

Е.М.Игумнова, И.Е.Тимченко

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ
В ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЕ МОРЯ**

Приведен обзор научных работ в области рационального использования ресурсов прибрежной зоны моря (ПЗМ), выполненных под руководством академика В.А.Иванова. Результаты этих работ изложены в развитии с учетом современных идей и методов построения эколого-экономических моделей природно-хозяйственных систем «берег – море». Сделан акцент на двух основных принципах системного подхода к созданию подобных моделей: адаптивного баланса влияний и информационной общности численных моделей процессов развития в ПЗМ и ассимилируемых данных наблюдений. Представлены уравнения метода адаптивного баланса влияний, являющегося практической реализацией одноименного системного принципа. Этим методом построены адаптивная модель морской экосистемы и эколого-экономическая модель объекта рекреации. Отмечено влияние ресурсных ограничений на модельные сценарии процессов, развивающихся в морских экосистемах. Рассмотрен рациональный баланс экономической выгоды от использования рекреационных ресурсов ПЗМ и уровня загрязнения природной среды, обусловленный их потреблением и воспроизводством. Приведена модель управления рентабельностью предоставления рекреационных услуг на территории, прилегающей к Южному берегу Крыма.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *системные принципы природопользования, метод адаптивного баланса влияний, адаптивные модели эколого-экономических систем, агенты ресурсного лимитирования, экономическая рентабельность рекреационных услуг*

doi: 10.22449/2413-5577-2019-4-81-88

Введение. Прибрежные зоны моря (ПЗМ) представляют собой сложные социальные эколого-экономические системы, обладающие уникальными ресурсами природно-хозяйственных комплексов «берег – море». В процессе их развития возникают противоречия в использовании природных ресурсов зоны и защите окружающей среды. Управление устойчивым развитием невозможно без прогнозирования последствий использования ресурсов, для чего необходим комплексный системный подход к управлению ресурсами ПЗМ [1 – 3]. Важную роль играют два принципа системного подхода: адаптивного баланса влияний и информационного единства динамической модели процессов развития и данных наблюдений над этими процессами [1]. Первый служит основой построения адаптивных моделей для прогноза процессов в ПЗМ. Второй применяется для создания цифровых информационных технологий управления сценариями устойчивого развития. Благодаря использованию этих принципов, в научных статьях и монографиях [1 – 7] создан новый класс адаптивных моделей эколого-экономических процессов, которые рассматриваются в данной работе.

© Е.М.Игумнова, И.Е.Тимченко, 2019

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. вып.4. С.81-88.

Материалы и методы. Принцип адаптивного баланса влияний был положен в основу метода адаптивного баланса влияний (АВС-метод [1]). В нем использованы стандартные уравнения динамических процессов, которые автоматически сохраняют материальные балансы реакций превращения веществ в эколого-экономических системах. Уравнения метода содержат отрицательные обратные связи между моделируемыми процессами и скоростями их изменений, что обеспечивает их адаптацию друг к другу и к внешним влияниям.

Рассмотрим построение подобных уравнений. Введем обозначения u_i для n моделируемых процессов и будем предполагать, что моделируемая система находится в стационарном (равновесном) состоянии, когда все переменные равны своим средним значениям: $u_i = C_i$. Внешние влияния A_i переводят систему в новые состояния равновесия с сохранением материальных балансов взаимодействия процессов между собой и с внешними влияниями. Если переменная u_i находится под положительным влиянием m переменных u_k и отрицательным влиянием $n - m$ переменных u_l , то материальный баланс взаимодействия процессов может быть представлен как:

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

где a_{ik} и a_{il} – коэффициенты положительных и отрицательных влияний. В [3, 6] показано, что сохранение балансов (1) происходит в модульных уравнениях метода адаптивного баланса влияний следующего вида:

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

где r_i – удельные скорости изменения функций u_i . Благодаря отрицательным обратным связям второго порядка между переменными и скоростями их изменения, подобная система уравнений обладает устойчивостью и быстрой сходимостью вычислительных алгоритмов решения к единственному аттрактору в пределах заданных интервалов изменчивости ($0 \leq u_i \leq 2C_i$):

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

Задача определения коэффициентов влияний a_{ij} решается различными способами [2, 3]. Наиболее простым из них является метод оценки коэффициентов влияний по нормированным отношениям средних значений моделируемых переменных:

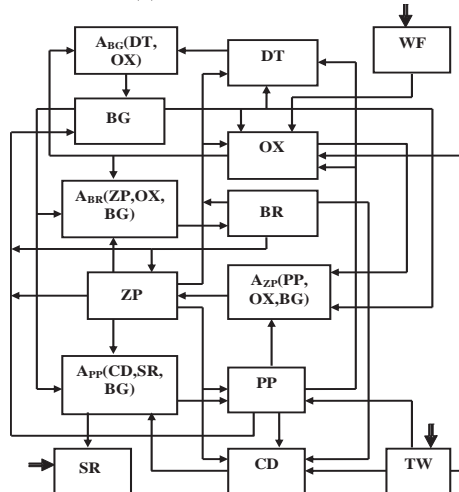
$$a_{ik} = \frac{C_i}{2m} C_k^{-1}, \quad a_{il} = \frac{C_i}{2(n-m)} C_l^{-1}. \quad (4)$$

Конечно-разностное представление уравнений (2) при дополнительном условии $2\Delta t r_i C_i = 1$ принимает вид:

$$u_i^{k+1} = 2u_i^k \left\{ 1 - \frac{1}{2C_i} \left[u_i^k - \sum_{p=1, p \neq i}^m a_{ip}(u_p^k - C_p) + \sum_{l=m+1, l \neq i}^{n-m} a_{il}(u_l^k - C_l) - A_i^k \right] \right\}. \quad (5)$$

Результаты и обсуждение. В работах [2, 3, 6], выполненных под руководством академика В.А.Иванова, рассмотрено использование уравнений АВС-метода (2) для построения адаптивных моделей морских экосистем. В частности, исследовано влияние ресурсных ограничений на формирование

концентраций живых организмов и на образование новых веществ, получаемых в ходе химико-биологических реакций. С этой целью была построена



адаптивная модель экосистемы, содержащая концентрации: фито- и зоопланктона (PP и ZP), биоресурса (живые объекты BR, лежащие в верхней части пищевой цепи), биогенных веществ BG, детрита DT, кислорода OX и углекислого газа CD. В структуру модели, изображенную на рис.1, были включены агенты ресурсного лимитирования A_{PP} , A_{BG} , A_{BR} , A_{ZP} .

Причинно-следственные связи были представлены системой дифференциальных уравнений ABC-метода (2) и логическими операторами лимитирования. Общий вид уравнений адаптивной модели экосистемы проиллюстрируем примером уравнения для концентрации фитопланктона:

Рис. 1. Структура концептуальной модели морской экосистемы с агентами ресурсного лимитирования.

$$\frac{dPP}{dt} = PP\{1 - 2[PP + a_{PP/ZP}ZP - A_{PP}(BG, SR, CD) - A_{PP}(TW)]\}, \quad (6)$$

в котором агенты управления имели следующие выражения:

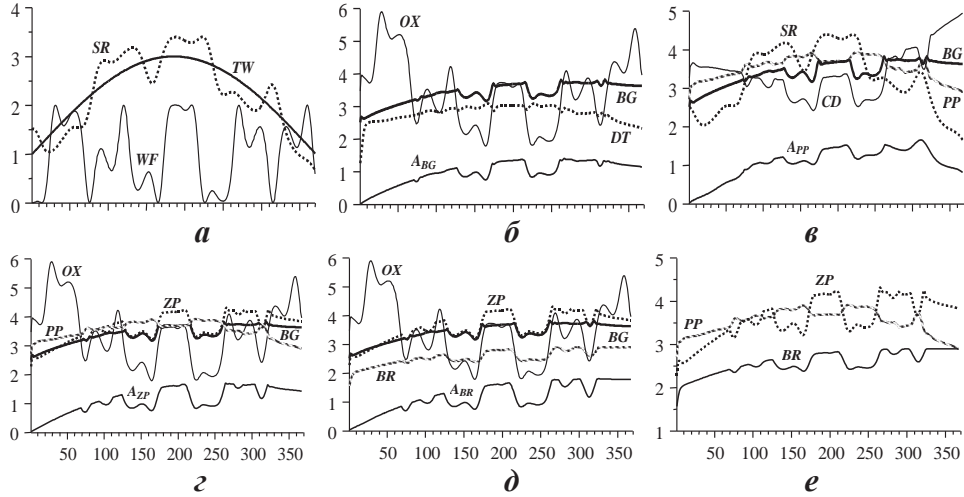
$$A_{PP}(BG, SR, CD) = IF\{M_{PP} = a_{PP/BG}BG; IF\{BG < BG_{PP}^*; -BG[1 - \exp(-\alpha_{BG}\tau)]; BG[1 - \exp(-\beta_{BG}\tau)]\}; 0\} + IF\{M_{PP} = a_{PP/SR}SR; IF\{SR < SR_{PP}^*; -SR[1 - \exp(-\alpha_{SR}\tau)]; SR[1 - \exp(-\beta_{SR}\tau)]\}; 0\} + IF\{M_{PP} = a_{PP/CD}CD; IF\{CD < CD_{PP}^*; -CD[1 - \exp(-\alpha_{CD}\tau)]; CD[1 - \exp(-\beta_{CD}\tau)]\}; 0\};$$

$$M_{PP}(t) = \arg \min[a_{PP/BG}BG(t); a_{PP/SR}SR(t); a_{PP/CD}CD(t)]; \quad (7)$$

$$A_{PP}(TW) = \exp[-\chi_{PP}(T - T_{PP})^2]. \quad (8)$$

Результаты вычисления сценариев процессов по этой модели показаны на рис.2.

Предложенный вариант описания операций лимитирования учитывал зоны гомеостаза живых организмов и временные задержки на время их роста. Критические для развития организмов значения параметров экосистемы обозначены: SR^* , CD^* , PP^* , ZP^* , OX^* , BG^* , DT^* . Графики внешних влияний на экосистему: годовой ход температуры верхнего слоя моря (кривая TW), освещенности его поверхности (кривая SR) и модуля скорости ветра (кривая WF) показаны на рис.2, а. Все моделируемые процессы были приведены к единой безразмерной шкале изменчивости [0; 10]. Коэффициенты влияний в динамической модели (5) – (8) выбирались в пределах сегмента значений [0,1; 0,5]. Скорости изменения концентраций были заданы значениями: $\alpha = 0,1$ и $\beta = 1,1$. На рис.2, б – д приведен анализ ресурсного лимитирования концентраций живых организмов, а также условий их формирования. В частности, на рис.2, б сценарий биогенных веществ образован минимальными значениями кислорода OX и детрита DT, что подтверждает



Р и с . 2 . Влияние ресурсных ограничений на процессы в морской экосистеме.

вывод о необходимости включения агентов ресурсного лимитирования в модели морских экосистем.

В работах [2 – 4], выполненных под руководством академика В.А.Иванова, исследована проблема рационального использования рекреационных ресурсов Крыма. Показано, что для управления балансом потребления и воспроизводства этого вида ресурсов необходимы цифровые информационные технологии, основанные на системном принципе информационного единства адаптивных моделей эколого-экономических систем и данных наблюдений над процессами развития.

Рассмотрим пример адаптивной модели системы объекта, производящего рекреационные услуги. Схема взаимных влияний между процессами, определяющими рентабельность производства и экологическое состояние объекта, показана на рис.3. Используя эту схему и выражения (2), получим следующую систему уравнений модели управления сценариями процессов:

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= 2r_V V \{C_V - [V - AG_V(P, E) - a_{V/D} D]\}; & \frac{dD}{dt} &= 2r_D D [C_D - (D + a_{D/P} P - D^*)]; \\ \frac{dE}{dt} &= 2r_E E \{C_E - [E - a_{E/Q} Q - a_{E/TX} TX]\}; & \frac{dP}{dt} &= 2r_P E \{C_P - [P - a_{P/E} E - a_{P/D} D]\}; \\ \frac{dPL}{dt} &= 2r_{PL} PL \{C_{PL} - [PL - a_{PL/V_{acc}} V_{acc} + AG_{PL/TX}(TX_{acc}, TX_{acc}^*)]\}; & & \end{aligned} \quad (9)$$

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

$$AG_V(P, E) = IF\{P > E; 0; V[1 - \exp(-b_V t)]\}; \quad (10)$$

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

$$AG_{TX/PL}(PL, PL^*) = IF\{PL < PL^*; 0; TX[1 - \exp(-b_{TX} t)]\}; \quad S(t) = S_{acc}(t) - S_{ass}(t);$$

$$R(t) = IF\{PL < PL^*; 1; IF[TX_{acc} < TX_{acc}^*; \exp(-\alpha_R \tau); 1 + (R(t) - 1) \exp(-\beta \tau)[R(t) - 1]]\};$$

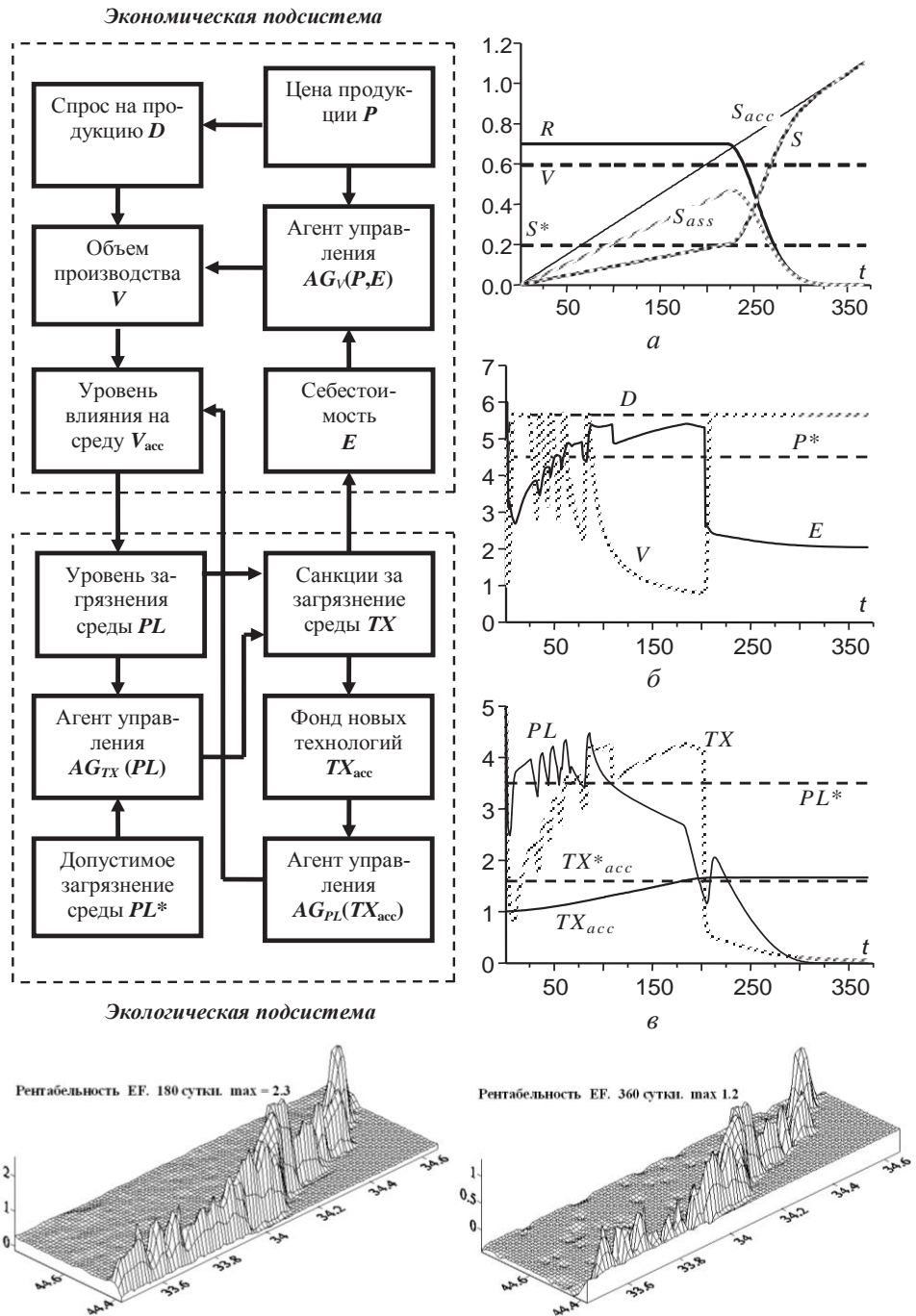
$$V_{acc}(t) = \int_0^{t_1} V(t) dt; \quad TX_{acc}(t) = \int_0^{t_1} TX(t) dt;$$

$$S_{acc}(t) = a_{S/V} \int_0^{t_1} V(t) dt; \quad S_{ass}(t) = a_{S/V} \int_0^{t_1} R(t)V(t) dt; \quad EF = \ln \frac{1 + PV_{acc}}{1 + E_{acc}}. \quad (11)$$

В этой модели объем производства рекреационных услуг V определялся спросом на услуги D , который зависел от их стоимости P и рекреационной привлекательности курорта D^* . Себестоимость услуги зависела от суммарных производственных расходов Q и штрафных санкций TX за загрязнение окружающей среды PL . По мере накопления объема выполненных услуг V_{acc} , увеличивалось негативное влияние не только на уровень загрязнения природной среды, но и на качество сервисного обслуживания рекреантов. Общий объем выполненных услуг S_{acc} сопоставлялся с тем объемом услуг S_{ass} , при котором ресурсная емкость курорта S^* не была превышена, а функция $R(t)$ сохраняла свое максимальное значение. Экономическая рентабельность EF оценивалась как логарифм отношения доходов, накопленных за период времени $(0, t_1)$, к суммарным расходам за этот период. Агент управления $AG_V(P, E)$ контролировал рентабельность производства, агент $AG_{TX}(PL)$ увеличивал санкции за превышение предельно допустимого уровня загрязнения (ПДК) PL^* , агент $AG_{PL}(TX_{acc})$ включал природоохранные действия, когда объем штрафов, накопленный в фонде новых технологий, достигал величины TX_{acc}^* .

Информационная технология управления была применена для построения сценариев внутригодовой изменчивости эколого-экономических процессов рекреации на участке прибрежной зоны Крыма от Фороса до Алушты. Первоначально в узлах квадратной сетки, покрывающей этот район, была построена матрица экспертных оценок рекреационной привлекательности территории D^* . Оценки учитывали плотность населения и существующие природные, инфраструктурные и сервисные ресурсы территории. Вычисления сценариев процессов рекреации были выполнены на 360 шагов по времени (суток). В качестве примера на рис.3 показаны сценарии для объекта рекреации, расположенного в районе Ялты. На рис.3, *а* показано падение объема услуг S_{ass} , когда общее количество оказываемых услуг S_{acc} начинает превышать величину рекреационной емкости курорта S^* . На рис.3, *б* и *в* приведены в условных единицах сценарии эколого-экономических процессов рекреации при постоянных значениях: спроса на услуги рекреации D стоимости услуги P^* , ПДК PL^* и порога внедрения природоохранных технологий TX_{acc}^* . С ростом объема услуг V и уровня загрязнения PL увеличивались размер штрафа TX (рис.3, *в*) и себестоимость услуги E (рис.3, *б*). В периоды времени, когда себестоимость превышала цену: $E > P$, агент $AG_V(P, E)$ ограничивал объем услуг V (рис.3, *а*) и тем самым уменьшал уровень загрязнения PL (рис.3, *в*). Когда объем фонда новых технологий достигал величины TX_{acc}^* , включался режим природоохранных действий и уровень загрязнения резко падал (рис.3, *в*). Как следствие, производство услуг возрастало до уровня спроса на услуги D (рис.3, *б*).

Вычислительные эксперименты с моделью показали, что рациональный баланс между экономической рентабельностью объекта рекреации и соблюдением экологических норм природопользования может быть обеспечен за счет управления размерами штрафных санкций TX за загрязнение природ-



Р и с. 3. Информационная технология управления эколого-экономической системой производства рекреационных услуг. Модель эколого-экономической системы (вверху, слева). Сценарии: баланса накопления и ассимиляции загрязнений (а), объемов рекреационных услуг (б), управления уровнем загрязнения при использовании фонда природоохранных действий (в). Распределение рентабельности рекреационных услуг на южнобережном участке Крыма на 180 и 360 сутки года (внизу).

ной среды и превышение рекреационной емкости курорта S^* . По временным сценариям в каждом из узлов сеточной области территории были построены пространственные поля эколого-экономических характеристик.

В нижней части рис.3 показаны примеры пространственного распределения рентабельности рекреационных услуг для летнего (180 сутки года) и зимнего (360 сутки года) сезонов. Наблюдаемый резкий контраст между южнобережной зоной и остальной частью территории Крыма объясняется естественным отличием рекреационной привлекательности этих районов.

Заключение. Результаты научных работ, выполненных под руководством академика В.А.Иванова, показали полезность и эффективность системного подхода к разработке методологии рационального природопользования в прибрежной зоне моря. Ему принадлежала идея обобщения этих результатов в двух монографиях [2, 3], опубликованных на русском и английском языках. В них приведены информационные технологии управления производственными операциями в прибрежной зоне Керченского пролива, вероятностные алгоритмы определения коэффициентов адаптивных моделей эколого-экономических систем, примеры картирования полей морских экосистем по результатам спутниковых наблюдений. Идеи и методы построения систем «берег – море» получили развитие в работах сотрудников МГИ РАН [7], хранящих светлую память о многогранном таланте и широкой эрудиции академика В.А.Иванова.

Работа выполнена по теме 0827-2018-0004 «Прибрежные исследования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000.– 225 с.
2. *Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е.* Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007.– 258 с.
3. *Ivanov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E.* Coastal Zone Resources Management.– Kiev: Academpiodica, 2012.– 304 p.
4. *Иванов В.А., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Динамика рекреационных ресурсов прибрежной зоны моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2008.– вып.18.– С.242-251.
5. *Иванов В.А., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Интегральная модель эколого-экономической системы Керченского пролива // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2009.– вып.19.– С.285-296.
6. *Иванов В.А., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Рациональный баланс природопользования в прибрежной зоне моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2011.– вып.25, т.2.– С.305-324.
7. *Timchenko I.E., Ivashchenko I.K., Igumnova E.M., Nikiforov Yu.I.* Ecological-economic model of managing recreational potential of the sea coastal zone // Physical Oceanography.– 2018.– v.25, № 5.– P.420-432.

Материал поступил в редакцию 14.10.2019 г.

E.M.Igumnova, I.E.Timchenko

ECOLOGICAL-ECONOMIC MODELS OF NATURAL RESOURCES MANAGEMENT IN THE COASTAL ZONE AREA

The review of scientific works in the field of rational use of coastal zone area resources (CZA), carried out under the leadership of academician V. A. Ivanov is given. Results of these works are stated in development taking into account modern ideas and methods of construction of ecological-economic models of natural-economic systems "coast-sea". The emphasis is made on two main principles of the system approach to the creation of such models: adaptive balance of causes and information unity of numerical models of development processes in CZA and simulated in them observational data. The equations of the method of adaptive balance of causes, which is the practical implementation of the system principle of the same name, are presented. By this method the adaptive model of marine ecosystem and ecological-economic model of recreation object are constructed. The role of logical control agents used in the equations of adaptive models is noted. The influence of resource constraints on model scenarios of processes developing in marine ecosystems is shown. The problems of maintaining a rational balance of economic benefits from the consumption of recreational resources of CZA considered taking into account the requirements for the quality of recreational services and levels of environmental pollution caused by the violation of the balance of consumption and reproduction of recreational resources. The management model of the recreational services efficiency in the territory adjacent to the southern coast of Crimea is given.

KEYWORDS: system principles of natural resources management, method of adaptive balance of causes, adaptive models of ecological-economic systems, agents of resource limitation, economic profitability of recreational services, control of environmental pollution levels