

Экологическая безопасность и экономическая рентабельность объекта рекреации в системе берег – море

И. Е. Тимченко, Е. М. Игумнова, А. С. Бескорвайный*

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**e-mail: hardy-94@mail.ru*

Поступила 02.09.2020 г.; принята к публикации 11.11.2020 г.; опубликована 15.12.2020 г.

Разработана модель экологической безопасности объекта рекреации, позволяющая связать объем и качество рекреационных услуг с риском заражения морской среды побочными продуктами процесса рекреации, в частности сточными водами объекта. Модель объединила экономическую систему получения прибыли и систему контроля экологического состояния прибрежной морской среды через управление ресурсом экологической безопасности. В качестве ресурса экологической безопасности рассмотрена величина риска заражения рекреанта различными болезнями, связанными со специфическими видами загрязнения. Принято, что этот риск пропорционален скорости увеличения концентрации загрязнений, поступающих в морскую среду при оказании услуг, и обратно пропорционален скорости уменьшения этой концентрации вследствие самоочищения среды и/или природоохранных действий. Увеличение концентрации загрязнения по сравнению со стационарным (фоновым) значением означало потребление экологического ресурса и соответствующий рост риска заражения отдыхающих. В основу модели положена концепция экологически безопасного стационарного состояния морской экосистемы, при котором эти скорости равны и риск заражения отдыхающих бактериальной, вирусной и другими видами инфекции отсутствует. Объем производства рекреационных услуг зависит от величины индекса экологической безопасности, который определял интегральный дисбаланс скоростей. Этот индекс равен единице, когда риск заражения отсутствует и экспоненциально убывает с ростом этого дисбаланса. Таким образом, величина риска заражения экосистемы объекта зависит от интенсивности его работы. Уравнения модели построены методом адаптивного баланса влияний, в которые включены логические агенты управления, принимающие локальные решения. В вычислительных экспериментах на примере Севастопольской бухты построены сценарии объемов рекреационных услуг, уровня загрязнения морской среды, штрафных санкций за загрязнение, интегральных объемов потребления и воспроизводства экологического ресурса. Сделан вывод о полезности подобных моделей для контроля уровня экологической безопасности объекта рекреации.

Ключевые слова: ресурс экологической безопасности, индекс экологической безопасности, метод адаптивного баланса влияний, адаптивная модель, эколого-экономическая система, рекреационная деятельность, агенты управления моделью, сценарии процессов рекреации, Севастопольская бухта.

© Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Бескорвайный А. С., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

Благодарности: исследование рекреационного потенциала прибрежной зоны выполнено по теме: 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» (шифр «Прибрежные исследования»). Разработка модели экологической безопасности и вычислительные эксперименты по управления процессами рекреации в системе берег – Севастопольская бухта проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Севастополя по научному проекту № 18-47-920001.

Для цитирования: *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Бескоровайный А. С.* Экологическая безопасность и экономическая рентабельность объекта рекреации в системе берег – море // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 4. С. 130–143. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-130-143

Ecological Safety and Economic Profitability of a Recreation Object in the Coast – Sea System

I. E. Timchenko, E. M. Igumnova, A. S. Beskorovayny*

Marine Hydrophysical Institute of RAS, Sevastopol, Russia

**e-mail: hardy-94@mail.ru*

Submitted 02.09.2020; revised 11.11.2020; published 25.12.2020

A model of ecological safety of a recreation object has been developed that allows linking the volume and quality of recreational services with the risk of contamination of the marine environment by the by-products of the recreation process and in particular, by the waste water of the facility. The model combined the economic system of profit-making and the ecological system of control over the ecological state of coastal marine environment through management of an ecological safety resource. As an ecological safety resource, the value of risk of infecting a vacationer with various diseases associated with specific types of pollution has been considered. It is assumed that this risk is proportional to the rate of increase in the concentration of pollution entering the marine environment during delivery of services, and inversely proportional to the rate of decrease in this concentration due to self-cleaning of the environment and/or environmental measures. An increase in the concentration of pollution compared to the stationary (background) value meant the consumption of an environmental resource and a corresponding increase in the risk of infection of vacationers. The model is based on the concept of an environmentally safe stationary state of the marine ecosystem, in which these rates are equal and the risk of infection of vacationers with bacterial, viral and other types of infection is absent. The volume of production of recreational services depended on the value of the ecological safety index, which determined the integral speed balance. This index was equal to one when the risk of infection was absent and exponentially decreased with the growth of this imbalance. Thus, the size of the risk of infection of the object's ecosystem depended on the intensity of its work. The equations of the model are constructed by the method of adaptive balance of causes, which include logical control agents that make local decisions. In computational experiments on the example of Sevastopol Bay, scenarios for the volume of recreational services, the level of marine pollution, penalties for pollution, and integral volumes of consumption and reproduction of an environmental resource are constructed. The conclusion is made about the usefulness of such models for monitoring the level of environmental safety of a recreation facility.

Keywords: ecological safety resource, ecological safety index, method of adaptive balance of causes, adaptive model, ecological-economic system, recreational activity, model management agents, recreation process scenarios, Sevastopol Bay.

Acknowledgements: the research is performed under topic no. 0827-2018-0004 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems” (coded as “Coastal studies”). Development of the ecological safety model and computational experiments on recreational process management in the system coast – Sevastopol Bay are funded by the RFBR and the Government of Sevastopol and performed under scientific project no. 18-47-920001.

For citation: Timchenko, I.E., Igumnova, E.M. and Beskorovayny, A.S., 2020. Ecological Safety and Economic Profitability of a Recreation Object in the Coast-Sea System. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (4), pp. 130–143. doi:10.22449/2413-5577-2020-4-130-143 (in Russian).

Введение

Рекреационная деятельность в прибрежной зоне моря связана с использованием морской среды для отдыха и оздоровления людей. Прибрежная морская акватория – естественная среда для многих микроорганизмов, которые могут оказывать негативное влияние на потенциал объекта рекреации. Экономическая выгода, получаемая от использования этого потенциала, зависит от риска загрязнения морской среды веществами и организмами, представляющими опасность для здоровья людей. Поэтому экологическая безопасность купаний в море в данном исследовании рассматривалась как особый вид ресурса экологической безопасности объекта рекреации. Этот вид ресурса учитывал способность морской экосистемы утилизировать вредные для здоровья людей химические вещества и биологические объекты, поступающие в море в процессе оказания рекреационных услуг.

В работах по экологической экономике природно-хозяйственных систем рассмотрены проблемы взаимодействия предприятий, потребляющих природные ресурсы, с органами экологического контроля состояния природной среды [1–7]. В частности, для контроля состояния ресурса экологической безопасности прибрежной зоны моря предложено использовать адаптивные модели эколого-экономических систем берег – море [8–13].

Моделирование является ключевым компонентом целого ряда наук, от математики до наук об окружающей среде и экологии. В работе [6] показано, как адаптивные модели с использованием интегральных уравнений и программного обеспечения могут применяться для создания значимых качественных описаний системной динамики эколого-экономических систем. Используя специальный набор дифференциальных уравнений, модель дает возможность получить некоторое качественное понимание общего поведения системы. Показывается, как, связав смоделированные сценарии, теорию систем и фактические показатели, можно охарактеризовать устойчивость системы, ее критические параметры, оптимальный объем ее использования адаптивное управление системой и т. д.

Цель настоящей работы состоит в создании адаптивной модели эколого-экономической системы управления объемом оказываемых рекреационных услуг по критериям их рентабельности и риска загрязнения морской

среды опасными для здоровья рекреантов веществами и болезнетворными организмами. Предполагалось, что конкретный объект рекреации обладает ограниченной ресурсной емкостью экологической безопасности, поскольку существует естественный предел количества одновременно оказываемых рекреационных услуг. Превышение этого предела понижает качество услуг и нарушает условия экологической безопасности курорта. Считалось, что риск заражения рекреантов пропорционален интегральному дисбалансу скоростей увеличения концентрации загрязнений в морской среде в процессе оказания рекреационных услуг и уменьшения этой концентрации вследствие самоочищения среды и/или природоохранных действий.

Материалы и методы

Структура модели эколого-экономических процессов, сопровождающих потребление рекреационного ресурса морской среды, представлена на схеме причинно-следственных связей, которая приведена на рис. 1. Считалось, что единицей продукции экономической части модели объекта рекреации является рекреационная услуга – определенное по времени и по объему количество действий, направленных на отдых и оздоровление пользователей объекта рекреации (рекреантов). Экологическая безопасность *ES* потребления рекреационного ресурса объекта определяется условиями и качеством предоставляемых рекреационных услуг. Обеспечение экологической безопасности состоит в оценке риска заражения рекреанта инфекционными заболеваниями. Основным источником риска служила чрезмерная интенсивность работы курортного объекта, нарушающая санитарно-эпидемиологические нормы рекреационного процесса.

Считалось, что на объекте рекреации осуществляется регулярный микробиологический контроль морской среды, показанный в блоке наблюдаемого уровня *ES* на рис. 1. Этот уровень определяла концентрация вредных загрязняющих веществ *PL*, которая была связана с объемом производства рекреационных услуг *V*, контролируемым агентами управления модели эколого-экономической системы.

Согласно санитарно-эпидемиологическим требованиям к охране прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения, в морских водах рекреационного назначения в обязательном порядке необходимо регистрировать: число общих колиформных бактерий (ОКБ), число *E. coli*, колифагов, энтерококков и стафилококков. Дополнительными показателями при исследовании морской воды служили: число бактерий родов *Shigella*, *Salmonella*, *Legionella* и проч., а также число вирусов. Помимо этого, в начале купального сезона (т. е. непосредственно перед максимальной антропогенной нагрузкой на прибрежные морские воды) устанавливалось число жизнеспособных яиц гельминтов и цистопатогенных кишечных простейших микроорганизмов¹⁾.

¹⁾ Санитарно-эпидемиологические требования к охране прибрежных вод морей от загрязнения в местах водопользования населения. М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 19 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/43d/4293823844.pdf> (дата обращения: 10.12.2020).

Оценка порогового значения уровня загрязнения PL^* , при котором возникал отличный от нуля риск заражения рекреанта, имела принципиальное значение.

Для количественной оценки риска был использован индекс ресурса экологической безопасности морской среды $R(t)$, который входил в логический оператор управления ресурсом экологической безопасности AG_{ES} и определял скорости изменения риска:

$$AG_{ES} = IF\left\{\{PL < PL^*; 1; IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; R(t); R(t) + [1 - R(t)][1 - \exp(-\beta_R \tau)]\}\}\right\}, \quad (1)$$

где $R(t) = \exp(-\alpha_R t)$.

Функции TX_{acc} и TX_{acc}^* учитывали условие, при котором риск заражения мог быть уменьшен за счет природоохранных действий (см. рис. 1). Риск заражения возрастал по мере увеличения интегрального дисбаланса скоростей накопления и деструкции загрязнений в морской среде, зависевших от объемов производства рекреационных услуг V , природоохранных действий и самоочистительных свойств морской среды, заданных показателями экспонент в выражении (1). Дисбаланс скоростей $B(t)$ представлял собой интегральную на интервале времени $(0, t)$ оценку разности между скоростью увеличения риска заражения рекреантов $ES_{ext}(t)$ вследствие высокой концентрации опасных веществ и биологических организмов в прилегающей морской среде и скоростью уменьшения этого риска $ES_{rec}(t)$ в результате самоочищения среды, ограничения объема услуг и усиления природоохранных действий. Он оценивался по формуле

$$B(t) = ES_{ext}(t) - ES_{rec}(t) = a_{B/V} \int_0^t [1 - R(\tau)] V(\tau) d\tau. \quad (2)$$

Задача управления уровнем экологической безопасности заключалась в слежении за уровнем загрязнения моря PL параллельно с контролем рентабельности производства рекреационных услуг EF , поскольку стоимость их реализации P должна была быть выше их себестоимости E . Эти функции выполняли: агент контроля экологической безопасности AG_{ES} и агент объема рекреационных услуг AG_V . При условии $PL > PL^*$ включался механизм ограничения объема услуг по уровню экологической безопасности. Это же условие было использовано для очистки морской среды от загрязнений путем природоохранных действий, когда штрафные санкции, аккумулированные в фонде очистки от загрязнений, достигали величины TX_{acc}^* .

В качестве внешних условий, влияющих на систему, рассматривались сезонные изменения рекреационной привлекательности объекта и спроса на его услуги, а также влияние погодных условий (температуры и ветра) на концентрацию болезнетворных организмов в морской среде.

Для формализации предложенной концептуальной модели был применен метод адаптивного баланса влияний [5, 9], суть которого состояла в том, что динамические уравнения эколого-экономических процессов связывали скорости изменения процессов с самими процессами отрицательными обратными связями второго порядка. Было введено стационарное состояние системы берег – море, при котором все процессы u_i , описываемые моделью,

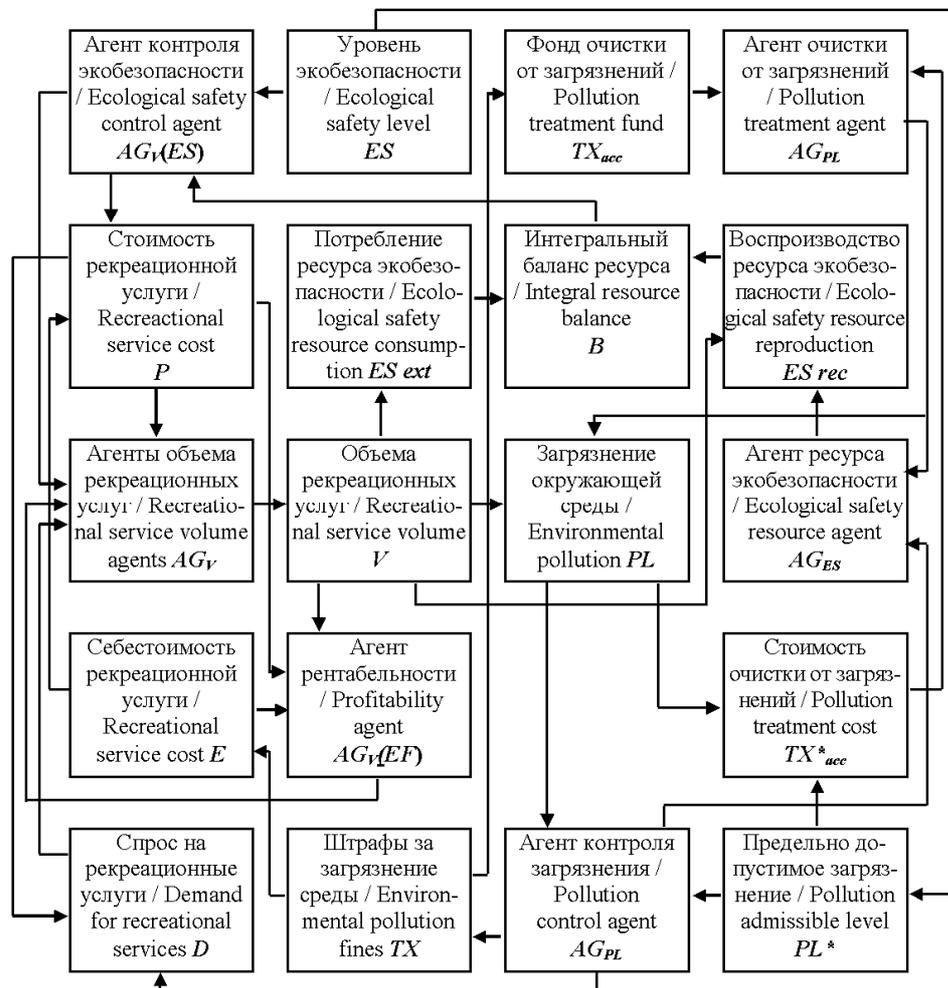


Рис. 1. Концептуальная модель эколого-экономической системы управления процессами потребления и воспроизводства рекреационного ресурса и ресурса экологической безопасности

Fig. 1. Conceptual model of the ecological and economic system for management of consumption and reproduction of the recreational resource and ecological safety resource

сохраняли свои средние значения C_i . Внешние влияния A_i возбуждали в модели отклонения процессов развития от своих стационарных состояний $u_i = u_i' - C_i$, причем, благодаря специальному выбору системы дифференциальных уравнений метода адаптивного баланса влияний, модель автоматически подстраивала все сценарии друг к другу и к внешним влияниям. Механизм отрицательных обратных связей обеспечивал сохранение материальных балансов реакций взаимодействия моделируемых процессов благодаря логистической структуре уравнений модели.

Система уравнений адаптивной модели эколого-экономической системы объекта рекреации имела следующий общий вид:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \{C_i - [u_i - \sum_{k=1, k \neq i}^m a_{ik}(u_k - C_k) + \sum_{l=m+1, l \neq i}^n a_{il}(u_l - C_l) - A_i]\}, \quad (3)$$

$$u_i = IF[u_i < 0; 0, 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)], \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

где r_i – удельные скорости изменения функций; u_i , a_{ik} и a_{il} – коэффициенты положительных и отрицательных влияний, учитывающие внутрисистемные взаимодействия; A_i – внешние влияния на систему. Оценки коэффициентов влияний определялись по отношениям средних значений взаимодействующих процессов, приведенным к размерностям основной переменной u_i в каждом из уравнений модели:

$$a_{ik} = C_i(2mC_k)^{-1}, \quad a_{il} = C_i[(2(n-m)C_l)]^{-1}. \quad (5)$$

Условия (4) контролировали нахождение решений уравнений модели в пределах заданных интервалов изменчивости переменных ($0 \leq u_i \leq 2C_i$).

Результаты и обсуждение

Формальная модель эколого-экономической системы потребления и воспроизводства рекреационного ресурса и ресурса экологической безопасности была построена в соответствии со схемой причинно-следственных связей (рис. 1) на основании уравнений (3) с условиями (4)–(5). Система уравнений адаптивной модели объекта рекреации имела следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{dD}{dt} &= 2r_D D [C_D - (D + a_{D/P} P)]; \\ \frac{dP}{dt} &= 2r_P P [C_P - (P - a_{P/E} E - P^*)]; \\ \frac{dV}{dt} &= 2r_V V \{C_V - [V - a_{V/D} D' + AG_V(EF) + AG_V(ES)]\}; \\ AG_V(EF) &= IF[P > E; 0; C_V \exp(P - E)]; \\ AG_V(ES) &= IF\langle B = 0; 0; C_V \{1 - \exp[-B(t)]\} \rangle; \\ \frac{dE}{dt} &= 2r_E V \{C_E - [E - a_{E/TX} TX' + E^*]\}; \\ \frac{dES}{dt} &= 2r_{ES} ES \langle 0, 5 - \{ES - [1 - R(t)]\} \rangle; \\ \frac{dPL}{dt} &= 2r_{PL} PL \{C_{PL} - [PL - a_{PL/V} V' + AG_{PL}(TX_{acc}, TX_{acc}^*) - A_{PL}(AT, WF)]\}; \\ AG_{PL}(TX_{acc}, TX_{acc}^*) &= IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; 0; C_{PL} [1 - \exp(-\alpha_{PL} \tau)]\}; \\ A_{PL}(AT, WF) &= C_{PL} C_{AT}^{-1} AT' + C_{PL} C_{WF}^{-1} WF'; \\ TX_{acc}(t) &= \int_0^t TX(\tau) d\tau; \\ \frac{dTX}{dt} &= 2r_{TX} TX \{C_{TX} - [TX - AG_{TX}(PL, PL^*) - TX^*]\}; \\ AG_{TX}(PL, PL^*) &= IF[PL < PL^*; 0; a_{TX/PL}(PL - PL^*)]. \end{aligned} \quad (6)$$

Штрихами в уравнениях (6) обозначены отклонения переменных от своих средних значений, звездочками – заданные величины. Эффективность потребления рекреационного ресурса морской среды EF оценивалась интегрально путем сопоставления доходов экономической системы I_{acc} и ее расходов E_{acc} за период времени $(0, t)$:

$$I_{acc} = \int_0^t P^*V(t)dt, \quad E_{acc} = \int_0^t E(t)V(t)dt, \quad EF = \ln \frac{1+I_{acc}}{1+E_{acc}}. \quad (7)$$

В уравнении производства услуг агент управления применял ограничение их объема всякий раз, когда скорость заражения морской среды превышала скорость деструкции загрязнений. Стоимость очистки среды (восстановления уровня экологической безопасности или нулевого риска заражения) была задана как переменная величина. Она зависела от степени превышения уровнем загрязнения предельно допустимого значения PL^* .

Для проверки предлагаемого механизма контроля экологической безопасности курорта были выполнены вычислительные эксперименты с моделью (1)–(7). Количественная оценка моделируемых эколого-экономических процессов в системе берег – море объекта рекреации производилась с использованием безразмерной шкалы чисел (баллов) $(0, 10)$. Локальные решения в модели осуществляли логические операторы (агенты) управления. С целью упрощения экспериментов стоимость очистки берегового стока от загрязнений была принята постоянной.

В первой серии экспериментов для проверки способности модели прогнозировать адаптированные друг к другу сценарии эколого-экономических процессов был имитирован годовой цикл потребления ресурса экологической безопасности. На рис. 2 показаны использованные в модели сценарии годовой изменчивости основных факторов, определяющих уровень экологической безопасности объекта рекреации: риска заражения рекреантов ES , индекса ресурса экологической безопасности AG_{ES} и баланса скоростей потребления и воспроизводства ресурса экологической безопасности B .

Условия развития эколого-экономических процессов в начале эксперимента были благоприятными для экономической части модели. Несмотря на то что себестоимость рекреационных услуг сначала была ниже их стоимости, которая была принята постоянной, объем оказания услуг был нулевым. При этом уровень штрафов (налогов) оставался неизменным при отсутствии рекреационных услуг. Начиная с 80-го дня эксперимента объем оказания услуг стал заметно возрастать и достиг уровня спроса к 150-му дню,

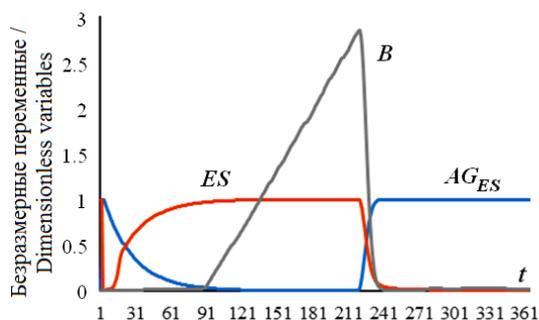


Рис. 2. Имитированные сезонные изменения факторов, характеризующих уровень экологической безопасности объекта рекреации

Fig. 2. Simulated seasonal changes of factors characterizing the ecological safety level of a recreation facility

что повлекло за собой рост уровня загрязнения окружающей среды и штрафов (рис. 3, *c*). Рост штрафных санкций привел к тому, что в пик сезонной активности рекреационной деятельности (151–220-й день эксперимента) себестоимость услуги оказалась выше ее цены и агент управления AG_V существенно ограничил их объемы (рис. 3, *a*).

Вместе с тем повышенные размеры штрафных санкций привели к увеличению фонда очистки от загрязнений TX_{acc} . При достижении этим фондом порогового значения TX_{acc}^* (на 211-е сутки эксперимента) агент очистки берегового стока от загрязнений включил режим воспроизводства ресурса экологической безопасности за счет понижения концентрации загрязнений в море.

С этого момента уровень загрязнения морской среды начал резко убывать (рис. 3, *c*), себестоимость услуги стала значительно снижаться относительно ее цены (рис. 3, *a*), а индекс ресурса экологической безопасности вновь приобрел динамику роста (рис. 3, *b*).

Во второй серии экспериментов, результаты которых приведены на рис. 4, учитывалось влияние сезонного хода погодных условий на потребление и воспроизводство рекреационного ресурса и ресурса экологической безопасности. Эксперимент был проведен на примере Севастопольской бухты. С этой целью по данным наблюдений температуры воздуха и модуля скорости ветра над акваторией Севастопольской бухты в точке с координатами 44.61° с. ш., 34.52° в. д. (URL: www.meteoblue.com/ru/; www.sevmeteo.info)

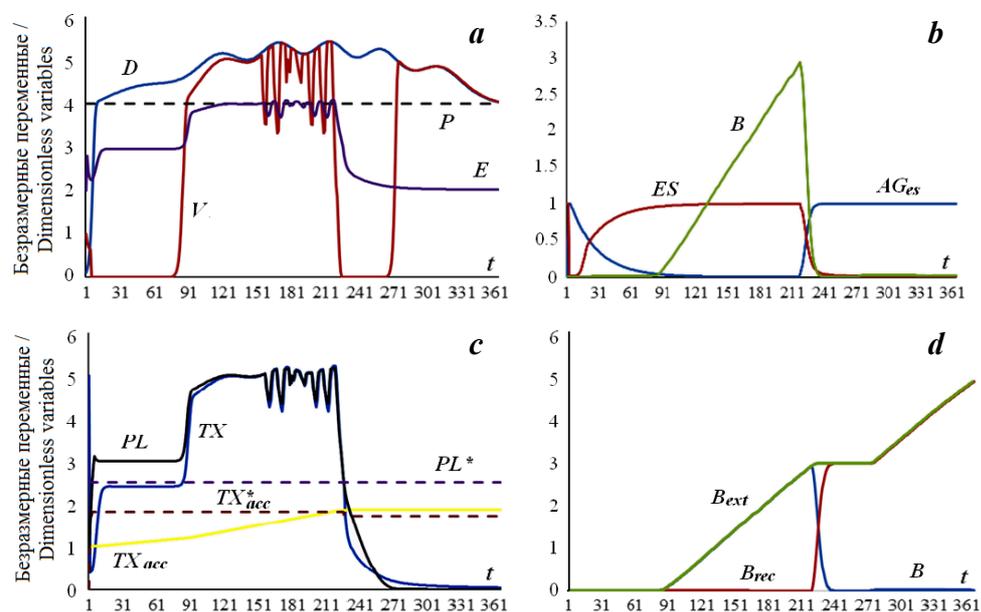


Рис. 3. Сценарии эколого-экономических процессов, прогнозируемые моделью в первой серии вычислительных экспериментов. Графики TX_{acc} и TX_{acc}^* приведены с масштабирующим множителем 0.001, график ES_{ext} и ES_{rec} – с множителем 0.03

Fig. 3. Ecological-economic process scenarios as predicted by a model in the first series of computational experiments. The scale factor for charts TX_{acc} and TX_{acc}^* is 0.001, that for charts ES_{ext} and ES_{rec} is 0.03

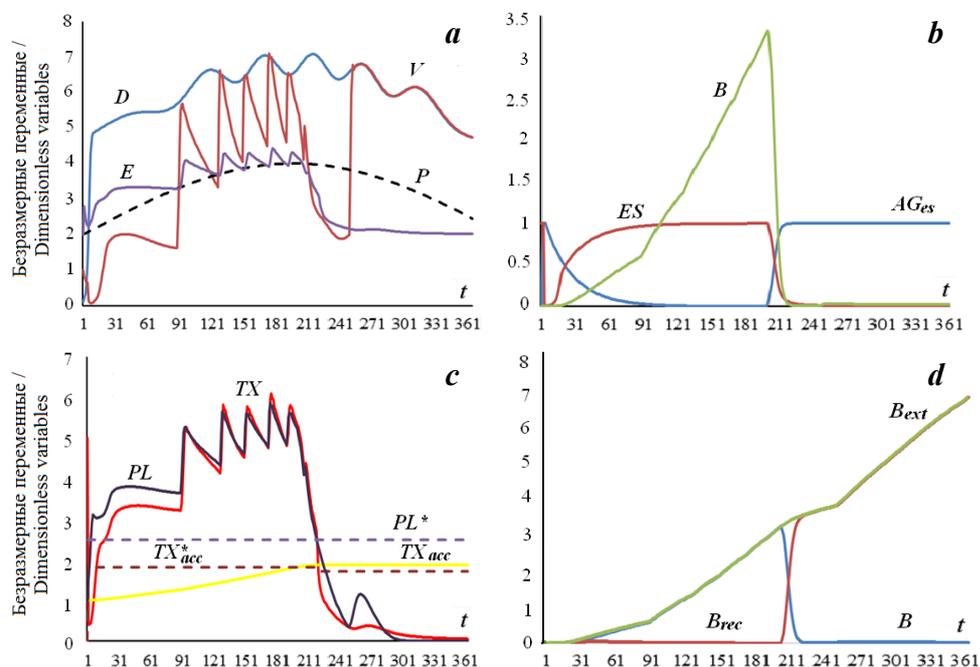


Рис. 4. Сценарии эколого-экономических процессов с учетом переменной цены услуги. Графики TX_{acc} и TX^*_{acc} приведены с масштабирующим множителем 0.001, график ES_{ext} и ES_{rec} – с множителем 0.03

Fig. 4. Ecological and economical process scenarios with the service price variable taken into account. The scale factor for charts TX_{acc} and TX^*_{acc} is 0.001, that for charts ES_{ext} and ES_{rec} is 0.03

была сформирована функция внешнего влияния $A_{PL}(AT, WF)$ в уравнении для уровня загрязнения моря PL . Предполагалось, что положительные отклонения функции влияния от среднегодового хода вызывают пропорциональный рост концентрации загрязняющих веществ в бухте [14], который отражается на эколого-экономических сценариях рекреации. Положительными факторами, способствующими увеличению концентраций микроорганизмов и органических веществ в морской среде, служили повышение температуры и отсутствие ветра, отрицательными – сильный ветер и понижение температуры. Среднее значение температуры воздуха C_{AT} в формуле $A_{PL}(AT, WF)$ составляло $14.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, а модуля скорости ветра C_{WF} – 6.4 м/с .

Учет внешних влияющих факторов привел к увеличению дисбаланса скоростей потребления и воспроизводства ресурса экологической безопасности (рис. 4, *b*). Амплитуда колебаний уровня загрязнения PL , а следовательно, и размеры штрафов TX существенно выросли (рис. 4, *c*). Увеличились колебания себестоимости услуг E по отношению к их цене P , усредненный внутригодовой сценарий которой показан штриховой линией на рис. 4, *a*. Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что при учете влияния метеорологических наблюдений на скорость воспроизводства ресурса экологической безопасности уровень риска заражения морской среды в точке расположения наблюдений заметно вырос (рис. 4, *c*).

Заключение

Система экологической безопасности объекта рекреации должна быть построена на оценках риска заражения рекреантов. Эти риски прогнозируются моделью эколого-экономической системы объекта по данным о планируемом объеме рекреационных услуг и санитарно-эпидемиологическом состоянии прибрежной морской среды. В настоящем исследовании для прогноза рисков предложена адаптивная модель подобной системы, которая основана на слежении за интегральным балансом скоростей потребления и воспроизводства ресурса экологической безопасности. Для количественной оценки этого вида ресурса предложен индекс экологической безопасности, имеющий значение 1 (когда скорости накопления и деструкции загрязнения совпадают и риск заражения равен нулю) и значения убывающей экспоненциально функции (когда скорость деструкции отстает от скорости накопления). Таким образом, концентрация ресурса и индекс экологической безопасности дополняют друг друга до единицы. Предельно допустимой считалась такая концентрация загрязнения морской среды, при которой риск заражения становился больше нуля.

Предложенная модель слежения за экологической безопасностью объекта рекреации позволяет прогнозировать сценарии концентрации загрязнения морской среды, связанные с объемами оказываемых рекреационных услуг и, следовательно, с экономической эффективностью объекта рекреации. Система логических агентов управления, включенная в структуру модели, позволяет непрерывно сопоставлять ожидаемую прибыль объекта с затратами, связанными с соблюдением санитарно-эпидемиологических норм природопользования. Как показали результаты проведенных вычислительных экспериментов, использование подобных агентов управления в правых частях дифференциальных уравнений логистического типа адаптивной модели позволяет разрабатывать согласованные между собой сценарии динамики экономической рентабельности производства рекреационных услуг и прогнозировать характеристики экологической безопасности окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daly H. E., Farley J.* Ecological Economics: Principles and Applications. Second edition. Washington, DC : Island Press, 2010. 544 p. URL: http://library.uniteddiversity.coop/Measuring_Progress_and_Eco_Footprinting/Ecological_Economics-Principles_and_Applications.pdf (date of access: 11.11.2020).
2. *Ofiara D. D., Seneca J. J.* Economic losses from marine pollution: a handbook for assessment. Washington, DC : Island Press, 2001. 388 p.
3. 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)
4. *Samhuri 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>
5. *Тимченко И. Е., Изумнова Е. М., Тимченко И. И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. 224 с.
6. *Voinov A.* Systems science and modeling for ecological economics. Academic Press, 2008. 432 p.

7. *Ivanov V. A., Igumnova E. M., Timchenko I. E.* Coastal zone resources management. Kyiv : Academperiodica, 2012. 304 p. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.192.304>
8. *Timchenko I. E., Igumnova E. M., Timchenko I. I.* Adaptive balance models for environmental-economic systems. Create Space Independent Publishing Platform, 2016. 486 p.
9. *Тимченко И. Е., Игумнова Е. М.* Современные системы управления рекреационными ресурсами прибрежной зоны моря // Морские ресурсы прибрежной зоны Украины / Под ред. П. Ф. Гожики и В. А. Иванова. Севастополь : МГИ НАНУ, 2012. С. 145–155.
10. *Тимченко И. Е.* Имитационная модель трансформации рекреационного объекта на базе перехода к ресурсосберегающим технологиям // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2013. Т. 9, вып. 2, часть 1. С. 83–95.
11. Ecological-Economic Model of Managing Recreational Potential of the Sea Coastal Zone / I. E. Timchenko [et al.] // *Physical Oceanography*. 2018. Vol. 25, iss. 5. P. 420–432. doi:10.22449/1573-160X-2018-5-420-432
12. Управление эколого-экономическими процессами потребления рекреационных ресурсов прибрежной зоны моря / И. Е. Тимченко [и др.] // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 97–106. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-97-106
13. Санитарно-микробиологический контроль морских вод в местах рекреационного водопользования республики Крым и Краснодарского края / С. В. Иванов [и др.] // *Modern Science*. 2019. № 4–3. С. 17–22.
14. *Совга Е. Е., Мезенцева И. В.* Экологическое состояние центральной части акватории Севастопольской бухты в зависимости от уровня антропогенной нагрузки // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2019. № 3. С. 52–60. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-52-60

Об авторах:

Тимченко Игорь Евгеньевич, заведующий отделом системного анализа, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ResearcherID: A-8650-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-4673-7609**, **SPIN-код: 5239-1828**

Игумнова Екатерина Михайловна, ведущий инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 5950-7785**, **Author ID: 861018**

Бескоровайный Александр Сергеевич, инженер, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), аспирант, **ResearcherID: A-11281-2020**, **IstinaResearcherID (IRID): 238026097**

Заявленный вклад авторов:

Тимченко Игорь Евгеньевич – постановка задачи исследования, концептуализация и формализация адаптивной модели эколого-экономической системы, формирование статьи

Игумнова Екатерина Михайловна – расчет интегрального баланса скоростей потребления и воспроизводства ресурса экологической безопасности, оценка результатов расчета, анализ сезонного хода метеорологических условий над акваторией Севастопольской бухты

Бескорвайный Александр Сергеевич – анализ метода адаптивного баланса влияний, проведение расчетов индекса экологической безопасности, проведение вычислительных экспериментов, расчет сценариев эколого-экономических процессов, анализ результатов расчета

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Daly, H.E. and Farley, J., 2010. *Ecological Economics: Principles and Applications*. Second edition. Washington, DC: Island Press, 544 p. URL: http://library.uniteddiversity.coop/Measuring_Progress_and_Eco_Footprinting/Ecological_Economics-Principles_and_Applications.pdf [Accessed: 11 November 2020].
2. Ofiara, D.D. and Seneca, J.J., 2001. *Economic Losses from Marine Pollution: a Handbook for Assessment*. Washington, DC: Island Press, 388 p.
3. Costanza, R., Voinov, A., Boumans, R., Maxwell, T., Villa, F., Wainger, L. and Voinov, H., 2002. Integrated Ecological Economic Modeling of the Patuxent River Watershed, Maryland. *Ecological Monographs*, 72(2), pp. 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)
4. Samhuri, J.F. and Levin, P.S., 2012. Linking Land- and Sea-Based Activities to Risk in Coastal Ecosystems. *Biological Conservation*, 145(1), pp. 118–129. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.10.021>
5. Timchenko, I.E., Igumnova, E.M. and Timchenko, I.I., 2000. *System Management and ABC-Technologies of Sustainable Development*. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika, 224 p. (in Russian).
6. Voinov, A., 2008. *Systems Science and Modeling for Ecological Economics*. Academic Press, 432 p.
7. Ivanov, V.A., Igumnova, E.M. and Timchenko, I.E., 2012. *Coastal Zone Resources Management*. Kyiv: Academperiodica, 304 p. doi:10.15407/akademperiodyka.192.304
8. Timchenko, I.E., Igumnova, E.M. and Timchenko, I.I., 2016. *Adaptive Balance Models for Environmental-Economic Systems*. Create Space Independent Publishing Platform, 486 p.
9. Timchenko, I.E. and Igumnova, E.M., 2012. [Modern Management Systems for Recreational Resources of the Coastal Area of Sea]. In: MHI, 2012. [*Marine Resources of the Coastal Area of Ukraine*]. Sevastopol: MHI, pp. 145–155 (in Russian).
10. Timchenko, I.E., 2013. Simulation Model of Transformation Recreational Facility on the Basis of the Transition to a Resource-Saving Technologies. *Geopolitics and Ecogeodynamics of Regions*, 9(2–1), pp. 83–95 (in Russian).
11. 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. *Physical Oceanography*, 25(5), pp. 420–432. doi:10.22449/1573-160X-2018-5-420-432
12. Timchenko, I.E., Igumnova, E.M., Svishchev, S.V. and Bezkorovainy, A.S., 2019. Management of Ecological-Economic Processes Consumption of the Recreational Resource of the Coastal Zone of the Sea. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 97–106. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-97-106 (in Russian).
13. Ivanov, S.V., Ismailova, M.E., Kondakova, Yu.M. and Ramazanov, E.T., 2019. Sea Water Sanitary-Microbiological Control in Places of Recreational Water Use in the Republic of Crimea and Krasnodar Krai. *Modern Science*, (4–3), pp. 17–22 (in Russian).

14. Sovga, E.E. and Mezentseva, I.V., 2019. Ecological Condition of the Central Part of Sevastopol Bay depending on the Anthropogenic Load Level. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (3), pp. 52–60. doi:10.22449/2413-5577-2019-3-52-60 (in Russian).

About the authors:

Igor E. Timchenko, Head of System Analysis Department, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), Dr. Sci. (Phys.-Math.), **ResearcherID: A-8650-2017**, **ORCID ID: 0000-0003-4673-7609**, **SPIN-code: 5239-1828**, *timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru*

Ekaterina M. Igumnova, Leading Engineer, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **SPIN-code: 5950-7785**, **Author ID: 861018**

Aleksandr S. Beskorovayny, engineer, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), postgraduate student, **ResearcherID: A-11281-2020**, **IstinaResearcherID (IRID): 238026097**, *hardy-94@mail.ru*

Contribution of the authors:

Igor E. Timchenko – research task setting, conceptualization and formalization of the adaptive model of ecological-economic system, article composition

Ekaterina M. Igumnova – calculation of integral balance of consumption and reproduction rate of the ecological safety resource, calculation result analysis, analysis of meteorology seasonal variation over the Sevastopol Bay water area

Aleksandr S. Beskorovayny – analysis of the method of adaptive balance of causes, calculation of ecological safety index, computational experiment performance, assessment of ecological and economical process scenarios, calculation result analysis

All the authors have read and approved the final manuscript.