

В.А.Иванов, Е.М.Игумнова, И.Е.Тимченко

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ИНТЕГРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА

Предложена эколого-экономическая модель производственных операций в Керченском проливе, предназначенная для прогнозирования рентабельности операций в условиях контроля за экологическим состоянием морской среды и рисками чрезвычайных ситуаций в зоне пролива. Модель построена методом адаптивного баланса влияний с применением агентов управления в уравнениях модели. Выполнен вычислительный эксперимент по прогнозированию сценариев развития процессов в системе при заданных внешних условиях (спрос на операции в проливе, стоимости основных видов экономических и экологических ресурсов, объемы природоохранных мероприятий и др.). Делаются выводы о перспективах применения интегральных моделей адаптивного баланса влияний для управления процессами хозяйственного использования зоны пролива.

Район Керченского пролива представляет собой сложную эколого-экономическую систему, в которой интенсивная хозяйственная деятельность вступает в противоречие с задачами охраны экологического состояния морской среды. Для управления производственными операциями в зоне пролива полезными могут оказаться информационные технологии, основанные на интегральных моделях природно-хозяйственных систем [1]. Несмотря на существенное упрощение реальных процессов, происходящих в зоне пролива, интегральные модели позволяют оценить главные факторы его экономического использования с учетом условий сохранения биоразнообразия морской среды. Интегральное описание возможных сценариев развития в моделях системы пролива дает возможность принимать решения, направленные на уменьшение рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, связанных с погодными или техногенными факторами.

Основной экономической операцией в зоне пролива является перевалка разнообразных грузов, поступающих из мелководного Азовского моря. В южной части пролива расположены накопители, в которые небольшие суда сливают нефтепродукты, в дальнейшем перекачиваемые на крупнотоннажные танкеры. В северной – производится перевалка сыпучих грузов. По данным Интернет-источников [2] в 2007 г. на рейде в проливе компаниями ТНК-БП, ЛУКОЙЛ и «Роснефть» было перевалено более семи миллионов тонн нефти. За это же время было перевалено около трех миллионов тонн сыпучих грузов (сера, уголь, зерно, удобрения).

Экстремальные погодные условия могут существенно повлиять на проведение морских операций в проливе. В период времени с ноября по март в зоне пролива преобладают северо-восточные ветры, отличающиеся значительной скоростью и продолжительностью. Летом часты ветры южных направлений. Во время сильного шторма 11 ноября 2007 г. в Керченском про-

ливе произошли крушения 4 судов, в результате которых в водную среду попало около 7 тыс. т серы и до 2 тыс. т нефтепродуктов [3].

Керченский пролив является путем миграции рыб между Азовским и Черным морем, в том числе многих видов, включенных в Красные книги причерноморских стран и Список редких и исчезающих видов Международного союза охраны природы. В результате загрязнения моря нефтепродуктами и вредными химическими веществами рыбным ресурсам Азово-Черноморского бассейна наносится значительный ущерб. Во многом это связано с тем обстоятельством, что проведение грузовых операций в проливе не зависит от состояния морской экосистемы пролива. Недостаточно средств выделяется для прогнозирования чрезвычайных ситуаций и проведения мероприятий с целью противодействия их последствиям.

Целью настоящей работы является попытка связать в рамках общей модели три основных процесса развития природно-хозяйственной системы Керченского пролива: уровень экономической рентабельности производственных операций в проливе, индекс биоразнообразия морской экосистемы зоны пролива и уровень загрязнения морской среды, происходящего как от производственной деятельности, так и вследствие чрезвычайных ситуаций. Основное внимание будет уделено построению сценариев этих процессов, характеризующих эколого-экономический баланс хозяйственного использования пролива.

Концептуальная модель эколого-экономической системы зоны Керченского пролива. Задача управления ресурсами зоны Керченского пролива заключается в обеспечении таких условий, при которых рентабельность производственных операций в нем будет иметь максимально высокое значение, экологическое состояние морской среды будет сохраняться на достаточно высоком уровне, а риск негативных последствий от возможных чрезвычайных ситуаций будет сведен к минимуму. При такой постановке задачи рентабельность производства зависит от расходов производственной системы пролива на проведение операций, на природоохранные мероприятия и на меры противодействия чрезвычайным ситуациям. Иными словами, для получения прибыли производственная система вынуждена приобретать определенные количества трех видов ресурсов: экономических, экологических и противодействия чрезвычайным ситуациям. Основными регуляторами эколого-экономического баланса хозяйственного использования пролива становятся цены на каждый из трех видов ресурсов. Для того, чтобы ввести цены на эти ресурсы, необходимо пояснить, какой смысл вкладывается в понятия единицы каждого из трех видов ресурсов.

Определим в качестве единицы экономического ресурса объем затрат материальных и финансовых средств системы пролива, связанный с проведением в нем типичной производственной операции: обеспечение перевалки груза для некоторого судна среднего тоннажа. В денежном выражении стоимость единицы экономического ресурса определяется отношением затрат на поддержание инфраструктуры обеспечения производственных операций в проливе к максимально возможному количеству типовых операций, осуществляемых в нем за единичный интервал времени, например, за одни сутки. Иными словами, количество единиц экономических ресурсов, которыми располагает в данный момент времени производственная система проли-

ва, характеризует ее пропускную способность. Дальнейшее увеличение объема производственных операций возможно лишь при увеличении мощности инфраструктуры этой системы, что связано с дополнительными инвестициями на приобретение недостающих единиц экономических ресурсов.

Экологическое состояние морской среды в зоне пролива будем характеризовать некоторым интегральным показателем, например, индексом биоразнообразия. Биологическая продуктивность морских вод является сложной функцией многих параметров, среди которых основную роль играют пищевые цепи гидробионтов, содержание кислорода, нутриентов и других химических веществ, определяющих условия существования морских организмов экосистемы. Загрязнение среды их обитания нефтепродуктами и другими вредными веществами, обычно связанное с транспортировкой и перевалкой грузов в море, может существенно изменить состояние экосистемы и поставить ее на грань деградации.

Будем исходить из предположения о том, что подобно экономическим мерам, направленным на поддержание на должном уровне экономической инфраструктуры пролива, необходимо постоянно осуществлять экологические мероприятия, направленные на сохранение морской экосистемы пролива. Производственная система пролива должна выделять специальные средства на выполнение природоохранных действий, которые были бы достаточны для поддержания экологической ситуации на экологически оправданном уровне. Степень ухудшения экологической ситуации, связанная с проведением единичной производственной операции в проливе, может служить мерой экономических санкций, предъявляемых к производственной системе пролива. Размер этих санкций – экологический штраф или природоохранный налог можно рассматривать как стоимость единицы экологического ресурса, приобретаемого производством для проведения единичной производственной операции.

Еще один вид неизбежных расходов экономической системы связан с риском возникновения чрезвычайных ситуаций (ЧС) в зоне пролива, вызванных природными или антропогенным факторами. Для предотвращения или, по крайней мере, смягчения негативных последствий от чрезвычайных ситуаций в проливе необходима постоянно действующая инфраструктура, которая должны выполнять функции контроля за потенциально опасными процессами природного или антропогенного воздействия на эколого-экономическую систему пролива. Мы будем называть ее системой противодействия чрезвычайным ситуациям. Часть расходов, обеспечивающих функционирование системы противодействия, должна нести производственная система пролива, поскольку ее работа служит источником риска чрезвычайных ситуаций.

Другим источником риска служат аномальные погодные условия в зоне пролива. Наиболее значимыми в этом отношении являются аномально высокая скорость ветра и аномально низкие температуры воздуха. Специфика производственных операций в проливе такова, что аномальные погодные условия вызывают аварии морских судов, которые, как правило, сопровождаются загрязнением акватории пролива нефтепродуктами и другими вредными веществами, негативно влияющими на морскую экосистему.



Рис. 1. Взаимодействие трех видов инфраструктур, обеспечивающих эколого-экономический баланс хозяйственного использования пролива.

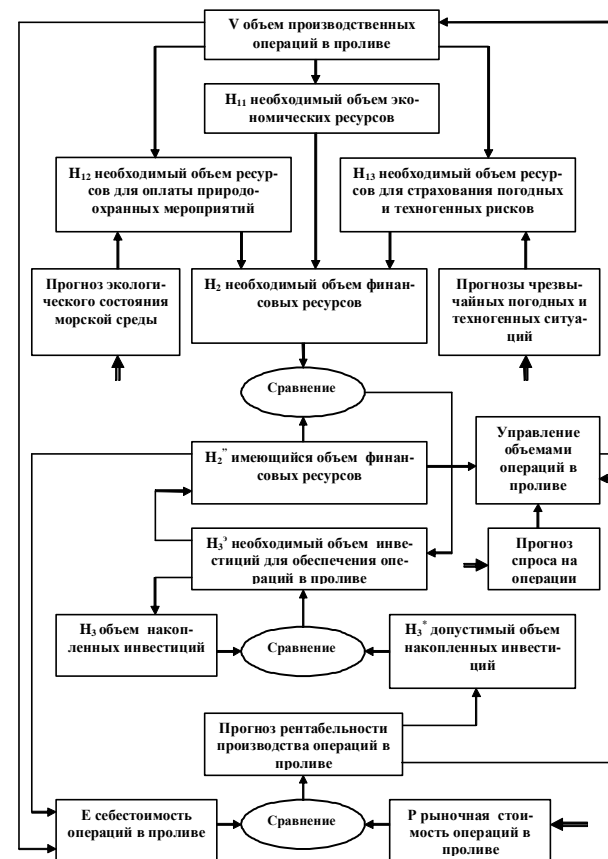


Рис. 2. Концептуальная модель экономической системы операций в проливе.

Будем считать, что риск техногенных чрезвычайных ситуаций пропорционален объему производственных операций в проливе, а риск погодных ситуаций пропорционален величинам аномалий ветра и температуры. Тогда в качестве единицы ресурса противодействия чрезвычайным ситуациям со стороны производственной системы пролива может быть использован единственный страховой взнос этой системы в специальный фонд предотвращения последствий ЧС. Этот фонд используется для поддержания и развития инфраструктуры противодействия ЧС.

Динамика спроса на проведение производственных операций в проливе служит внешним источником воздействия на экономическую систему.

Спрос определяет обходимые мощности производственной инфраструктуры обеспечения операций, инфраструктуры противодействия ЧС, а также ожидаемое состояние экосистемы пролива с учетом планируемых природоохранных действий. Для оценки возможности удовлетворить спрос требуемые показатели эколого-экономической системы сопоставляются с существующими показателями. Сравнение показателей дает возможность вести управление всей системой таким образом, чтобы удовлетворить спрос при условии поддержания на должном уровне состояния морской экосистемы и уровня безопасности операций в проливе. Этой цели служат инвестиции производственной системы в каждый из трех видов ресурсов обеспечения производства.

Принципиальным является вопрос о достаточности оборотных средств производственной системы для приобретения необходимого количества ресурсов. Необходимый объем финансовых ресурсов, являющийся суммой инвестиций в закупку трех видов ресурсов, зависит от объемов производственных операций в проливе. Объем имеющихся в наличии оборотных средств сопоставляется с тем, который необходим для полного удовлетворения спроса на операции в проливе. Если оборотных средств недостаточно, производственная система должна пойти на дополнительные инвестиции для приобретения недостающих ресурсов.

Однако дополнительные инвестиции означают увеличение расходов и повышение себестоимости операций. Поэтому в производственной системе пролива необходим постоянный контроль за величиной накопленных инвестиций с тем, чтобы он не превысил предельно допустимого уровня. Одновременно с этим контролем должен выполняться прогноз рентабельности производства с учетом новых значений накопленных инвестиций. Кроме спроса на производство операций в проливе рентабельность операций зависит еще от одного внешнего фактора: рыночной стоимости единичной операции, т.е. ее цены.

Интегральная модель производственной системы зоны пролива. Проведенный выше анализ концептуальной модели эколого-экономического баланса хозяйственного использования пролива дает основания для построения формальной модели системы операций в проливе, предназначенной для прогноза рентабельности операций с учетом экологических ограничений и противодействия ЧС. С этой целью воспользуемся методом адаптивного баланса влияний (*ABC*-методом), подробно изложенным в [4, 5]. Динамические уравнения *ABC*-модели имеют стандартную структуру и

учитывают схему причинно-следственных зависимостей между переменными эколого-экономической системы, показанные на рис.2. Введем следующие обозначения для переменных модели: D – спрос на выполнение производственных операций в зоне пролива; P – стоимость выполнения единичной производственной операции; E – себестоимость операций; H – возможный объем производственных операций, обеспеченный всеми видами ресурсов; S – текущий объем производственных операций; V – планируемый объем операций с учетом средств на приобретение ресурсов; C – индекс биологического разнообразия, характеризующий состояние экосистемы; PL – уровень загрязнения морской среды вследствие операций в проливе; r_i – стоимость единицы ресурса ($i = 1 - 3$); y_i – количество единиц i -ого вида ресурса, необходимое для проведения единичной производственной операции в проливе; ρ_i – доля i -ого вида ресурса в производстве единичной операции; η – интегральная себестоимость проведения операций; H_{11} – интегральный параметр экономического обеспечения операций в проливе; H_{12} – интегральный параметр природоохранного обеспечения состояния морской среды в проливе; H_{13} – интегральный параметр обеспечения противодействия чрезвычайным ситуациям; Φ – рентабельность экономического использования пролива.

Для удобства моделирования будем использовать безразмерные (приведенные) величины, которые связаны с соответствующими реальными размерными величинами A' следующей зависимостью

$$A = 5 A' [M(A')]^{-1},$$

где $[M(A')]$ – среднее значение интервала изменчивости соответствующей размерной величины A' . Подобное преобразование ограничивает изменчивость сценариев развития интервалом величин $[0, 10]$. При необходимости возврат к исходным (размерным) величинам легко может быть произведен по формуле

$$A' = 0,2[M(A')]A.$$

С учетом известной зависимости спроса от цены и качества товаров (услуг) для безразмерной переменной $X_1 = 5 D [M(D)]^{-1}$, представляющей динамику спроса на проведение грузовых операций в проливе, получим следующее уравнение ABC -модели

$$\frac{dX_1}{dT} = X_1 [1 - 2(X_1 + a_{12}X_2 - a_{13}X_3)], \quad (1)$$

в котором X_2 – безразмерная цена операции P , а X_3 – безразмерное качество проведения операций Q . Коэффициенты a_{ij} учитывают степени влияния одних переменных модели на другие. Для стоимости и качества проведения операций имеем

$$\frac{dX_2}{dT} = X_2 [1 - 2(X_2 + a_{23}X_3 - a_{24}X_4)], \quad (2)$$

$$\frac{dX_3}{dT} = X_3 [1 - 2(X_3 - a_{3\mu}\mu)], \quad (3)$$

где μ – интегральное качество проведения операций, $\mu = \sum_{i=1}^3 q_i y_i$.

Уравнение для себестоимости проведения операций запишем в виде

$$\frac{dX_4}{dT} = X_4 \left[1 - 2(X_4 - a_{4\eta}\eta) \right], \quad (4)$$

где η – интегральная себестоимость проведения операций, $\eta = \sum_{i=1}^3 r_i y_i$.

Спрос на проведение производственных операций в проливе сопоставляется с существующей пропускной способностью системы проводки судов и перевалки грузов. Обозначим через H количество единичных производственных операций, выполнение которых обеспечено существующей пропускной способностью канала. Тогда скорость выполнения операций можно представить следующими уравнениями *ABC*-модели

$$\frac{dH}{dT} = H \left[1 - 2(H - V + S) \right], \quad (5)$$

где V – количество подготовленных текущему моменту времени операций, а S – количество выполненных операций.

Норма прибыли N , получаемая от выполнения единичной производственной операции в момент времени t , будет определена разностью ее цены и себестоимости: $N = P - Q$. Выполнение операций становится невыгодным, когда $N < 0$. Поэтому ожидаемая норма прибыли должна контролироваться специальным агентом управления, функции которого заключаются в том, чтобы сопоставлять текущий спрос на операции в проливе с текущей пропускной способностью канала по части проводки судов и перевалки грузов и оценивать экономическую выгоду от проведения этих операций по текущей рыночной цене. Таким образом, выполнение операций подчинено следующим экономическим условиям

$$S = \text{IF}(N < 0; 0; R), \quad R = \text{IF}(D < H; D; H),$$

где D – текущий спрос на проведение операций.

Наряду с экономическими условиями под постоянным контролем со стороны некоторого агента управления должно находиться и экологическое состояние морской среды в зоне пролива. Объемы выполнения грузовых операций в проливе V должны быть ограничены в тех случаях, когда реально существует риск необратимой деградации морской экосистемы в виду недостаточных природоохранных мероприятий. Подобное же ограничение должно иметь место, когда недостаточно средств, выделяемых на мероприятия по страхованию рисков природных и техногенных чрезвычайных ситуаций. Выше мы предположили, что риск деградации экосистемы возрастает в тех случаях, когда объем мероприятий, направленных на снижение уровня загрязнения морской среды опасными химическими веществами, а так же мероприятий по страхованию рисков природных и техногенных чрезвычайных ситуаций опускаются ниже предельно допустимых уровней. Если обозначить через M – минимальное из необходимых условий обеспечения операций, то пропускная способность канала будет определена следующими логическими соотношениями

$$V = \text{IF}(D < H; 0; M), \quad M = \text{IF}(D - H < M; D - H; M), \quad M = \min(m_1; m_2; m_3),$$

где через m_i обозначены те объемы соответствующих производственных, природоохранных, и упреждающих мероприятий, которые выполняются в зоне пролива: $m_i = H_i / y_i$ ($i = 1 - 3$).

Для того чтобы увеличить количество операций в проливе до объемов, определяемых текущим спросом, необходимо увеличить финансирование каждого из перечисленных видов мероприятий, используя оборотные средства, имеющиеся у экономической подсистемы пролива. Обозначим текущие объемы оборотных средств экономической подсистемы как H_2 . Их динамика определяется размерами текущих прибылей I , инвестиций H_3 и расходов S_2 :

$$\frac{dH_2}{dT} = H_2 [1 - 2(H_2 - I - H_3 + S_2 + S_3)]. \quad (6)$$

Мы условились считать, что расходы на проведение природоохранных мероприятий в зоне пролива, финансируемые из оборотных средств экономической подсистемы, эквивалентны приобретению ею некоторого количества «экологического» ресурса, а расходы на создание фонда предотвращения и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций – приобретению некоторого количества ресурса «противодействия чрезвычайным ситуациям». Поэтому имеющиеся оборотные средства H_2 экономической подсистемы пролива могут быть распределены на приобретение экономических, экологических и страховых видов ресурсов в той же пропорции, в которой каждый из этих видов участвует в производстве операций в проливе. Определим долю i -ого вида ресурса в производстве единичной операции следующим соотношением

$$\rho_i = r_i y_i [r_1 y_1 + r_2 y_2 + r_3 y_3]^{-1} \quad (i = 1 - 3).$$

Тогда на приобретение k -ого ресурса производство располагает $\rho_k H_2$ частью своих оборотных средств. Если этой суммы недостаточно, производственная система имеет возможность приобрести ресурсы в кредит при том условии, что ее долги H_3 (накопленный к текущему времени кредит) не превышают некоторой установленной заранее нормы H_3^* . Величина предельно допустимого кредита означает, что административный орган управления зоной пролива ограничивает проведение операций в проливе, когда дополнительные инвестиции в природоохранные мероприятия не обеспечены ожидаемой прибылью от хозяйственной деятельности.

Использование кредитов для закупки недостающих ресурсов учитывается функцией S_3 в (6), которая имеет смысл расходов на погашение кредита, накопленного экономической системой. С учетом процентов погашения кредита θ_i логические условия для S_{3i} принимают форму

$$S_3 = IF (H_3 \theta < H_2; H_3 \theta; H_2).$$

Обозначим объемы приобретаемых в кредит ресурсов через V_{11}, V_{12}, V_{13} . Тогда общая стоимость текущих инвестиций составит

$$V_3 = r_1 V_{11} + r_2 V_{12} + r_3 V_{13}.$$

Текущая величина накопленных инвестиций будет выражена балансовым уравнением

$$\frac{dH_3}{dt} = H_3 [1 - 2(H_3 - V_3 + S_3)]. \quad (7)$$

Таким образом, балансовые уравнения *ABC*-модели (1) – (7) представляют процессы производства, показанные на диаграммах рис.1 – 2.

Модель управления инвестициями. Для осуществления хозяйственной деятельности в проливе административный орган управления операциями должен инвестировать средства на приобретение ресурсов. Введем обозначение H_{11} , для оценки того количества грузовых операций, которое экономическая система пролива может обеспечить на основе существующей системы проводки судов и перевалки грузов в момент времени t . Эта оценка выражается балансовым соотношением:

$$\frac{dH_{11}}{dt} = H_{11} [1 - 2(H_{11} - V_{11} + S_{11})], \quad (8)$$

в котором через S_{11} обозначены текущие расходы экономических ресурсов, а через V_{11} – текущие инвестиции в инфраструктуру обеспечения операций в проливе для приобретения недостающих экономических ресурсов.

Аналогичным образом могут быть представлены балансы двух других видов ресурсов, обеспечивающих условия для проведения операций. Пусть H_{12} представляет собой запас экологического вида ресурса, под которым следует понимать существующее значение индекса биоразнообразия, которое обеспечивается текущим объемом природоохранных мероприятий в зоне пролива. Тогда уравнение баланса экологических ресурсов принимает вид:

$$\frac{dH_{12}}{dt} = H_{12} [1 - 2(H_{12} - V_{12} + S_{12})]. \quad (9)$$

В этом уравнении через S_{12} обозначены текущее потребление экологических ресурсов, т.е. ухудшение экологического состояния экосистемы пролива вследствие проведения в нем того объема грузовых операций, который дает решение уравнения (1). Через V_{12} в этом уравнении представлено улучшение экологического состояния вследствие проведения в нем того объема природоохранных мероприятий, которое обеспечено инвестициями в эти мероприятия.

В качестве запаса ресурсов, обеспечивающих противодействие чрезвычайным природным и техногенным ситуациям, следует рассматривать имеющийся фонд финансовых и материальных средств борьбы с последствиями чрезвычайных ситуаций H_{13} . Фонд расходуется на мероприятия по предотвращению или устранению негативных последствий чрезвычайных ситуаций. Текущие расходы фонда обозначим S_{13} . Пополнение фонда обозначим V_{13} . Уравнения баланса для средств фонда представим в виде:

$$\frac{dH_{13}}{dt} = H_{13} [1 - 2(H_{13} - V_{13} + S_{13})]. \quad (10)$$

Будем считать, что расходование каждого вида ресурсов пропорционально объему производственных операций в проливе $S_{1i} = V_{1i} y_j$. В том случае, когда имеющихся ресурсов недостаточно для выполнения планируемого объема операций, запасы ресурсов должны быть пополнены путем инвестирования соответствующих финансовых средств. Задача системы управ-

ления инвестициями заключается в том, чтобы определить, какое количество ресурсов каждого вида должно быть приобретено дополнительно за счет инвестиций. Условиями для определения недостающего количества каждого из ресурсов служат следующие соотношения, которые учитывают ограничения на приобретение ресурсов теми объемами оборотных средств, которыми располагает производственная система пролива

$$V_{li} = \text{IF} [(D - H)y_i < H_{li}; 0; F_i], \quad F_i = \text{IF} [r_i (y_i D - H_{li}) < \rho_i H_{2i}; y_i D - H_{li}; R_i].$$

В этих выражениях функции r_j имеют смысл цен на ресурсы. Поэтому r_1 представляет собой себестоимость (технологическую) проведения единичной производственной операции в проливе, функция r_2 – стоимость (среднюю) единичного природоохранного мероприятия, направленного на сохранения биоразнообразия морской экосистемы пролива, функция r_3 – стоимость (среднюю) единичного мероприятия, направленного на предотвращение негативных последствий чрезвычайных ситуации в проливе. Так как инвестируемые средства должны быть получены и использованы до проведения планируемых операций в проливе, следует рассматривать эти средства как кредиты, приобретаемые системой управления производственными операциями в проливе на процентной основе.

Такая постановка задачи управления инвестициями должна учитывать то обстоятельство, что проценты по кредитам увеличивают общую себестоимость операций в проливе и, следовательно, могут понизить их рентабельность. Кроме того, в случае низкой рентабельности операций общая величина кредита H_3 , накопленного в процессе приобретения объемов каждого вида ресурсов H_{li} не может превышать некоторого заранее установленного значения H_{3i}^* . Поэтому в выражениях функция R_{ij} ограничивает приобретение i -ого ресурса по мере того, как величина кредита H_{3i} приближается к значению H_{3i}^* .

С учетом необходимости использования всех трех видов ресурсов для себестоимости проведения операций имеем следующее выражение

$$q = \sum_{l=1}^3 r_l y_l,$$

в котором r_l – локальные цены на соответствующие виды ресурсов.

Введем в рассмотрение фактор экономической эффективности хозяйственного использования пролива как отношение

$$\varphi = pS [U + (U^0 - U) \exp(-\alpha \tau)]^{-1}, \quad U = qV.$$

В этой формуле использованы следующие обозначения: p – рыночная цена операции в проливе, S – количество проведенных операций за единственный интервал времени (сут), V – количество операций, которые может обеспечить существующая экономическая инфраструктура при наличии спроса на них, α – параметр, устанавливающий скорость погашения первоначальных капиталовложений (кредита), использованного для создания и ввода в эксплуатацию экономической инфраструктуры, а также инфраструктуры охраны морской экосистемы и противодействия ЧС, U^0 – размер первоначальных капиталовложений, U – текущие расходы, связанные с проведением производственных операций в проливе, τ – время.

Следует считать, что экономическая эффективность тем выше, чем больше величина φ . Затраты на создание необходимой инфраструктуры U^0 с течением времени окупаются за счет постоянных отчислений из прибыли, и текущие расходы принимают значение U , которое определяется объемом проведенных операций V и себестоимостью их производства. Таким образом, фактор экономической эффективности использования ресурсов пролива представляет собой переменную функцию времени (сценарий). Логарифм выражения $\Phi = \ln \varphi$ удобно использовать для оценки рентабельности [5] проведения операций в проливе с учетом интересов охраны морской среды и противодействия ЧС.

В [1, 4, 5] была предложена схема интегрированного управления потреблением ресурсов прибрежной зоны моря, основанная на управлении выпуском продукции путем регулирования величины H_{3i}^* . Величину H_{3i}^* устанавливает административный орган, регулирующий потребление природных ресурсов, которое оплачивается экономической системой пролива путем изъятия определенной части ее прибыли в фонды природоохранных мероприятий и предотвращения последствий чрезвычайных ситуаций. Понижая значение H_{3i}^* , общество ограничивает потребление природных ресурсов в целях охраны окружающей среды.

В эколого-экономической системе зоны Керченского пролива рентабельность производственных операций будет зависеть от динамики цен на три основных вида ресурсов, потребляемых системой. По мере ухудшения экологической ситуации в зоне пролива и увеличения рисков негативных последствий от природных или техногенных чрезвычайных ситуаций цены на эти виды ресурсов должны повышаться. В этих условиях общая сумма долга по инвестициям H_3 может заставить производственную систему пролива ограничить объем операций даже в условиях высокой экономической рентабельности их проведения. Поэтому модельные эксперименты, позволяющие заранее оценить условия эколого-экономического баланса хозяйственной деятельности в проливе имеют определенное практическое значение.

Вычислительные эксперименты с интегральной эколого-экономической моделью производственных операций в проливе. В проведенных экспериментах ставилась задача получения сценариев развития основных производственных процессов при контролируемых внешних воздействиях на систему. В качестве внешних влияний были использованы переменный спрос на проведение производственных операций в проливе $D(t)$ и заданные цены на ресурсы r_1 и r_3 . Что касается стоимости экологического ресурса r_2 , то она была принята обратно пропорциональной величине индекса биологического разнообразия S . Величина спроса положительно влияла на доходы и, следовательно, на рентабельность операций, в то время как стоимость экологического ресурса r_2 характеризовала затраты производственной системы на поддержание индекса биологического разнообразия на достаточно высоком уровне.

Кроме того, были имитированы условия, при которых экономическая система должна была инвестировать часть своей прибыли в развитие всех трех видов инфраструктур: экономической, экологической и противодействия ЧС. Было принято, что 40 % прибыли должно быть направлено на эти

инвестиции. Вместе с тем, система имела возможность брать кредиты для покрытия всех расходов. Процент по кредитам был установлен на уровне 0,4. С целью контроля за экологическим состоянием системы пролива функция H_3^* была поставлена в зависимость от величины индекса биоразнообразия C , которая определялась уровнем загрязнения морской среды, зависевшим от объема производственных операций в проливе. В уравнение для индекса C включено слагаемое, которое учитывает объем природоохранных мероприятий в проливе, пропорциональный величине инвестиций на эти цели V_{12} .

Эти связи были представлены следующими уравнениями

$$\frac{dC}{dt} = C[1 - 2(C - a_{CV}V_{12} + a_{CPL}PL)], \quad (11)$$

$$\frac{dPL}{dt} = PL[1 - 2(PL - a_{PLS}S)], \quad (12)$$

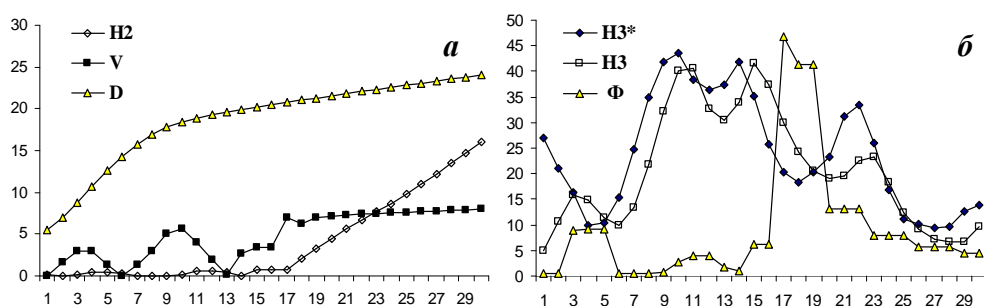
$$\frac{dH_3^*}{dt} = H_3^*[1 - 2(H_3^* - a_{H_3^*C}C)], \quad (13)$$

$$\frac{dr_2}{dt} = r_2[1 - 2(r_2 + a_{r_2C}C)]. \quad (14)$$

Для проведения вычислительных экспериментов уравнения эколого-экономической модели (1) – (14) были представлены в конечных разностях. Интервал дискретизации процессов по времени (одни сутки) бы принят за единицу измерения времени. Расчеты проводились на 240 шагов по времени, которые были разбиты на два временных промежутка: с 1-го по 30 и с 31 по 240 шаг.

Динамика спроса была задана растущей функцией времени, которая изображена на рис.3, *a* и 5, *a*.

Соотношение себестоимости операций и цен на ресурсы оказалось благоприятным для экономической системы в условиях заданного спроса. Поэтому объем принятых заказов на выполнение операций V , начиная с 17 шага, возрастал. Оборотные средства системы H_2 в этот период времени не уве-



Р и с . 3 . Прогнозы сценариев экономических процессов на 30 шагов вперед, осредненные по 3 шагам: оборотные средства $5 \times 10^{-2} H_2$, объем принятых заказов на выполнение операций V , спрос на выполнение операций D (*a*); предельно допустимое финансирование операций, ограниченное состоянием экосистемы H_3^* , текущие инвестиции в инфраструктуру системы пролива H_3 , рентабельность операций $2 \times 10^{-1} \Phi$.

личивались, поскольку прибыль практически полностью расходовалась на погашение кредитов, взятых на приобретение ресурсов.

На рис.3, б показаны текущие инвестиции в инфраструктуру системы пролива H_3 , размеры которых в соответствии с моделью были ограничены предельно допустимым финансированием операций H_3^* , которое зависело от состояния экосистемы. Рентабельность производственных операций резко падала, в те периоды времени, когда текущие инвестиции в инфраструктуру обеспечения операций H_3 начинали превышать экологически допустимую норму H_3^* . Это произошло, например, в период времени с 15 по 20 шаг, когда рентабельность операций резко снизилась (рис.3, б).

Причиной падения рентабельности стал чрезмерно большой объем грузовых операций в проливе в этот период, который демонстрирует кривая S на рис.4, а. С нею был связан рост загрязнения морской среды (кривая PL), который потребовал резкого увеличения инвестиций в природоохранные мероприятия (кривая IC на рис.4, б). В результате после 20 шага произошло снижение уровня загрязнения PL и начался рост индекса биологического разнообразия $C+$, как показано на рис.4, б. На этом же рисунке для сравнения приведен сценарий индекса биологического разнообразия $C-$, который имел бы место при отсутствии природоохранных мероприятий в проливе.

На рис.5 представлены сценарии экономических процессов в системе пролива для периода времени с 31 по 240 шаг вычислений. Из них следует, что в условиях высокого спроса на проведение операций в системе устанавливается состояние баланса, которое обеспечивает устойчивый рост оборотных средств H_2 (рис.5, а) при сохранении уровня рентабельности Φ (рис.5, б). Объем инвестиций в инфраструктуру производства H_3 не превышает предельно допустимых значений H_3^* .

На рис.6 приведены сценарии эколого-экономических процессов для этих условий. Как следует из рис.6, а, с увеличением объемов операций в проливе S растет и уровень загрязнения морской среды PL . Однако параллельно значительно увеличиваются инвестиции в проведение природоохранных мероприятий IC (эта кривая на рис.6, б уменьшена в 100 раз). Поэтому индекс биологического разнообразия $C+$ сохраняет практически постоян-

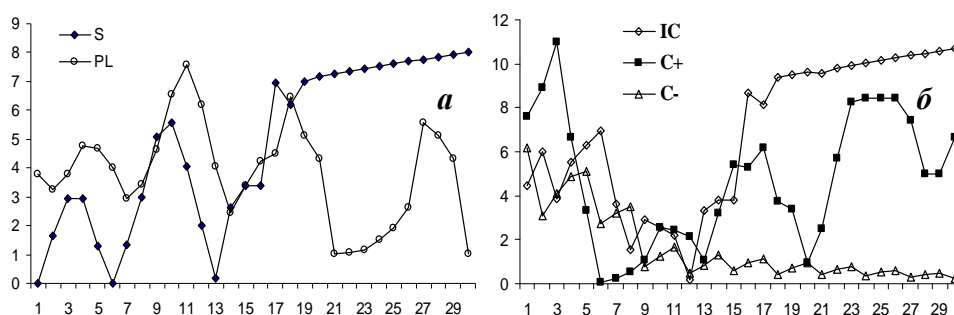


Рис. 4. Прогнозы сценариев эколого-экономических процессов на 30 шагов вперед, осредненные по 3 шагам: объем выполненных операций $4 \times 10^{-1} S$, уровень загрязнения морской среды PL (а), инвестиции в природоохранные мероприятия IC , индекс биоразнообразия после проведения природоохранных мероприятий $C+$, $C-$ индекс биоразнообразия до проведения природоохранных мероприятий (б).

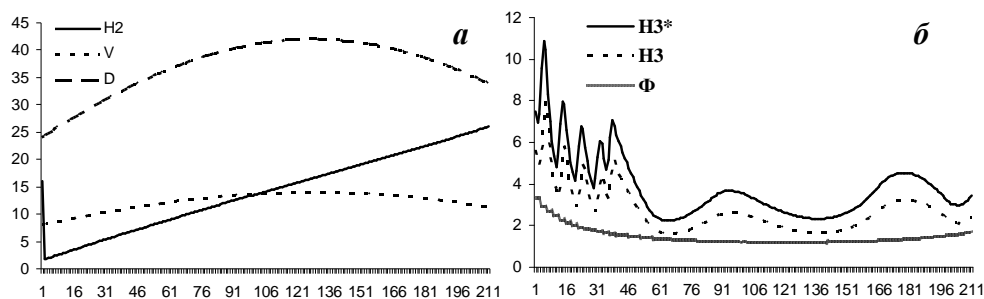


Рис. 5. Прогнозы сценариев экономических процессов на период с 31 по 240 шаг, осредненные по 3 шагам: оборотные средства $5 \times 10^{-3} H_2$, объем принятых заказов на выполнение операций V , спрос на выполнение операций D (а); предельно допустимое финансирование операций, ограниченное состоянием экосистемы H_3^* , текущие инвестиции в инфраструктуру системы пролива H_3 , рентабельность операций $2 \times 10^{-1} \Phi$ (б).

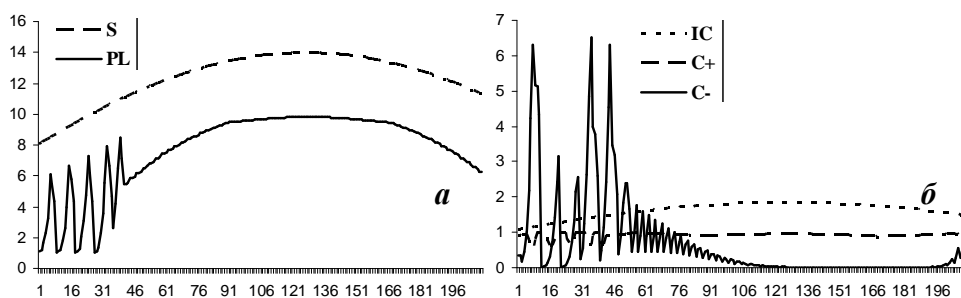


Рис. 6. Прогнозы сценариев эколого-экономических процессов на период времени с 31 по 240 шаг, осредненные по 3 шагам: объем выполненных операций $4 \times 10^{-1} S$, уровень загрязнения морской среды PL (а); инвестиции в природоохранные мероприятия $4 \times 10^{-2} IC$, индекс биоразнообразия после проведения природоохранных мероприятий $10^{-1} C+$, индекс биоразнообразия до проведения природоохранных мероприятий $C-$ (б).

ное значение. В отсутствие природоохранных инвестиций этот индекс (кривая $C-$ на рис.б, б) резко уменьшается.

Заключение. Проведенные вычислительные эксперименты показали возможность использования интегральной модели для прогнозирования сценариев трех основных процессов развития природно-хозяйственной системы Керченского пролива: уровня экономической рентабельности производственных операций в проливе, индекса биоразнообразия морской экосистемы зоны пролива и уровня загрязнения морской среды, происходящего как от производственной деятельности, так и вследствие чрезвычайных ситуаций. Предложенная эколого-экономическая модель позволяет оценивать рентабельность производственных операций в условиях контроля за уровнем загрязнения морской среды и ее экологическим состоянием. Модель допускает учет влияния экстремальных погодных и техногенных факторов, для противодействия которым экономическая система пролива финансирует соответствующие инфраструктуры.

Для получения практических рекомендаций, касающихся эколого-экономического баланса хозяйственного использования пролива, параметры модели должны быть адаптированы к реальным значениям объемов производственных операций. Индекс биологического разнообразия должен быть представлен в виде взвешенной суммы концентраций основных гидробионтов, населяющих зону пролива. Подобным же образом должен быть представлен индекс, характеризующий уровень загрязнения морской среды. Эти задачи по нашему мнению должны составить содержание дальнейших исследований в направлении создания информационной технологии управления операциями в проливе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латун В.С., Тимченко И.Е.* Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007.– 259 с.
2. *Вестник МЧС России.* <http://www.mchs.gov.ru/irinatar@gmail.com>.
3. *Добровольский А.Д., Залогин Б.С.* Моря СССР.– М., 1965.– 432 с.
4. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.* Системный анализ ресурсных свойств природной среды // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– вып.14.– С.60-85.
5. *Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Моделирование эколого-экономических систем.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004.– 320 с.

Материал поступил в редакцию 21.08.2008 г.