

Эколого-экономическая модель управления рекреационным потенциалом прибрежной зоны моря

И. Е. Тимченко*, И. К. Иващенко, Е. М. Игумнова, Ю. И. Никифоров

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

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

Поступила в редакцию 06.03.2018 г.

Предложена адаптивная модель управления процессами потребления и воспроизводства рекреационного потенциала прибрежной зоны моря. Рекреационный потенциал определен по природно-климатическим свойствам, развитию курортной инфраструктуры, качеству рекреационных услуг и уровню загрязнения прибрежной зоны моря. Введены понятия концентрации рекреационного ресурса и ресурсной емкости объекта рекреации, характеризующие его рекреационный потенциал. Построена эколого-экономическая модель потребления рекреационного ресурса, состоящая из экономической подсистемы оказания рекреационных услуг и блока управления природоохранной деятельностью, контролирующей загрязнение территории объектов рекреации и прибрежной зоны моря. Уравнения модели построены методом адаптивного баланса влияний с включением в них логических агентов управления. В настоящем исследовании подобный подход применен при создании модели для мониторинга динамики рекреационной емкости участка крымской территории, прилегающего к южнобережной морской акватории. Целью работы явилось построение таких пространственно-временных сценариев эколого-экономических процессов, которые характеризуют реакцию модели управления объемами рекреационных услуг на сезонную изменчивость рекреационного потенциала прибрежной зоны моря.

Приведены сценарии эколого-экономических процессов, прогнозируемые моделью. Для инициализации пространственного варианта модели использован участок прибрежной зоны в районе южного берега Крыма, для которого составлена цифровая карта среднестатистических оценок рекреационной привлекательности. Исследована реакция модели на сезонные изменения рекреационного потенциала. Показано, что для сохранения качества рекреационных услуг необходимо управление балансом скоростей потребления и воспроизводства рекреационного ресурса, который характеризует рекреационную емкость прибрежной зоны моря.

Ключевые слова: эколого-экономическая система, адаптивный баланс влияний, потребление и воспроизводство рекреационного ресурса, сезонная изменчивость, загрязнение морской среды, рекреационная емкость прибрежной зоны.

Благодарности. Постановка исследований 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 гритехнологий». Разработка модели и вычислительные эксперименты проведены в рамках научного проекта Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Севастополя № 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: Эколого-экономическая модель управления рекреационным потенциалом прибрежной зоны моря / И. Е. Тимченко [и др.] // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 5. С. 454–467. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-454-467

Ecological-Economic Model of Managing Recreational Potential of the Sea Coastal Zone

I. E. Timchenko, I. K. Ivashchenko, E. M. Igumnova, Yu. I. Nikiforov

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

Adaptive model of managing consumption and reproduction of the recreational potential in the sea coastal zone is proposed. The recreational potential is assessed based on the nature and climate features, development of a resort infrastructure, quality of recreation services and level of the coastal zone pollution. The concepts of the recreational resource concentration and the resource capacity of a recreational unit which characterize its recreational potential are introduced. Constructed is the ecological-economic model of the recreational resource consumption consisting of the economic subsystem (rendering of recreational services) and the block of managing the environmental activity which controls pollution of the recreational and coastal areas. The model equations are constructed by the method of adaptive balance of causes including the logical management agents. Such an approach is applied in the model developing intended to monitor dynamics of the recreational capacity of the South Crimea coastal region. The aim of the study is to construct the spatial-temporal scenarios of the ecological and economic processes which characterize response of the model managing recreational services to seasonal variability of the recreational potential of the sea coastal zone. The scenarios of the modeled ecological and economic processes are given. To initiate the spatial variant of the model, a part of the South Crimea coast supplied with the digital map showing average estimates of its recreational attractiveness is used. The model response to seasonal changes in the recreational potential was investigated. It is shown that in order to maintain the quality of recreational services, it is necessary to manage the balance between the rates of consumption and reproduction of the recreational resource, which characterizes the recreational capacity of the sea coastal zone.

Keywords: ecological and economic system, adaptive balance of influences, consumption and reproduction of recreational resource, seasonal variability, marine pollution, recreational capacity of the coastal zone.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task on the theme № 0827-214-0010 “Complex interdisciplinary investigations of the oceanologic processes conditioning functioning and evolution of the Black and Azov seas’ ecosystems based on the modern methods for controlling the marine environment condition, and the hydraulic technologies”. The model is developed and the computing experiments are performed within the framework of the scientific project of the Russian Fund of Fundamental Investigations and the Sevastopol Administration № 18-47-920001 “Study of the principles for constructing adaptive models of the ecological-economic systems and digital informational technologies for managing the scenarios of sustainable development of the natural and economical complexes in the Sevastopol region”.

For citation: Timchenko, I.E., Ivashchenko, I.K., Igumnova, E.M. and Nikiforov, Yu.I., 2018. Ecological-Economic Model of Managing Recreational Potential of the Sea Coastal Zone. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(5), pp. 454-467. doi:10.22449/0233-7584-2018-5-454-467 (in Russian).

Введение. Управление объемами потребления и воспроизводства рекреационных ресурсов является одной из задач экологической экономики природно-хозяйственных систем берег – море [1–15]. Как известно, для устойчивого развития подобных систем необходим разумный компромисс между получением экономической выгоды от потребления природных ресурсов и сохранением нормального экологического состояния природной среды [8, 12]. Поэтому создаются численные модели и цифровые информационные технологии управления сценариями экономических и экологических процессов рекреации, позволяющие находить подобные компромиссные решения [16, 17].

Среди потребляемых природных ресурсов прибрежной зоны моря важную роль играет ее рекреационный потенциал, который используется объектами рекреации для отдыха и оздоровления людей. Рекреационный потенциал означает наличие рекреационного ресурса и рекреационной емкости у объекта рекреации, которые формируются под влиянием природно-климатических, инфраструктурных и сервисных возможностей оказания рекреаци-

онных услуг. Прибрежная морская среда является одной из наиболее важных составляющих рекреационной привлекательности данного объекта. С ростом привлекательности увеличивается спрос на услуги в этой сфере, но возможности оказания качественных услуг всегда ограничены конечной рекреационной емкостью отдельных участков прибрежной зоны моря.

Одним из возможных путей создания эколого-экономических моделей и технологий управления рекреационным потенциалом является применение метода адаптивного баланса влияний [18]. Примером использования этого метода служит работа [17], в которой рациональный баланс между экономической выгодой от утилизации в море отходов производства и сохранением экологического состояния морской среды основан на управлении системой по трем критериям: экономической рентабельности потребления морских биоресурсов, уровню загрязнения и индексу биологического разнообразия морской среды.

В настоящем исследовании подобный подход применен при создании модели для мониторинга динамики рекреационной емкости участка крымской территории, прилегающего к южнобережной морской акватории. Целью работы явилось построение таких пространственно-временных сценариев эколого-экономических процессов, которые характеризуют реакцию модели управления объемами рекреационных услуг на сезонную изменчивость рекреационного потенциала прибрежной зоны моря.

Причинно-следственные связи в концептуальной модели потребления и воспроизводства рекреационного ресурса прибрежной зоны моря. Для построения концептуальной модели рекреационного потенциала формулируем некоторые определения. Рекреационный потенциал формируется устойчивой системой факторов природной среды, инфраструктуры и сервисного обслуживания, полезных для использования в качестве рекреационного ресурса. В данном исследовании мы будем рассматривать рекреационный ресурс как количественную оценку рекреационного потенциала объекта рекреации. Эта оценка может быть представлена в виде взвешенной суммы влияющих на нее факторов, выраженных в безразмерных единицах (баллах). Формально количество баллов, относящееся к единице площади территории объекта рекреации, можно рассматривать как концентрацию рекреационного ресурса RR , с которой связано определенное количество потенциальных потребителей рекреационных услуг.

Назовем рекреационной услугой комплекс мероприятий, определенных по характеру, объему, времени и качеству, которые направлены на отдых и оздоровление субъекта рекреации (рекреанта). Выполнение услуг связано с потреблением рекреационного ресурса и уменьшением его концентрации RR . Скорость потребления рекреационного ресурса представляет собой количество оказываемых рекреационных услуг в единицу времени, которое зависит от спроса на услуги. Параллельно с потреблением ресурса на объекте рекреации развивается процесс его воспроизводства. Для каждого объекта существует предельно возможная скорость потребления рекреационного ресурса, которая не может превышать скорость его воспроизводства без снижения качества услуг. Поэтому для объекта рекреации кроме концентрации рекре-

ционного ресурса RR целесообразно использовать еще одну (интегральную) характеристику баланса этих скоростей: рекреационную емкость объекта RC .

Определим рекреационную емкость объекта рекреации как такое предельно возможное количество оказываемых рекреационных услуг на интервале времени $(0, t)$, при котором сохраняется баланс скоростей потребления и воспроизводства рекреационного ресурса. Максимальное значение рекреационной емкости соответствует предельной нагрузке на рекреационный объект, при которой скорость воспроизводства ресурса начинает отставать от скорости его потребления. Разность объемов потребления и воспроизводства рекреационного ресурса на интервале $(0, t)$ времени представляет собой дефицит предложения рекреационных услуг по отношению к существующему спросу на них. Поэтому для управления рекреационным потенциалом территории (объекта) рекреации необходимо использовать оценки как концентрации ресурса RR , так и рекреационной емкости RC .

Оказание рекреационных услуг неизбежно связано с явлениями, негативно влияющими на концентрацию рекреационного ресурса. К ним относятся: загрязнение мусором территорий, объектов и пляжной зоны, бактериальное заражение прибрежной морской среды, снижение качества сервисного обслуживания рекреантов. Поэтому в модели эколого-экономической системы рекреации объемы выполняемых рекреационных услуг могут отрицательно влиять на все факторы, формирующие рекреационную привлекательность курорта. В данном исследовании для учета этого влияния применен общий индекс – уровень загрязнения окружающей среды PL .

Введенные выше определения были использованы для построения схемы причинно-следственных связей, которая легла в основу концептуальной модели управления рекреационным потенциалом объекта рекреации прибрежной зоны моря. Эта схема приведена на рис. 1. Обозначения на схеме представляют собой безразмерные индексы переменных модели, выраженные в единицах средних значений моделируемых процессов. Индекс рекреационного ресурса RR складывается под влиянием индексов природной среды EN , инфраструктуры и сервисного обслуживания IS , а также экологической безопасности территории и морской акватории курортной зоны ES . От них зависит рекреационная привлекательность курорта, а следовательно, и спрос D на выполнение рекреационных услуг. Агент спроса на рекреационные услуги AG_D сравнивает текущее значение индекса RR со значением этого индекса в стационарном (среднестатистическом) состоянии объекта рекреации $RR^* = C_{RR}$, характеризующем интегральный баланс объемов потребления и воспроизводства рекреационного ресурса. Фактический объем услуг V определяется агентом управления AG_V , который сопоставляет экономическую рентабельность услуг EF с ресурсной емкостью курорта RC .

Для борьбы с загрязнением PL предусмотрено наложение штрафных санкций TX на экономическую систему, которые ограничивают объемы рекреационных услуг V . Накопление средств от наложенных штрафных санкций в специальном фонде TX_{acc} позволяет применить специальные природоохранные мероприятия с целью резкого снижения уровня загрязнения.

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

где a_{ik} и a_{il} – коэффициенты положительных и отрицательных влияний соответственно.

В работах [6, 18] показано, что для сохранения балансов (1) целесообразно использовать модульные уравнения ABC-метода 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 обеспечивает адаптацию переменных друг к другу и к внешним влияниям. При этом ставится дополнительное условие – влияния не выводят переменные за пределы 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. В ABC-методе эти коэффициенты связывают соотношениями продукты реакций взаимодействия процессов u_i с ресурсами u_j . Поэтому в зависимости от вида взаимодействий (физических, биохимических и др.) существуют теоретические и экспериментальные связи, которые служат для оценки коэффициентов влияний. Если в распоряжении исследователя имеются временные ряды наблюдений процессов u_i и u_j , коэффициенты влияний a_{ij} определяются с помощью взаимных корреляционных функций, вычисляемых по этим рядам. В частности, возможно построение адаптивных динамических моделей коэффициентов влияний методами оптимальной фильтрации Колмогорова и Калмана [6, 18–20].

В данном исследовании применен новый метод оценки коэффициентов влияний по нормированным отношениям средних значений моделируемых переменных, который предложен в работе [21]. В соответствии с этим методом коэффициенты влияний в уравнениях (2) могут быть определены по нормированным отношениям средних значений:

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

При построении уравнений модели были использованы обозначения переменных, приведенные на рис. 1. Обозначим сумму влияний на функцию u_i в уравнении (3) как

$$F(u_i) = \sum_{k=1}^m a_{ik}(u_k - C_k) - \sum_{l=1}^{n-m} a_{il}(u_l - C_l) + A_i. \quad (5)$$

Поскольку все уравнения адаптивной модели имеют одинаковую структуру, они отличаются только своими влияющими функциями. Поэтому для системы уравнений, формализующих концептуальную модель рис. 1, достаточно выписать только функции $F(u_i)$ (5). Покажем это на примере уравнения для индекса рекреационного ресурса:

$$\frac{dRR}{dt} = 2r_{RR} RR \{ C_{RR} - [RR - F(RR)] \}, \quad (6)$$

$$F(RR) = AG_{RR}(EN, IS, ES) - a_{RR/B} B.$$

Агент AG_{RR} выполняет функцию поиска фактора, лимитирующего величину индекса RR в текущий момент времени среди значений индексов EN , IS , ES :

$$\begin{aligned} AG_{RR}(EN, IS, ES) &= IF(M_{RR} = a_{RR/EN} EN; a_{RR/EN} EN; 0) + IF(M_{RR} = a_{RR/IS} IS; a_{RR/IS} IS; 0) + \\ &+ IF(M_{RR} = a_{RR/ES} ES; a_{RR/ES} ES; 0), \\ M_{RR}(t) &= \arg \min [a_{RR/EN} EN; a_{RR/IS} IS; a_{RR/ES} ES]. \end{aligned} \quad (7)$$

Функция B определена как интегральный баланс объемов потребления $B_{\text{ext}}(t)$ и воспроизводства $B_{\text{rec}}(t)$ рекреационного ресурса на интервале времени $(0;t)$:

$$B(t) = B_{\text{ext}}(t) - B_{\text{rec}}(t) = a_{B/V} \int_0^t [1 - R(\tau)] V(\tau) d\tau. \quad (8)$$

Считалось, что объемы потребления ресурса пропорциональны объемам оказываемых рекреационных услуг $V(t)$. Функция $B(t)$ интегрально учитывает возникновение дефицита рекреационного ресурса, когда объемы его потребления превышают рекреационную емкость объекта рекреации. Контроль над появлением дефицита осуществляет функция $R(\tau)$, которая является агентом ресурсной емкости объекта рекреации:

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

Роль этого агента заключается в слежении за отклонениями индекса RR от своего среднего значения C_{RR} . Когда этот индекс превышает среднее значение, скорость воспроизводства рекреационного ресурса равна скорости его потребления, функция $R(\tau) = 1$ и дефицит рекреационной емкости отсутствует. В противном случае скорость воспроизводства отстает от скорости потребления и дефицит рекреационного ресурса по формуле (9) экспоненциально нарастает с показателем α_R .

Второе логическое условие в этой формуле позволяет включить режим природоохранных действий, когда величина фонда очистки территории объекта и прилегающей морской среды от загрязнений TX_{acc} превысит заданное значение TX_{acc}^* . В этом режиме скорость воспроизводства экспоненциально растет с показателем β_R .

В уравнениях для факторов рекреационного ресурса было учтено негативное влияние на них уровня загрязнения территории объекта и прилегающей морской среды PL :

$$F(EN) = -a_{EN/PL}(PL - C_{PL}); F(IS) = -a_{IS/PL}(PL - C_{PL}); F(ES) = -a_{ES/PL}(PL - C_{PL})$$

Уровень загрязнения окружающей среды находился под влиянием объемов рекреационных услуг V , агента $AG_{PL/RR}(PL, RR)$, контролировавшего падение индекса рекреационного ресурса ниже среднего значения C_{RR} , и агента природоохранных действий $AG_{PL}(TX_{acc}; TX_{acc}^*)$:

$$\begin{aligned} F(PL) &= a_{PL/V}(V - C_V) + AG_{PL/RR}(PL, RR) - AG_{PL}(TX_{acc}; TX_{acc}^*), \\ AG_{PL/RR}(PL, RR) &= IF\{RR > C_{RR}; 0; PL[1 - \exp(-\beta_{PL}\tau)]\}, \\ AG_{PL/RR}(TX_{acc}, TX_{acc}^*) &= IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; 0; C_{PL}[1 - \exp(-\alpha_{PL}\tau)]\}. \end{aligned}$$

Сумма влияний в уравнении для объемов рекреационных услуг имела вид

$$F(V) = -AG_V(P, E) - AG_V(RR, C_{RR}) + a_{V/D}(D - C_D). \quad (10)$$

Агент $AG_V(P, E)$ следил за уровнем рентабельности рекреационных услуг, постоянно сопоставляя себестоимость услуги $AG_V(P, E)$ с ее рыночной стоимостью P и ограничивая производство, когда $E > P$:

$$AG_V(P, E) = IF\{E < P; 0; V(\tau)[1 - \exp(-\alpha_E\tau)]\}.$$

Агент $AG_V(RR, C_{RR})$ ограничивал производство, когда индекс рекреационного ресурса опускался ниже своего среднего значения:

$$AG_V(V, RR) = IF\{RR > C_{RR}; 0; V(\tau)[1 - \exp(-\alpha_{RR}\tau)]\}.$$

В уравнении для стоимости услуги P учитывалось влияние индекса рекреационного ресурса RR :

$$F(P) = a_{P/RR}(RR - C_{RR}),$$

а в уравнении для себестоимости E – влияние штрафных санкций за загрязнение TX :

$$F(E) = a_{E/TX}(TX - C_{TX}).$$

Уравнение для штрафных санкций имело следующую влияющую функцию:

$$\begin{aligned} F(TX) &= a_{TX/PL}(PL - C_{PL}) + AG_{TX}(PL, PL^*), \\ AG_{TX}(PL, PL^*) &= IF\{PL < PL^*; 0; (PL - PL^*)[1 - \exp(-\alpha_{TX}\tau)]\}. \end{aligned}$$

Размеры штрафов были пропорциональны уровню загрязнения до тех пор, пока этот уровень не превышал предельно допустимую концентрацию

загрязнения PL^* . Агент $AG_{TX}(PL, PL^*)$ увеличивал размер штрафа, когда это условие нарушалось.

Экономическая рентабельность рекреационных услуг рассчитывалась при помощи логарифма отношения доходов объекта рекреации $I_{acc}(t)$, к расходам $E_{acc}(t)$, накопленным за период времени $(0;t)$:

$$I_{acc} = \int_0^t P^* V(t) dt, \quad E_{acc} = \int_0^t E(t) V(t) dt, \quad EF = \ln \frac{1 + I_{acc}}{1 + E_{acc}}. \quad (11)$$

Каждое из уравнений модели было дополнено условиями (3).

Вычислительные эксперименты с целью тестирования модели. Численная реализация модели выполнена по схеме Эйлера. При этом было принято условие $2\Delta t r_i C_i = 1$, которое упрощает запись уравнений и сводит их к виду

$$u_i^{k+1} = 2u_i^k \left\{ 1 - \frac{1}{2C_i} [u_i^k - F_i(u_j^k - C_j, A_i^k)] \right\}; \quad (12)$$

$$u_i^k = IF[u_i^k < 0; 0; IF(u_i^k > 2C_i; 2C_i; u_i^k)].$$

Для удобства сравнения сценариев моделируемых процессов все они были приведены к безразмерной форме путем линейных преобразований $u_i / C_i = a'_{ij} u_j / C_j$, в которых безразмерные множители a'_{ij} рассчитывались по формулам (4). Средние значения были выбраны из интервала чисел $(0;10)$. Результаты расчетов на 365 шагов по времени приведены на рис. 2.

На рис. 2, *a* показано изменение спроса D на рекреационные услуги V под влиянием имитированного годового хода S и сезонной изменчивости рекреационной привлекательности курорта RR (рис. 2, *f*). В первой половине года объемы рекреационных услуг существенно отставали от спроса ввиду того, что индекс рекреационного ресурса RR опустился ниже своего среднего значения RR^* (рис. 2, *b*). Причиной явился высокий уровень загрязнения природной среды PL , который превысил предельно допустимое значение PL^* (рис. 2, *c*). Как следствие, агент $AG_{RR}(EN, IS, ES)$ лимитировал величину индекса RR по значению индекса экологической безопасности ES . Одновременно агент наложения штрафных санкций $AG_{PL/RR}(PL, RR)$ установил высокие штрафы за загрязнение TX (рис. 2, *c*), и себестоимость рекреационных услуг E оказалась равной (и временами превышала) их стоимость P (рис. 2, *a*). В этот период времени рекреационная емкость курорта понижалась, поскольку функция R экспоненциально убывала, а скорость воспроизводства рекреационного ресурса B_{rec} отставала от скорости его потребления B_{ext} (рис. 2, *d*). Функция дефицита рекреационной емкости B в уравнении (6) дополнительно понижала индекс рекреационного ресурса. В результате управления объемом услуг экономическая рентабельность EF резко снизилась и оказалась близкой к нулю (рис. 2, *e*).

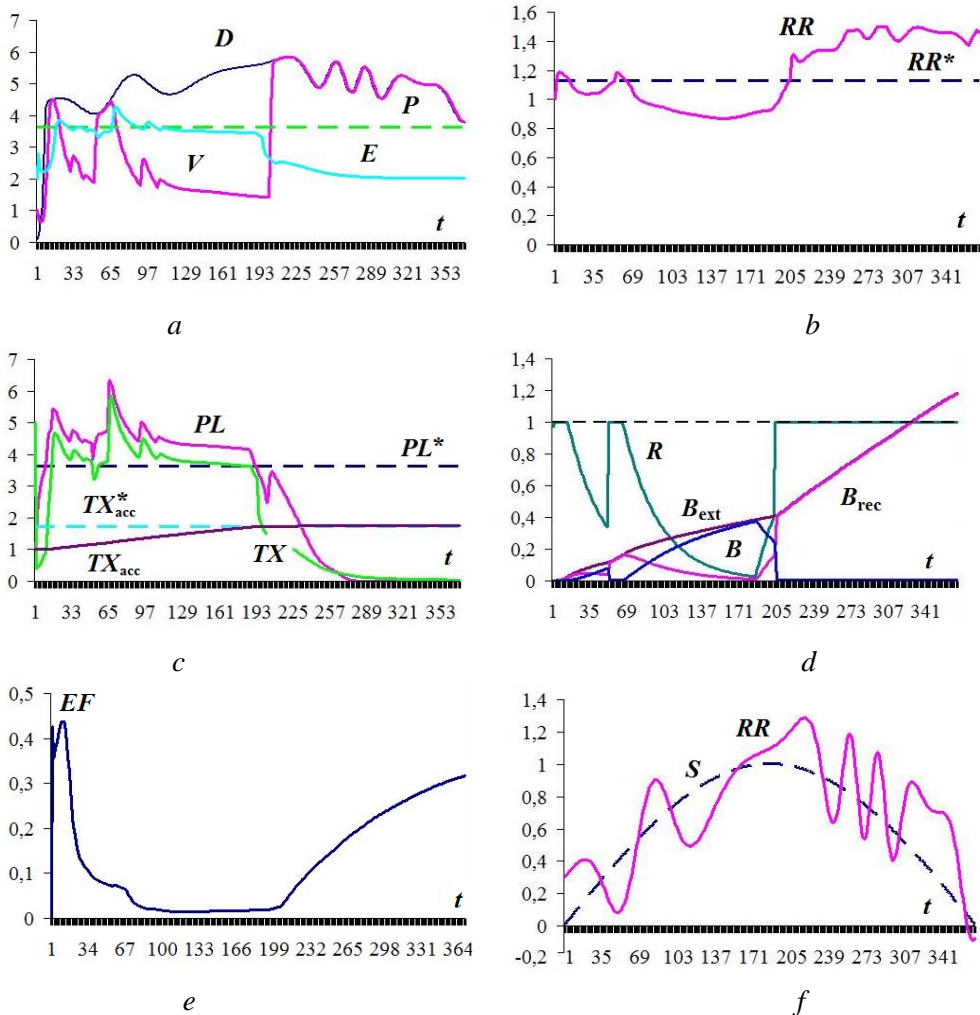


Рис. 2. Сценарии эколого-экономических процессов, прогнозируемые моделью под влиянием сезонных изменений рекреационного ресурса RR (f). Графики TX_{acc} и TX_{acc}^* приведены с масштабирующим множителем 0,001, графики B_{ext} и B_{rec} – с множителем 0,03

Fig. 2. Scenarios of the ecological and economic processes forecasted by the model being influenced by seasonal variations of the recreational resource RR (f). The graphs TX_{acc} and TX_{acc}^* are with factor 0.001 and the graphs B_{ext} and B_{rec} – with factor 0.03

Существенные изменения в сценариях эколого-экономических процессов произошли во второй половине года, когда на 190-м шаге эксперимента сумма штрафных санкций TX_{acc} , накопленных в фонде очистки природной среды от загрязнений, достигла значения TX_{acc}^* (рис. 2, c). В этот момент времени агент $AG_{PL}(TX_{acc}; TX_{acc}^*)$ в уравнении для индекса концентрации загрязнений включил режим очистки природной среды, в результате чего началось быстрое понижение уровня PL и штрафных санкций TX (рис. 2, c). Функция R

начала возрастать, что свидетельствовало об увеличении скорости восстановления рекреационного ресурса (рис. 2, *d*). На 206-м шаге скорости потребления и воспроизводства сравнялись и объем рекреационных услуг вырос до полного удовлетворения спроса (рис. 2, *a*). Этот режим сохранился до конца эксперимента, что позволило существенно увеличить экономическую эффективность курорта (рис. 2, *e*).

Использование модели для построения пространственно-временных сценариев потребления рекреационных ресурсов прибрежной зоны южнобережного Крыма. Для проведения этого вычислительного эксперимента был выбран участок территории прибрежной зоны южнобережного Крыма (рис. 3, *g*). Ранее в работе [16] была рассмотрена возможность построения пространственно-временных сценариев природопользования для этого района с применением несколько иной экономической модели. В нашем случае карта среднестатистических значений рекреационного ресурса C_{RR} была построена путем экспертной оценки индексов природных C_{EN} , инфраструктурных C_{IS} и экологических C_{ES} свойств района. Важным показателем рекреационной привлекательности местности служили данные о количестве населения, так как в рассматриваемом районе обслуживание отдыхающих является основным источником занятости жителей. Учитывались также такие показатели, как транспортная доступность и экологическое состояние территории и прибрежной морской акватории, традиции и уровень курортного обслуживания отдыхающих и др.

Цифровая карта рекреационного ресурса содержала значения индекса C_{RR} в узлах квадратной сетки с шагом 2,5 км. Для значений индекса была использована шкала безразмерных баллов. Оценки индекса интерполированы из точек расположения населенных пунктов в узлы сетки, попадающие в круг с центром в населенном пункте и с радиусом 1,5 шага сетки. Весовые коэффициенты интерполяции были выбраны обратно пропорциональными квадратам расстояний от населенных пунктов до соответствующих узлов сеточной области.

Пространственно-временные сценарии эколого-экономических процессов построены путем применения модели (6)–(12) последовательно в каждом из узлов сеточной области. Сезонный ход рекреационной привлекательности был имитирован с помощью функции S , изображенной на рис. 2, *f*. В результате были построены рельефные изображения сценариев на каждый день условного года. Примеры сценариев, рассчитанных на 182-е сутки, приведены на рис. 3. На рис. 3, *a* представлено распределение спроса D на рекреационные услуги на этот момент времени. Распределение повторяет значения индекса рекреационного ресурса C_{RR} и дает общее представление о большом контрасте между рекреационной привлекательностью приморской и остальной частью прибрежной зоны Южного берега Крыма. Параметры модели выбраны таким образом, что в летний период рекреационные услуги сосредоточены, кроме южнобережной части этой зоны, в основном в районе Бахчисарая. Объемы рекреационных услуг, отвечающие спросу, демонстрирует рис. 3, *b*.

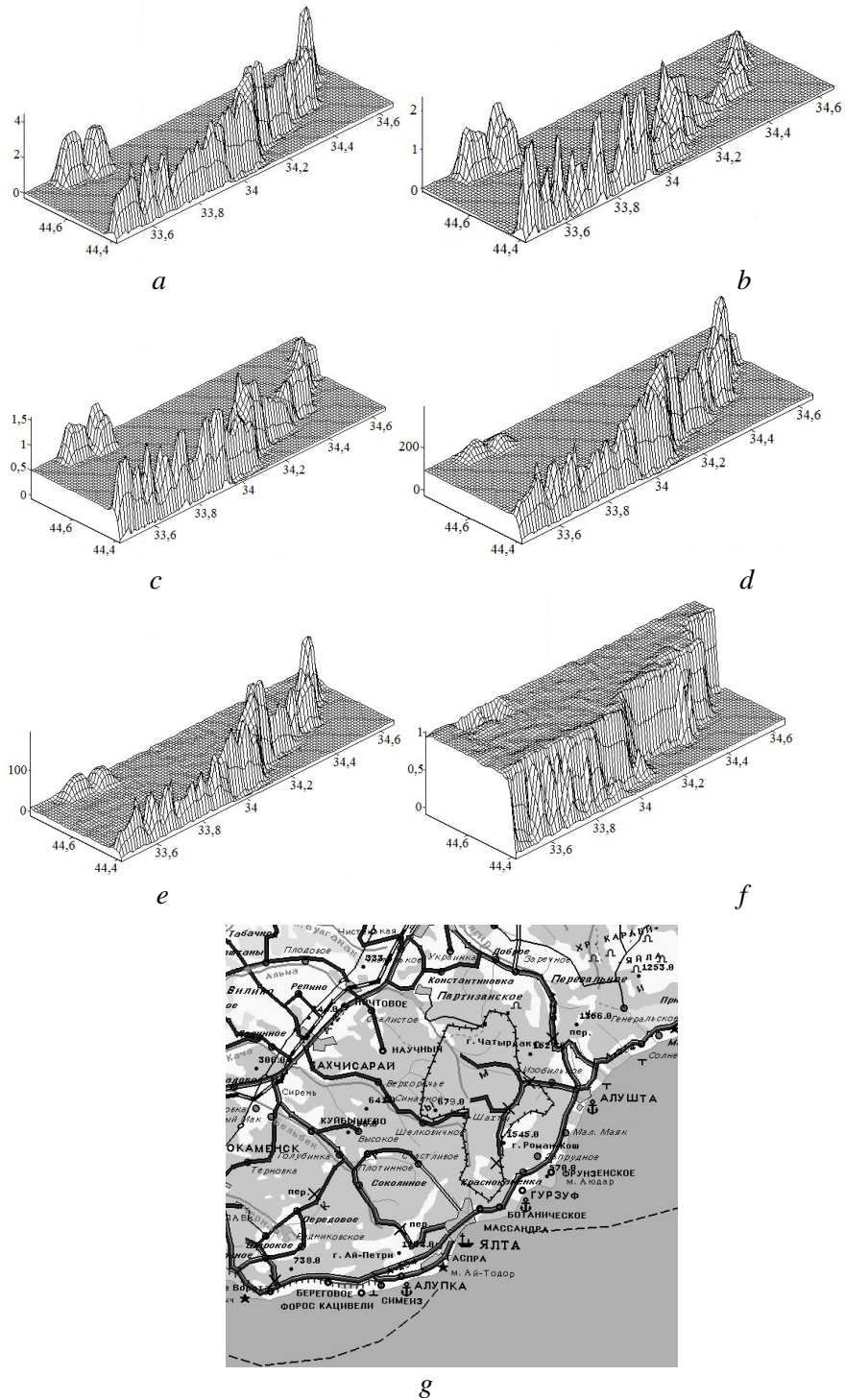


Рис. 3. Пространственно-временные сценарии эколого-экономических процессов потребления рекреационного ресурса южнобережной зоны Крыма на 182-е сутки условного года

Fig. 3. Spatial-temporal scenarios of the ecological and economic processes of the Southern Crimea recreational resource consumption on the 182nd day of a conventional year

Сценарий уровня загрязнений приведен на рис. 3, с. Этот сценарий показывает относительно более высокие уровни загрязнения в центральной и восточной зонах побережья по сравнению с западной частью, расположенной вблизи Фороса. Об этом свидетельствуют размеры штрафных санкций за загрязнение, показанные на рис. 3, d. На рис. 3, e представлено распределение функции дефицита воспроизводства рекреационного ресурса B . Как было отмечено выше, значения этой функции, отличные от нуля, означают нарушение баланса объемов потребления и воспроизводства рекреационного ресурса. Это подтверждается также сценарием агента ресурсной емкости R , изображенным на рис. 3, f.

Индекс ресурсной емкости R резко понижается вдоль границы берег – море, что свидетельствует о высоком уровне загрязнения пляжной зоны и морской среды.

Заключение. Анализ всего массива полученных сценариев позволил проследить пространственно-временную динамику ресурсного потенциала прибрежной зоны южнобережного Крыма, обусловленную сезонной изменчивостью его рекреационной привлекательности. Наряду с инфраструктурной и сервисной составляющими существенную роль в сезонной динамике объемов рекреационных услуг играли природные и экологические факторы. Снижение уровня загрязнения территории и прибрежной морской акватории до допустимых контролируемых пределов служило основным критерием управления рекреационным ресурсом курортных объектов. Предложенная модель эколого-экономической системы позволила количественно исследовать методы управления этим ресурсом. Вычислительные эксперименты, подобные рассмотренным в настоящей работе, дают возможность находить такие условия жесткого контроля над уровнем загрязнения природной среды, которые обеспечивают рентабельность рекреационных услуг и экологическую безопасность прибрежной зоны моря.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daly H., Farley J.* Ecological Economics: Principles and Applications. Washington, DC : Island Press, 2010. 544 p.
2. *Voinov A.* Systems Science and Modeling for Ecological Economics. New York : Academic Press, 2008. 430 p.
3. *Shogren J. F., Parkhurst G. M., Settle C.* Integrating economics and ecology to protect nature on private lands: models, methods, and mindsets // Environmental Science & Policy. 2003. Vol. 6, iss. 3. P. 233–242. [https://doi.org/10.1016/S1462-9011\(03\)00041-8](https://doi.org/10.1016/S1462-9011(03)00041-8)
4. *Crépin A.-S., Norberg J., Mäler K.-G.* Coupled economic-ecological systems with slow and fast dynamics – modelling and analysis method // Ecological Economics. 2011. Vol. 70, iss. 8. P. 1448–1458. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.02.004>
5. *Pearce D., Moran D.* The Economic Value of Biodiversity. London : Earthscan, 1994. 172 p. URL: <https://is.gd/S3Wb9Y> (дата обращения: 30.04.2018).
6. *Timchenko I. E., Igumnova E. M., Timchenko I. I.* Adaptive balance models for environmental-economic systems. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. 486 p.
7. Научное обоснование экологического нормирования антропогенного воздействия на морскую экосистему (на примере Балтийского моря) / Ю. А. Израэль [и др.] // Океанология. 1988. Т. 28, вып. 2. С. 34–42.

8. *Ivanov V. A., Igumnova E. M., Timchenko I. E.* Coastal zone resources management. К. : Academperiodika, 2012. 304 p.
9. *Ofiara D. D., Seneca J. J.* Economic Losses from Marine Pollution: A Handbook for Assessment. Washington, DC : Island Press, 2001. 320 p.
10. Integrated ecological economic modeling of the Patuxent River watershed, Maryland / R. Costanza [et al.] // *Ecological Monographs*. 2002. Vol. 72, iss. 2. P. 203–231. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(2002\)072\[0203:IEEMOT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(2002)072[0203:IEEMOT]2.0.CO;2)
11. *Samhouri J. F., Levin P. S.* Linking land- and sea-based activities to risk in coastal ecosystems // *Biological Conservation* 2012. Vol. 145, iss. 1. P. 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.10.021>
12. Пространственно-временной анализ в территориальном менеджменте / В. А. Боков [и др.]. Симферополь, 2005. 183 с.
13. *Elofsson K., Folmer H., Grey I.-M.* Management of eutrophicated coastal ecosystems: a synopsis of the literature with emphasis on theory and methodology // *Ecological Economics*. 2003. Vol. 47, iss. 1. P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2003.09.001>
14. *McCay B. J., Jones P. J. S.* Marine protected areas and the governance of marine ecosystems and fisheries // *Conservation Biology*. 2011. Vol. 25, iss. 6. P. 1130–1133. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01771.x>
15. Incorporating ecosystem services in marine planning: the role of valuation / T. Börger [et al.] // *Marine Policy*. 2014. Vol. 46. P. 161–170. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2014.01.019>
16. Адаптивная модель рекреационной привлекательности прибрежной зоны Крыма / И. Е. Тимченко [и др.] // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря*. Севастополь : ФГБУН МГИ, 2016. № 1. С. 39–47.
17. *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
18. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. 225 с.
19. *Timchenko I. E., Igumnova E. M.* Control over the ecological-economic processes in the integral model of the coastal zone of the sea // *Physical Oceanography*. 2011. Vol. 21, iss. 1. P. 45–62. <https://doi.org/10.1007/s11110-011-9103-9>
20. *Timchenko I. E., Igumnova E. M.* Prediction of natural processes by the method of adaptive balance of causes // *Physical Oceanography*. 2004. Vol. 14, iss. 5. P. 303–312. <https://doi.org/10.1007/s11110-005-0011-8>
21. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М.* Эколого-экономические модели использования рекреационных ресурсов прибрежной зоны Крыма // *Материалы I Международного экологического форума в Крыму «Крым – эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития»*. Севастополь, 20–24 июня 2017 года / Под ред. В. А. Иванова [и др.]. Севастополь : Филиал МГУ имени М. В. Ломоносова в г. Севастополе, 2017. С. 104–108. URL: http://sev.msu.ru/wp-content/uploads/2017/07/SBORNIK_FORUM_2017.543_pdf.pdf (дата обращения: 18.07.2018).

Об авторах:

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

Игумнова Екатерина Михайловна, ведущий инженер отдела оптики и биофизики моря ФГБУН МГИ (299011, Россия, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2)