берег – Севастопольская бухта» при отсутствии загрязнения морской среды  
**F i g. 3.** Scenarios of the processes in the ecological-economic system "coast – Sevastopol Bay" in case the marine pollution is absent

В следующем эксперименте проводится проверка механизмов управления балансами потребления и воспроизводства ассимиляционных и биологических ресурсов морской среды по критериям уровня загрязнения и индекса биоразнообразия. С этой целью включаются механизмы контроля и управления уровнями загрязнения и биоразнообразия морской среды бухты, но без учета динамики морской среды. Результаты эксперимента показаны на рис. 4. Выпуск продукции  $V$  и связанный с ним поток загрязнений ограничены в первой половине эксперимента (рис. 4,  $a$ ,  $c$ ) по ряду причин. Первое ограничение происходит на 75-м шаге, когда индекс биоразнообразия опускается ниже значения  $BD^*$  (рис. 4,  $b$ ); второе – на 125-м шаге, когда штрафные санкции  $TX$  достигают максимальных значений (рис. 4,  $c$ ) и себестоимость производства  $E$  превышает стоимость обобщенного продукта  $PP$  (рис. 4,  $a$ ). Последующие ограничения

связаны с падением величины индекса биоразнообразия и с реакцией на это агента ресурсной емкости  $R(t)$  (рис. 4, *b*).



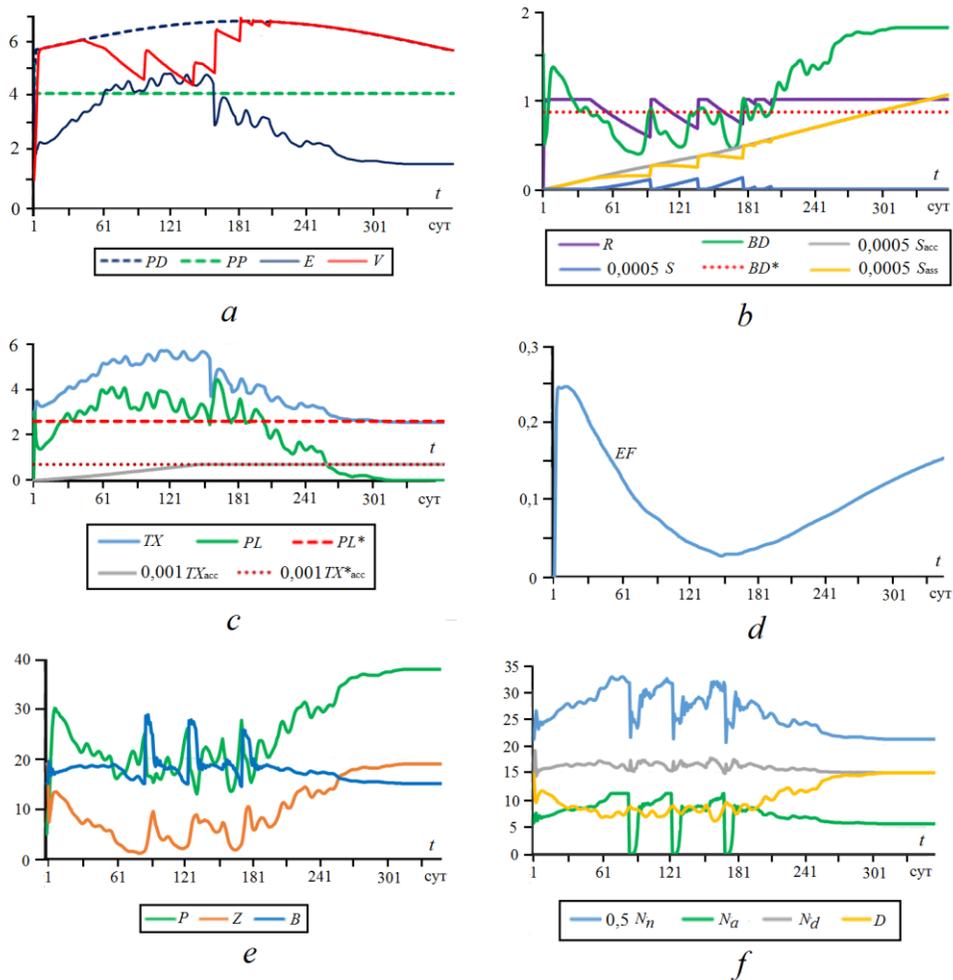
**Рис. 4.** Управление балансами потребления и воспроизводства ресурсов морской среды в эколого-экономической системе «берег – море» по критериям уровня загрязнения и индекса биоразнообразия без учета динамики морской среды. Режим очистки стока от загрязнений включен на 148-м шаге вычислений

**Fig. 4.** Managing the balance of consumption and reproduction of marine resources in the “coast – sea” ecological-economic system based on the criteria of the pollution level and the biodiversity index with no account of the marine environment dynamics. The runoff cleaning mode is on at the 148<sup>th</sup> step of calculations

Во второй половине эксперимента средств, накопленных в фонде очистки стока от загрязнений  $TX_{acc}$ , оказалось достаточно для начала режима очистки (рис. 4, *c*) и агент  $AG_{PL}(TX_{acc})$  на 148-м шаге включил этот режим. В результате концентрация загрязнителей резко убывает и в соответствии с формулами (6) и (8) скорость самоочищения увеличивается. В последующий период времени

процессы развития приобретают положительную динамику, поскольку выпуск продукции увеличивается до размеров сезонного спроса.

Вследствие сокращения штрафов (рис. 4, *c*) себестоимость производства уменьшается (рис. 4, *a*), а его рентабельность устойчиво растет (рис. 4, *d*). В итоге биохимические переменные модели экосистемы принимают свои стационарные значения (рис. 4, *e, f*).



**Р и с. 5.** Влияние динамики морской среды на балансы потребления и воспроизводства ее ассимиляционных и биологических ресурсов в эколого-экономической системе «берег – море» по критериям уровня загрязнения и индекса биоразнообразия

**F i g. 5.** Influence of marine environment dynamics on the balance of consumption and reproduction of its assimilation and biological resources in the “coast – sea” ecological-economic system based on the criteria of the pollution level and the biodiversity index

Влияние динамики морской среды на сценарии рис. 4 рассмотрено при проведении эксперимента, результаты которого показаны на рис. 5. Основное влияние на концентрацию загрязнителей в верхнем слое моря оказывают пере-

нос и диффузия водных масс, а также волновые процессы, вызванные случайными колебаниями модуля скорости ветра. Для имитации ветрового воздействия на концентрацию загрязнителей в уравнение для  $PL$  системы уравнений (13) добавлена случайная функция  $PL_a$ , использованная ранее в модели (8) формирования сценария изменения концентрации загрязнителей (рис. 1, *c, d*).

Из сопоставления сценариев эколого-экономических процессов на рис. 4, *c* и 5, *c* следует, что продолжительность периодов и величины превышения концентрацией загрязнителей ориентировочного допустимого уровня загрязнения  $PL^*$  становятся существенно выше. В соответствии с принятой моделью (5) – (6) скорости самоочищения морской среды при  $PL \geq PL^*$  замедляются. Как следствие, увеличиваются штрафы и себестоимость производства, что приводит к ограничению выпуска продукции и падению его рентабельности (рис. 5, *a, c, d*). Динамика концентрации загрязнителей заметно усложняет сценарии биохимических процессов в морской экосистеме (рис. 5, *e, f*). Это влечет за собой изменения индекса биоразнообразия  $BD$ . Заметим, что по определению агент биоразнообразия  $AG_{BD}(PP, ZP, B)$  в системе уравнений (13) реагирует на минимальные значения контролируемых им биологических переменных модели. Поскольку минимальные значения имеет сценарий изменения концентрации зоопланктона (рис. 5, *e*), сценарий индекса биоразнообразия формируется под влиянием этой концентрации (рис. 5, *b*).

### Заключение

Цель настоящей работы состояла в развитии адаптивной модели управления эколого-экономическими процессами потребления и воспроизводства ассимиляционных и биологических ресурсов морской среды. Эта цель достигнута путем применения дополнительного механизма управления скоростью очищения морской среды от загрязнений, который реагировал на изменения ее экологического состояния. Когда концентрация загрязнителей превышала значение ориентировочного допустимого уровня загрязнения, а индекс биоразнообразия опускался ниже своего допустимого уровня, специальный агент замедлял скорость самоочищения среды от загрязнений, поступающих с береговым стоком. Представлен переход экосистемы в режим нарушения баланса потребления и воспроизводства ассимиляционных и биологических ресурсов морской среды. Проверка предложенных механизмов управления береговым стоком путем анализа прогнозируемых сценариев уровня загрязнения и индекса биоразнообразия среды показывает, что они обеспечивают нахождение компромиссов между рентабельностью производства береговой экономической системы и способностью морской экосистемы восстанавливать потребляемые ассимиляционные и биологические ресурсы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daly H. E., Farley J.* Ecological Economics. Principles and Applications. Washington DC : Island Press, 2011. 512 p. URL: [http://library.uniteddiversity.coop/Measuring\\_Progress\\_and\\_Eco\\_Footprinting/Ecological\\_Economics-Principles\\_and\\_Applications.pdf](http://library.uniteddiversity.coop/Measuring_Progress_and_Eco_Footprinting/Ecological_Economics-Principles_and_Applications.pdf) (date of access: 22.03.2021).
2. 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

3. 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>
4. Changes in the global value of ecosystem services / R. Costanza [et al.] // *Global Environmental Change*. 2014. Vol. 26. P. 152–158. doi:10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002
5. Long R. D., Charles A., Stephenson R. L. Key principles of marine ecosystem-based management // *Marine Policy*. 2015. Vol. 57. P. 53–60. doi:10.1016/j.marpol.2015.01.013
6. Samhouri J. F., Levin P. S. Linking land- and sea-based activities to risk in coastal ecosystems. // *Biological Conservation*. 2012. Vol. 145. P. 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.10.021>
7. Cr'epin 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>
8. 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)
9. Филатов Н. Н., Дружинин П. В., Менишуткин В. В. Информационное обеспечение комплексных исследований природной среды и социо-экономических условий Белого моря и водосбора // *ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: материалы Междунар. конф. М. : Издательство Московского университета, 2019. Т. 25, ч. 1. С. 122–137. <http://doi.org/10.35595/2414-9179-2019-1-25-122-137>*
10. Ivanov V. A., Igumnova E. M., Timchenko I. E. Coastal zone resources management. Kiev : *Academperiodika*, 2012. 304 p.
11. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. 225 с.
12. 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
13. 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
14. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Свищев С. В. Моделирование внутрисистемных связей в адаптивной модели биохимических процессов морской среды // *Морской гидрофизический журнал*. 2020. Т. 36, № 1. С. 88–102. doi:10.22449/0233-7584-2020-1-88-102
15. 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, iss. 3. P. 591–639. <https://doi.org/10.1357/002224090784984678>

*Об авторах:*

**Тимченко Игорь Евгеньевич**, 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: 0000-0002-2328-6430**, [timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru](mailto:timchenko.syst.analysis@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](mailto: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](mailto:sergsvishchev09@gmail.com)