

Управление интегральными эколого-экономическими процессами в системе «Берег – море» при сохранении качества морской среды

© 2015 И.Е. Тимченко, И.К. Иващенко, Е.М. Игумнова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

Поступила в редакцию 28.05.2015 г.

Предложена адаптивная модель управления сценариями процессов в эколого-экономической системе, связывающей объем производства системы «Берег – море» с уровнем загрязнения и индексом биоразнообразия морской среды. Модель предназначена для нахождения рационального баланса доходов от использования морских ресурсов и затрат на сохранение качества морской среды путем анализа влияния экономических санкций за загрязнение на процессы в морской экосистеме. В моделях подсистем «Берег» и «Море», а также в модели объединенной системы применены агенты управления, контролирующие баланс потребления и воспроизводства морских ресурсов. Построены сценарии эколого-экономических процессов в режиме перевода производства на экологически чистые технологии и показаны преимущества такого варианта природопользования.

Ключевые слова: эколого-экономическая модель, адаптивный баланс влияний, сценарии процессов.

Введение. С развитием технологий потребления морских ресурсов возрастает значение экологической экономики прибрежной зоны моря [1 – 4]. Поскольку антропогенная нагрузка на прибрежную морскую среду постоянно растет, основным ее качеством, наряду с биологической продуктивностью, становится ее ассимиляционная емкость. В работе [5] рассмотрена задача управления интегральными эколого-экономическими процессами в прибрежной зоне моря, которые развиваются в модели обобщенной системы «Берег – море» в условиях контроля над уровнем загрязнения. Модель построена методом адаптивного баланса влияний и содержит агенты управления, которые позволяют устанавливать размеры экономических санкций, налагаемых на производство, в зависимости от уровня загрязнения морской среды.

В настоящей работе эти исследования продолжены с применением более сложных моделей подсистем, входящих в объединенную систему «Берег – море». Интегральными характеристиками экологического состояния морской среды стали уровень загрязнения отходами производства и индекс биоразнообразия. Каждый из этих двух показателей формируется под влиянием множества разнообразных факторов. Но в целях упрощения считалось, что уровень загрязнения определяется балансом скорости накопления загрязнений и скорости самоочищения морской среды вследствие химико-бактериологических реакций и перемешивания водных масс, а индекс биоразнообразия убывает пропорционально росту уровня загрязнений. Задача заключается в том, чтобы исследовать баланс природопользования в условиях, когда экономическая выгода от выпуска продукции зависит от затрат, необходимых для защиты морской среды от загрязнения и сохранения индекса биоразнообра-

зия. Кроме того, необходимо оценить экономическую целесообразность дополнительных затрат экономической подсистемы «Берег» для перевода ее на экологически чистые технологии производства.

Структура модели управления рентабельностью производства и экологическим состоянием морской среды в системе «Берег – море». Модель состоит из подсистемы «Море», которая представляет процессы в морской экосистеме, формирующие индекс биоразнообразия морской среды, и подсистемы «Берег», которая описывает экономические процессы, определяющие рентабельность производства и уровень загрязнения морской среды. Обе подсистемы объединены в единую систему с помощью блока управления балансом функционирования подсистем «Море» и «Берег» по критериям сохранения качества морской среды.

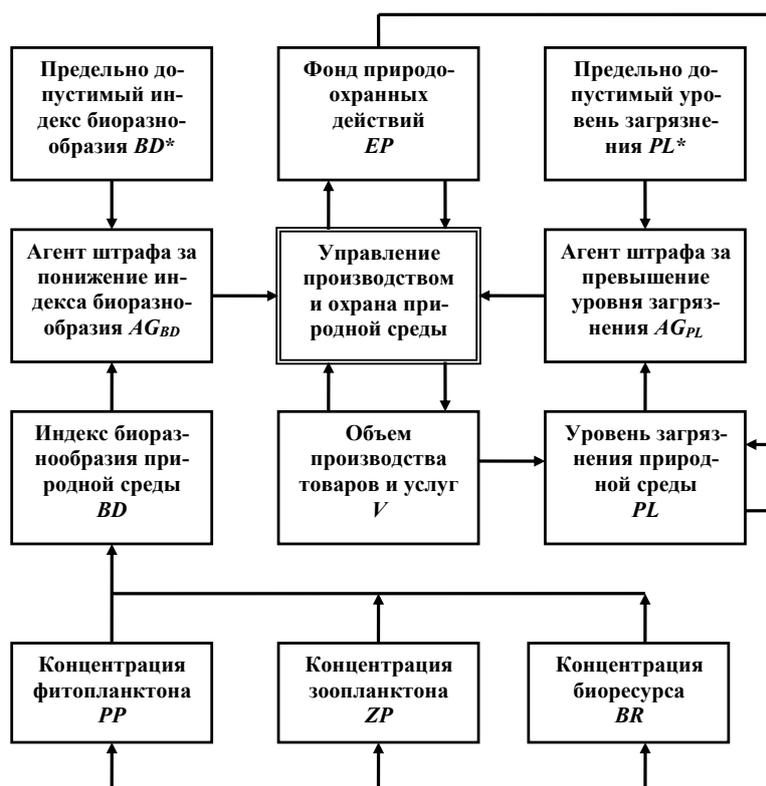


Рис. 1. Концептуальная модель управления эколого-экономическим балансом рентабельности производства и экологического состояния прибрежной морской среды

Для блока управления предложена концептуальная модель, которая контролирует эколого-экономический баланс рентабельности производства и экологического состояния прибрежной морской среды. Схема этой модели изображена на рис. 1. Объем производства V вызывает загрязнение морской среды PL , которое уменьшает концентрации фитопланктона PP , зоопланкто-

на ZP и биоресурса BR , влияющих на индекс биоразнообразия BD . Управление природопользованием основано на слежении за уровнем загрязнения PL и индексом биоразнообразия BD морской среды, для чего в модели использованы их предельно допустимые значения PL^* и BD^* . Слежение за уровнем загрязнения осуществляет агент управления AG_{PL} , а слежение за индексом биоразнообразия – агент AG_{BD} . В блоке управления производством и охраной природной среды эти агенты влияют на себестоимость производства через природоохранный налог, пропорциональный уровню PL , и через штрафы за превышение предельно допустимого уровня PL^* . Кроме того, вводится штраф за понижение индекса биоразнообразия BD ниже предельно допустимого значения BD^* . Благодаря штрафным санкциям формируется фонд природоохранных действий EP , которые понижают уровень загрязнения и повышают индекс биоразнообразия морской среды. Таким образом, замыкается цепь стабилизирующей обратной связи, которая поддерживает на требуемом уровне эколого-экономический баланс природопользования.

Концептуальная модель экологической подсистемы «Море». Модель экологической подсистемы «Море» связывает индекс биоразнообразия с уровнем загрязнения морской среды, происходящего в основном за счет поступления в море производственных и бытовых отходов с прилегающей территории береговой зоны. Наибольший вред от загрязнений испытывают на себе биологические ресурсы моря. В разработанной модели экосистемы к биологическим ресурсам отнесено верхнее звено пищевой цепи: фитопланктон – зоопланктон – рыбы (биоресурс). Состояние пищевой цепи характеризуется значениями концентраций фитопланктона PP , зоопланктона ZP и биоресурса BR . Процессы, описывающие изменения этих концентраций во времени, включены в модель подсистемы «Море» наряду с другими ресурсами развития пищевой цепи: концентрациями кислорода OX , углекислого газа CD и биогенных элементов BG . Для замыкания цепочки биохимических реакций в морской среде в модель включен процесс образования детрита DT и трансформации его в биогенные вещества BG . С учетом этих соображений разработана система причинно-следственных связей экологической подсистемы «Море», которая приведена на рис. 2.

Важными элементами модели экосистемы являются агенты ресурсного лимитирования роста концентраций веществ в морской среде. Лимитирование определяет, какой из видов ресурсов, необходимых для увеличения концентрации, в данный момент времени имеется в минимальном количестве. Так, например, для роста концентрации фитопланктона необходимо, чтобы увеличились концентрации углекислого газа CD и биогенных веществ BG , а также возросла солнечная энергия SR . Так как количество каждого из этих видов ресурсов непрерывно меняется, рост концентрации фитопланктона зависит от того вида ресурса, концентрация которого минимальна по сравнению с другими видами.

Этим объясняется включение в модель четырех агентов управления, показанных на рис. 2. Агент AG_{PP} лимитирует рост концентрации фитопланктона по солнечной энергии SR , углекислому газу CD и биогенным веществам BG ; агент AG_{ZP} лимитирует рост концентрации зоопланктона по фитопланк-

тону PP , кислороду OX и биогенным веществам BG ; агент AG_{BR} лимитирует рост концентрации биоресурса по зоопланктону ZP , кислороду OX и биогенным веществам BG ; агент управления AG_{BG} лимитирует рост концентрации биогенных веществ BG по детриту DT и кислороду OX .

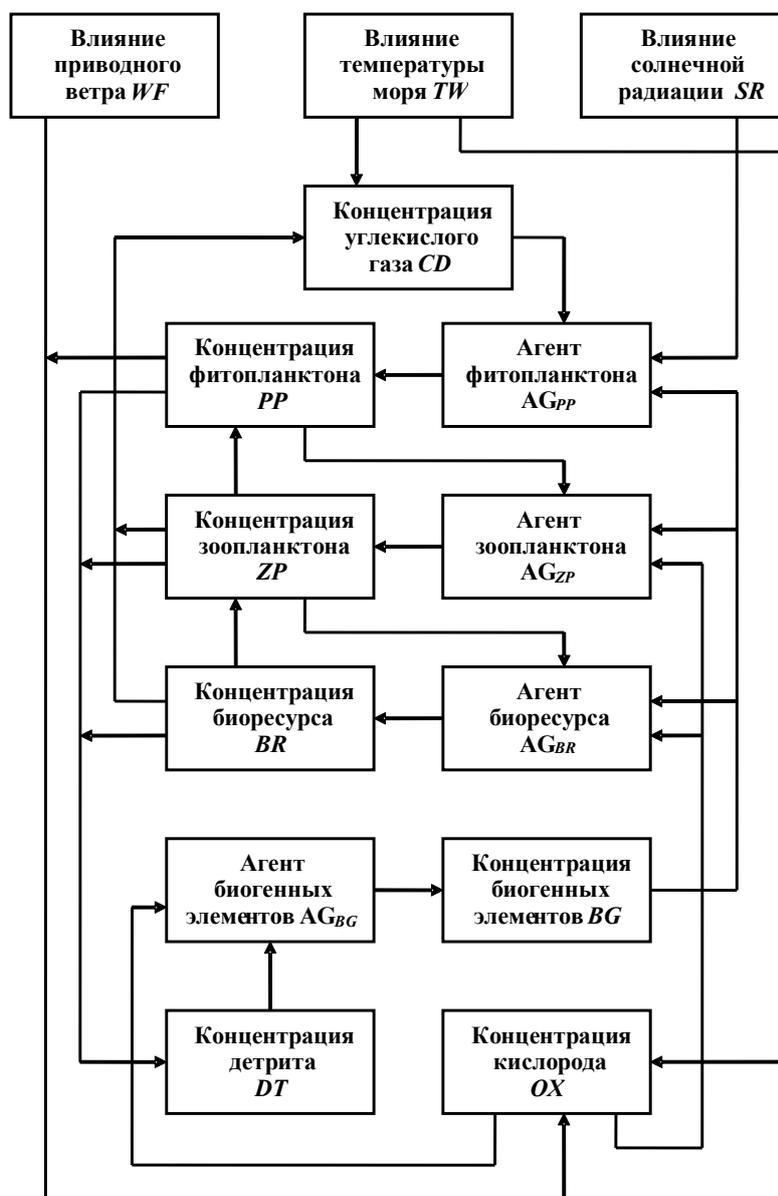


Рис. 2. Концептуальная модель экологической подсистемы «Море»

Процессы в морской экосистеме находятся в состоянии динамического баланса с внешними влияниями, приложенными к ней. Основными факторами внешнего влияния служат солнечное и атмосферное воздействие, динами-

ка водных масс и поступление загрязняющих веществ с береговым стоком. В целях упрощения мы исключили из рассмотрения влияние адвекции и диффузии водных масс на концентрации моделируемых субстанций. Косвенно это влияние на концентрацию загрязнений *PL* (наряду с химико-бактериологическими реакциями) учтено в функции, которая моделировала процесс самоочищения морской среды от загрязнений.

Внешнее воздействие на экосистему представлено интенсивностью солнечного излучения *SR*, температурой верхнего слоя моря *TW* и модулем скорости ветра *WF*. Считалось, что годовой ход температуры, средней по моделируемому объему морской среды, оказывает влияние на концентрацию фитопланктона, а также на концентрации кислорода и углекислого газа, которые уменьшаются с увеличением температуры. Было принято также, что с увеличением ветрового перемешивания верхнего слоя моря в нем возрастает концентрация кислорода.

Концептуальная модель экономической подсистемы «Берег». Цель построения модели подсистемы «Берег» – прогноз сценариев экономических процессов производства, влияющих на уровни загрязнения и биоразнообразия морской среды. Исходя из такой постановки задачи моделирования, выбраны наиболее важные процессы в подсистеме и построена схема причинно-следственных связей между ними, изображенная на рис. 3.

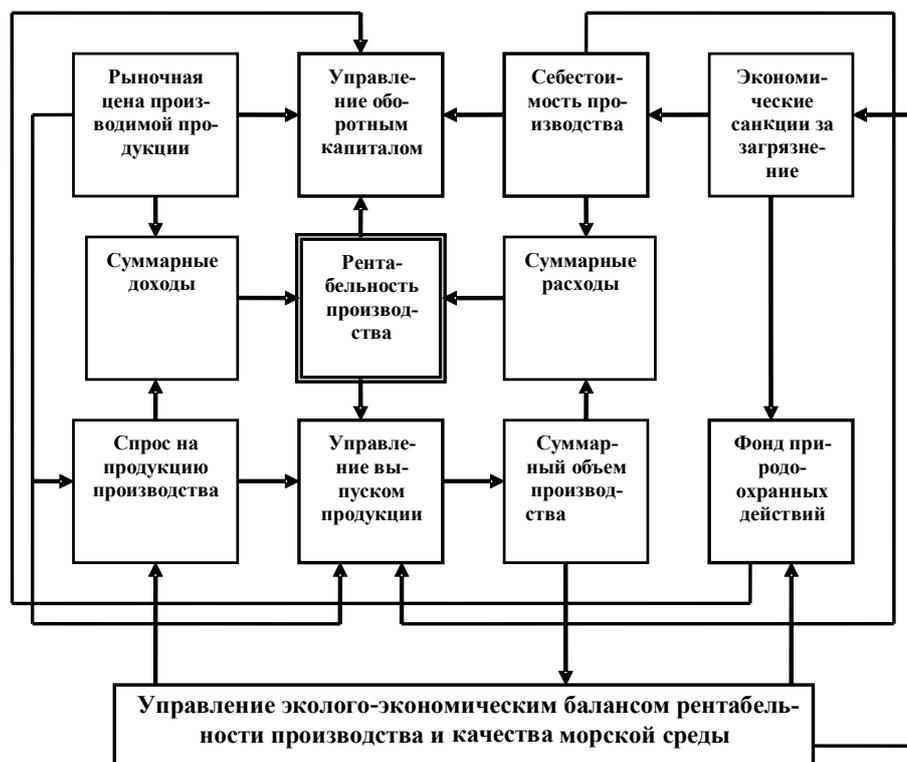


Рис. 3. Концептуальная модель экономической подсистемы «Берег»

В блоке рентабельности производства суммарные доходы за определенный промежуток времени сопоставляются с расходами производства за это же время. В зависимости от уровня рентабельности оценивается возможность удовлетворения спроса на продукцию подсистемы «Берег» и определяется задание на выпуск определенного объема продукции, обеспеченного имеющимися производственными ресурсами. В блоке управления эколого-экономическим балансом рентабельности производства и качества морской среды экономическая эффективность производства ставится в зависимость от экологического состояния морской среды. Здесь устанавливаются санкции за загрязнение моря отходами производства и формируется фонд природоохранных действий.

Детализация концептуальной модели подсистемы «Берег» выполнена на основе информационной технологии построения адаптивных моделей экономических систем *ABC AGENT*, которая подробно изложена в ряде исследований [3 – 6].

Уравнения адаптивной экономической подсистемы «Берег». Основные операции экономической системы представлены в виде балансовых соотношений, в которых моделируемая переменная системы адаптируется к алгебраической сумме источников (поступлений) и стоков (расходования) различных субстанций (товаров, услуг, ресурсов и др.). Эти уравнения подробно рассмотрены в ряде статей и монографий, посвященных методу адаптивного баланса влияний (*ABC*-методу) [3, 6]. Поэтому здесь мы ограничимся перечислением основных уравнений для переменных модели подсистемы «Берег». Так как уравнения имеют модульную структуру, мы поясним их на примере уравнения (1) для склада готовой продукции производства. Спрос на продукцию удовлетворяется путем реализации готовой продукции, накапливаемой на складе, а также дополнительно выпускаемой производством. Обозначим через H текущее количество готовой к реализации продукции на складе и будем считать, что оно колеблется около среднего значения C_H . При непрерывной поставке и реализации продукции балансовое уравнение для функции H можно представить в виде модульного уравнения *ABC*-метода и уравнения для агента управления, ограничивающего количество готовой продукции емкостью склада:

$$\frac{dH}{dt} = 2r_H H [C_H - (H - V + S)], \quad (1)$$

$$V - S = IF \{V - S < 0; 0; IF[V - S > 2C_H; 2C_H; V - S]\},$$

где V – поступление готовой продукции на склад производства, S – ее реализация, r_H – отношение удельной скорости изменения H к величине H , а величина $2C_H$ играет роль ресурсной емкости склада. Аналогичным образом представлены другие уравнения экономической подсистемы:

– уравнения динамики ресурсов H_{li} , которыми располагает экономическая подсистема:

$$\frac{dH_{li}}{dt} = 2r_{H_i} H_{li} [C_{H_i} - (H_{li} - V_{li} + S_{li})], \quad (i = 1, 2, \dots, n); \quad (2)$$

– уравнение динамики оборотных средств производства H_2 :

$$\frac{dH_2}{dt} = 2r_{H_2} H_2 [C_{H_2} - (H_2 - I - H_3 + S_2 + S_3)]; \quad (3)$$

– уравнение динамики инвестиций (кредитования) производства H_3 :

$$\frac{dH_3}{dt} = 2r_{H_3} H_3 [C_{H_3} - (H_3 - V_3 + S_3)]. \quad (4)$$

В уравнении (3) через I обозначена текущая прибыль экономической подсистемы «Берег».

Уравнения адаптивной экологической подсистемы «Море». Для построения формальной модели подсистемы «Море» воспользуемся обозначениями переменных экосистемы и схемой причинно-следственных связей, изображенных на рис. 2. Применяя модульные уравнения ABC-метода, получим следующую систему уравнений адаптивной модели морской экосистемы:

$$\frac{dPP}{dt} = 2r_{PP} PP \{C_{PP} - [PP + a_{PP/ZP} ZP - AG_{PP}(BG, SR, CD) - a_{PP/TW} TW - a_{PP/WF} WF + a_{PP/PL} PL]\},$$

$$\frac{dZP}{dt} = 2r_{ZP} ZP \{C_{ZP} - [ZP + a_{ZP/BR} BR - AG_{ZP}(OX, PP, BG) + a_{ZP/PL} PL]\},$$

$$\frac{dBR}{dt} = 2r_{BR} BR \{C_{BR} - [BR - AG_{BR}(OX, ZP, BG) + a_{BR/PL} PL]\},$$

$$\frac{dOX}{dt} = 2r_{OX} OX \{C_{OX} - [OX + a_{OX/BR} BR + a_{OX/ZP} ZP - a_{OX/PP} PP + a_{OX/BG} BG + a_{OX/TW} TW - a_{OX}(WF)]\}, \quad (5)$$

$$\frac{dCD}{dt} = 2r_{CD} CD \{C_{CD} - [CD - a_{CD/BR} BR - a_{CD/ZP} ZP + a_{CD/PP} PP + a_{CD/TW} TW]\},$$

$$\frac{dBG}{dt} = 2r_{BG} BG \{C_{BG} - [BG - AG_{BG}(OX, DT) + a_{BG/PP} PP + a_{BG/ZP} ZP + a_{BG/BR} BR]\},$$

$$\frac{dDT}{dt} = 2r_{DT} DT \{C_{DT} - [DT - a_{DT/BR} BR - a_{DT/ZP} ZP - a_{DT/PP} PP + a_{DT/BG} BG + a_{DT/OX} OX]\}.$$

В системе уравнений (5) коэффициенты r_{MN} являются средними значениями отношений скорости изменения переменной MN к величине этой переменной,

C_{MN} – среднее значение переменной MN , $a_{KL/MN}$ – коэффициент влияния переменной MN на переменную KL .

Для агентов ресурсного лимитирования использованы следующие выражения:

$$AG_{PP}(BG, SR, CD) = IF[M_{PP}(t) = a_{PP/BG}BG(t); a_{PP/BG}BG(t); 0] + \\ + IF[M_{PP}(t) = a_{PP/SR}SR(t); a_{PP/SR}SR(t); 0] + IF[M_{PP}(t) = a_{PP/CD}CD(t); a_{PP/CD}CD(t); 0], \\ \text{где } M_{PP}(t) = \arg \min[a_{PP/BG}BG(t); a_{PP/SR}SR(t); a_{PP/CD}CD(t)];$$

$$AG_{ZP}(OX, PP, BG) = IF[M_{ZP}(t) = a_{ZP/OX}OX(t); a_{ZP/OX}OX(t); 0] + \\ + IF[M_{ZP}(t) = a_{ZP/PP}PP(t); a_{ZP/PP}PP(t); 0] + IF[M_{ZP}(t) = a_{ZP/BG}BG(t); a_{ZP/BG}BG(t); 0], \\ \text{где } M_{ZP}(t) = \arg \min[a_{ZP/OX}OX(t); a_{ZP/PP}PP(t); a_{ZP/BG}BG(t)]; \quad (6)$$

$$AG_{BR}(OX, PP, BG) = IF[M_{BR}(t) = a_{BR/OX}OX(t); a_{BR/OX}OX(t); 0] + \\ + IF[M_{BR}(t) = a_{BR/ZP}ZP(t); a_{BR/ZP}ZP(t); 0] + IF[M_{BR}(t) = a_{BR/BG}BG(t); a_{BR/BG}BG(t); 0], \\ \text{где } M_{BR}(t) = \arg \min[a_{BR/OX}OX(t); a_{BR/ZP}ZP(t); a_{BR/BG}BG(t)];$$

$$AG_{BG}(OX, DT) = IF[M_{BG}(t) = a_{BG/OX}OX(t); a_{BG/OX}OX(t); 0] + \\ + IF[M_{BG}(t) = a_{BG/DT}DT(t); a_{BG/DT}DT(t); 0], \\ \text{где } M_{BG}(t) = \arg \min[a_{BG/OX}OX(t); a_{BG/DT}DT(t)].$$

Коэффициенты влияния a_{ij} в уравнениях модели могут быть идентифицированы несколькими способами, которые рассмотрены в работах [3 – 6].

Построение сценариев процессов в экономической подсистеме «Берег». Разработанная экономическая модель дает представление о динамике всех процессов в подсистеме «Берег», описываемых уравнениями (1) – (4). В проведенной серии вычислительных экспериментов выполнены расчеты на 370 шагов по времени. Все переменные представлены в безразмерном виде. Предельно возможный объем кредитования производства составляет $H_3^* = 300$, а процент по кредиту – $\sigma = 0,01H_3^*$. Сценарии процессов, полученные при этих условиях, показаны на рис. 4.

Для того чтобы оценить влияние экологической подсистемы «Море» на рентабельность производства, при построении сценариев, изображенных на рис. 4, $a - d$, сначала не учитывалось влияние природоохранного налога и штрафных санкций за загрязнение природной среды. Горизонтальные линии на рис. 4, a изображают постоянные сценарии спроса D на продукцию подсистемы, стоимости P и себестоимости E этой продукции. Частые вертикальные линии показывают величины ежедневной реализации продукции S , которая зависит от обеспеченности производства всеми видами ресурсов. Объемы ежедневно закупаемых производством ресурсов V_{11}, V_{12}, V_{13} приведены на рис. 4, б. Эти объемы зависят от соотношения текущих оборотных средств H_2

и текущих значений инвестиций (кредитов) H_3 , которые производство может использовать на приобретение недостающих единиц ресурсов для удовлетворения спроса. Как следует из рис. 4, в, производство вынуждено постоянно инвестировать в закупку ресурсов предельно допустимую величину накопленного кредита H_3^* .

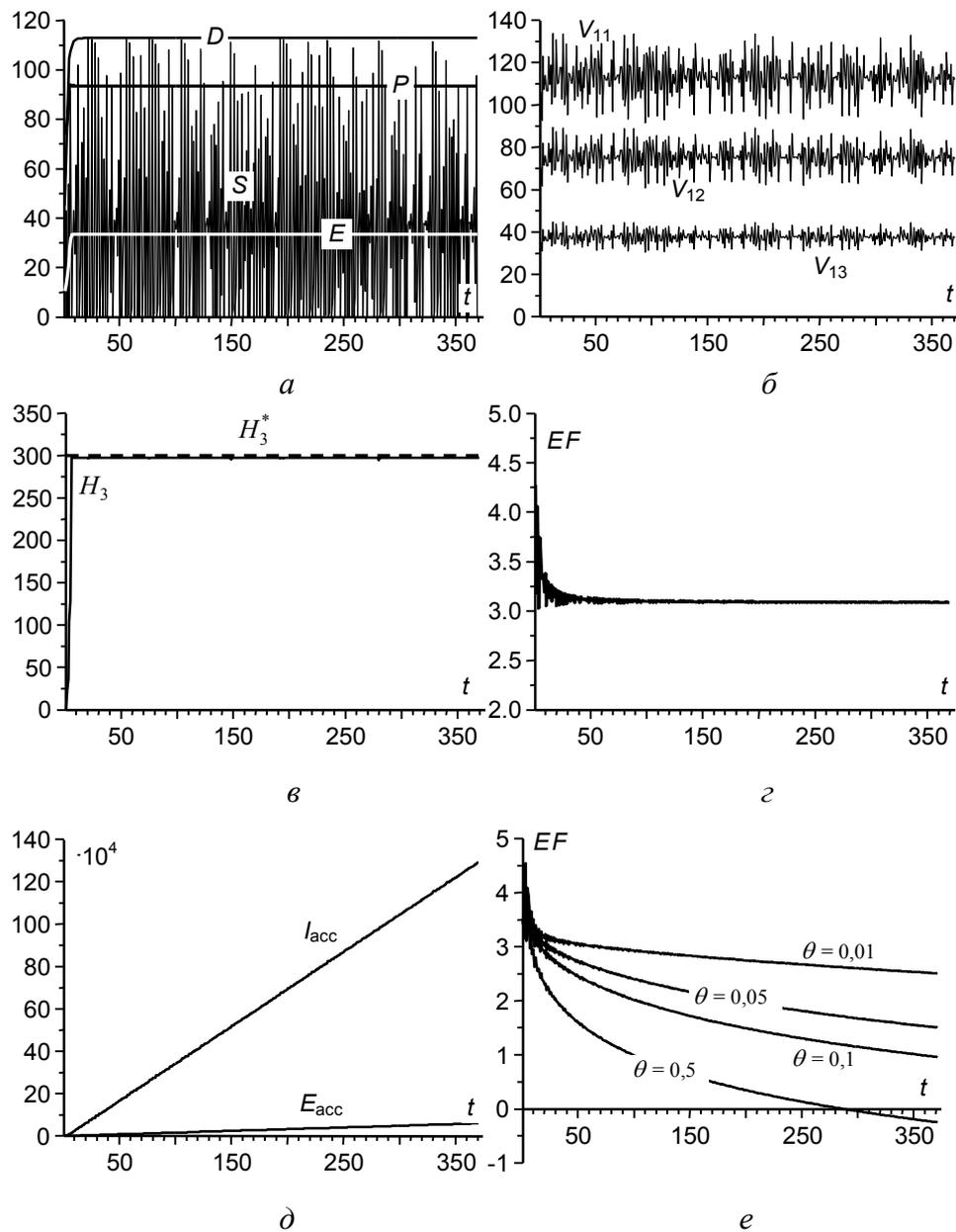


Рис. 4. Сценарии, прогнозируемые экономической подсистемой «Берег»

Для того чтобы контролировать рентабельность производства EF , использован логарифм отношения доходов I_{acc} , аккумулированных за некоторый период времени t , к накопленным расходам E_{acc} :

$$EF = \ln \frac{1 + I_{acc}}{e + E_{acc}}, \quad I_{acc} = \int_0^t PS(t)dt, \quad E_{acc} = \int_0^t EV(t)dt. \quad (7)$$

Сценарии этих процессов приведены на рис. 4, з, д. Без учета экологических санкций за загрязнение морской среды рентабельность производства оставалась постоянной.

Во второй серии экспериментов имитированы условия, при которых экономическая подсистема должна производить отчисления на природоохранные цели из оборотных средств производства в количестве θH_2 . Сценарии рентабельности производства построены для различных процентов отчислений θ . Полученные результаты изображены на рис. 4, е. Рисунок показывает, как быстро падает рентабельность производства при увеличении экологических санкций. При значительных отчислениях ($\theta = 0,5$) выпуск продукции становится нерентабельным уже на 280-м шаге вычислений.

Построение сценариев процессов в экологической подсистеме «Море». Для оценки устойчивости и управляемости ABC -модели (5), (6) проведены вычислительные эксперименты. Уравнения модели были представлены в конечных разностях и решались на временном интервале (0, 370) шагов итераций. Переменные экосистемы записаны в безразмерной форме и приведены к общей шкале изменчивости (0,10) с помощью линейного преобразования. Значения некоторых коэффициентов модели представлены в таблице.

Коэффициенты внутрисистемных влияний в модели экосистемы

$a_{KL/MN}$	PP	ZP	BR	OX	CD	BG	DT
PP	1	-0,6	-	-	1,5	0,6	-
ZP	0,6	1	-0,4	0,6	-	0,8	-
BR	-	0,4	1	0,3	-	0,6	-
OX	0,5	-0,6	-0,3	1	-	-0,3	-
CD	-0,5	0,3	0,2	-	1	-	-
BG	-0,4	-0,3	-0,3	0,7	-	1	0,3
DT	0,4	0,4	0,2	-0,7	-	-0,3	1

В серии экспериментов свойства модели подсистемы «Море» сначала проверялись изолированно от подсистемы «Берег». Поэтому влияние загрязнений, поступающих в море с берега, было исключено путем приравнения к нулю коэффициентов $a_{PP/PL}$, $a_{ZP/PL}$, $a_{BR/PL}$ в соответствующих уравнениях (5).

Для оценки влияния климатических и погодных условий на сценарии процессов, воспроизводимых моделью экосистемы, имитированы внешние влияния: интенсивность солнечного излучения SR , температура верхнего слоя моря TW и модуль скорости ветра WF . Графики имитированных атмосферных воздействий и температуры моря приведены на рис. 5, а.

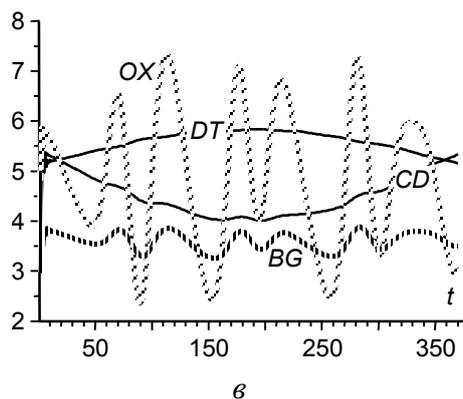
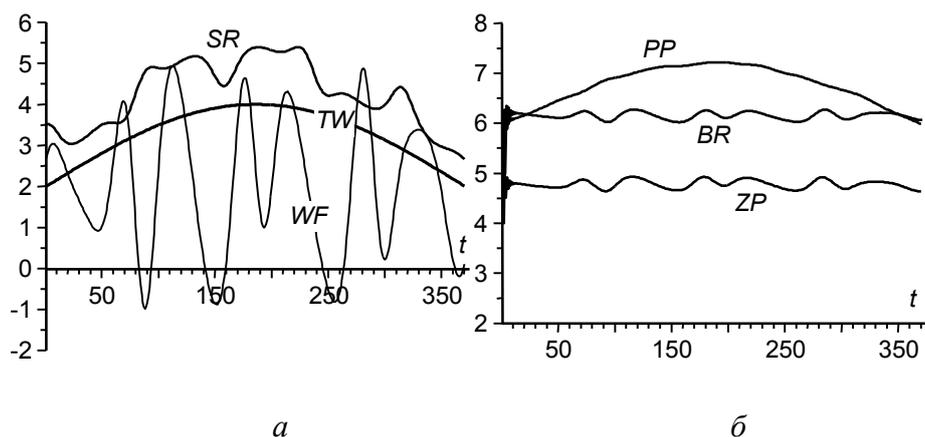


Рис. 5. Внешние влияния (а) и реакция на них переменных морской экосистемы (б, в) (график скорости ветра WF смещен вниз на единицу)

В первом эксперименте сняты ресурсные ограничения, для того чтобы в дальнейшем иметь возможность оценить их роль в формировании сценариев процессов в экосистеме. Поэтому логические агенты управления (б) заменены в уравнениях (5) суммами влияний:

$$\begin{aligned}
A_{PP}^*(BG, SR, CD) &= a_{PP/BG}BG(t) + a_{PP/SR}SR(t) + a_{PP/CD}CD(t), \\
A_{ZP}^*(OX, PP, BG) &= a_{ZP/OX}OX(t) + a_{ZP/PP}PP(t) + a_{ZP/BG}BG(t), \\
A_{BR}^*(OX, PP, BG) &= a_{BR/OX}OX(t) + a_{BR/ZP}ZP(t) + a_{BR/BG}BG(t), \\
A_{BG}^*(OX, DT) &= a_{BG/OX}OX(t) + a_{BG/DT}DT(t).
\end{aligned}
\tag{8}$$

В этих условиях при заданной интенсивности внешних влияний наиболее выраженная реакция модели проявилась в сценариях процессов, непосредственно зависевших от модуля приводного ветра, годового хода освещенности и температуры моря. Модель воспроизвела значительные колебания концентрации кислорода в верхнем слое (кривая OX на рис. 5, в) и сглаженный годовой ход концентраций углекислого газа и детрита (кривые CD и DT на рис. 5, в). Кривая концентрации фитопланктона (PP на рис. 5, б) сформирована в основном за счет годового хода солнечной радиации (SR на рис. 5, а). Значения концентраций зоопланктона и биоресурса (ZP и BR на рис. 5, б) испытывали небольшие изменения за счет колебаний концентрации кислорода.

В следующем эксперименте были включены агенты управления (6). Полученные результаты приведены на рис. 6. Включение агентов ресурсного лимитирования заметно изменило сценарии обеспечения жизненными ресурсами организмов экосистемы. Как следует из рисунка, сценарии агентов управления ориентированы на минимальные значения их аргументов. Так, например, значения графика агента $AG_{PP}(BG, SR, CD)$ лимитирования фитопланктона по биогенным веществам, солнечной радиации и углекислому газу (кривая AG_{PP} на рис. 6, а) соответствуют минимальным значениям кривых SR и CD . Кривая BG лежит выше них, значит, биогенные вещества в этом случае не оказывали влияния на концентрацию фитопланктона.

По результатам этих экспериментов сделан вывод о том, что агенты управления играют существенную роль в предложенной модели морской подсистемы. Модель имеет довольно высокую чувствительность к внешним влияниям и адекватно воспроизводит причинно-следственные связи между моделируемыми процессами. Поэтому использованные в ней коэффициенты внутрисистемных влияний (таблица) сохранены при включении подсистемы «Море» в общую с экономической подсистемой «Берег» имитационную модель интегральных эколого-экономических процессов.

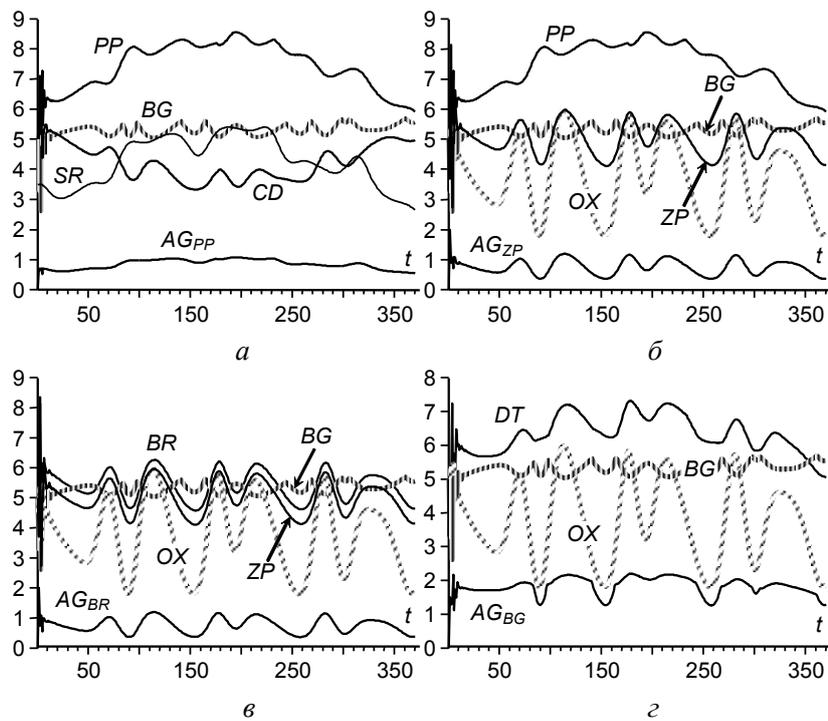


Рис. 6. Функции агентов ресурсного лимитирования в модели подсистемы «Море» и формирование ими концентраций веществ: *a* – фитопланктона, *б* – зоопланктона, *в* – биоресурса, *з* – биогенных элементов

Управление балансом потребления морских биоресурсов на основе объединенной модели системы «Берег – море». Объединение моделей подсистем «Берег» и «Море» в единую систему осуществлено через блок управления эколого-экономическим балансом рентабельности производства и уровнями загрязнения и биоразнообразия морской среды. Разработанная схема управления балансом основана на отрицательной обратной связи между двумя подсистемами, которая действовала следующим образом. Рост концентрации загрязнений в морской среде PL принимался пропорциональным накопленным объемам реализуемой продукции S_{acc} . Уменьшению концентрации способствовало естественное самоочищение морской среды за счет турбулентного перемешивания и химико-бактериологических реакций, а также за счет природоохранных действий. Первый из этих двух факторов считался пропорциональным уровню загрязнения PL с некоторым коэффициентом ε , второй – объему средств, аккумулированных в фонде природоохранных действий EP . Поэтому модульное уравнение ABC -метода для концентрации загрязнений имеет следующий вид:

$$\frac{dPL}{dt} = 2r_{PL} PL [C_{ZP} - (PL + a_{PL/EP} EP + \varepsilon PL - a_{PL/S} S_{acc})]. \quad (9)$$

Объем фонда природоохранных действий EP формировался путем накопления отчислений TX из прибыли экономической подсистемы. Для улучшения

экологического состояния морской среды использовался природоохранный налог, пропорциональный значению концентрации PL , к которому добавлялся экологический штраф, когда концентрация загрязнений становилась выше предельно допустимого значения PL^* . Включение экологического штрафа и его размер контролировались агентом управления $AG_{TX}(PL, PL^*)$. Поэтому использовались следующие уравнения для величин EP и TX :

$$\frac{dEP}{dt} = 2r_{EP}EP[C_{EP} - (EP - a_{EP/TX}TX_{acc} + F_{EP})], \quad (10)$$

$$\frac{dTX}{dt} = 2r_{TX}TX\{C_{TX} - [TX - a_{TX/PL}PL - AG_{TX}(PL, PL^*)]\}, \quad (11)$$

где F_{EP} – дополнительные инвестиции в фонд EP ;

$$AG_{TX}(PL, PL^*) = IF\{PL < PL^*; 0; a_{TX}[1 - \exp(b_{TX}\tau)]\}.$$

Для того чтобы замкнуть цепь обратной связи между подсистемами «Берег» и «Море», индекс биоразнообразия морской среды BD определяется концентрациями основных групп гидробионтов – фитопланктона PP , зоопланктона ZP и биоресурса BR , которые существенно зависят от уровня загрязнения морской среды экономической подсистемой:

$$\frac{dBD}{dt} = 2r_{BD}BD[C_{BD} - (BD - a_{BD/PP}PP - a_{BD/ZP}ZP - a_{BD/BR}BR)]. \quad (12)$$

Управление объединенной системой «Берег – море» осуществлялось через зависимость себестоимости продукции производства от уровня санкций за загрязнение TX и от индекса биоразнообразия BD морской среды:

$$\frac{dE}{dt} = 2r_EE\{C_E - [E - \sum_{i=1}^3 \rho_i q_i - a_{E/TX}TX - AG_{BD}(BD, BD^*)]\}, \quad (13)$$

где ρ_i – коэффициенты влияния стоимости ресурсов q_i ;

$$AG_{BD}(BD, BD^*) = IF\{BD > BD^*; 0; a_{BD}[1 - \exp(b_{BD}\tau)]\}.$$

Увеличение санкций за загрязнение и уменьшение индекса биоразнообразия ниже значения BD^* увеличивали себестоимость продукции и понижали рентабельность производства.

Отметим, что объединенная модель системы «Берег – море» (1) – (13) довольно детально описывает эколого-экономические процессы развития. В этой модели управление экологическим состоянием морской среды осуществляется не только по критерию уровня загрязнения, но и по индексу биоразнообразия. С использованием объединенной модели проведена серия вычислительных экспериментов. Результаты одного из них суммированы на рис. 7.

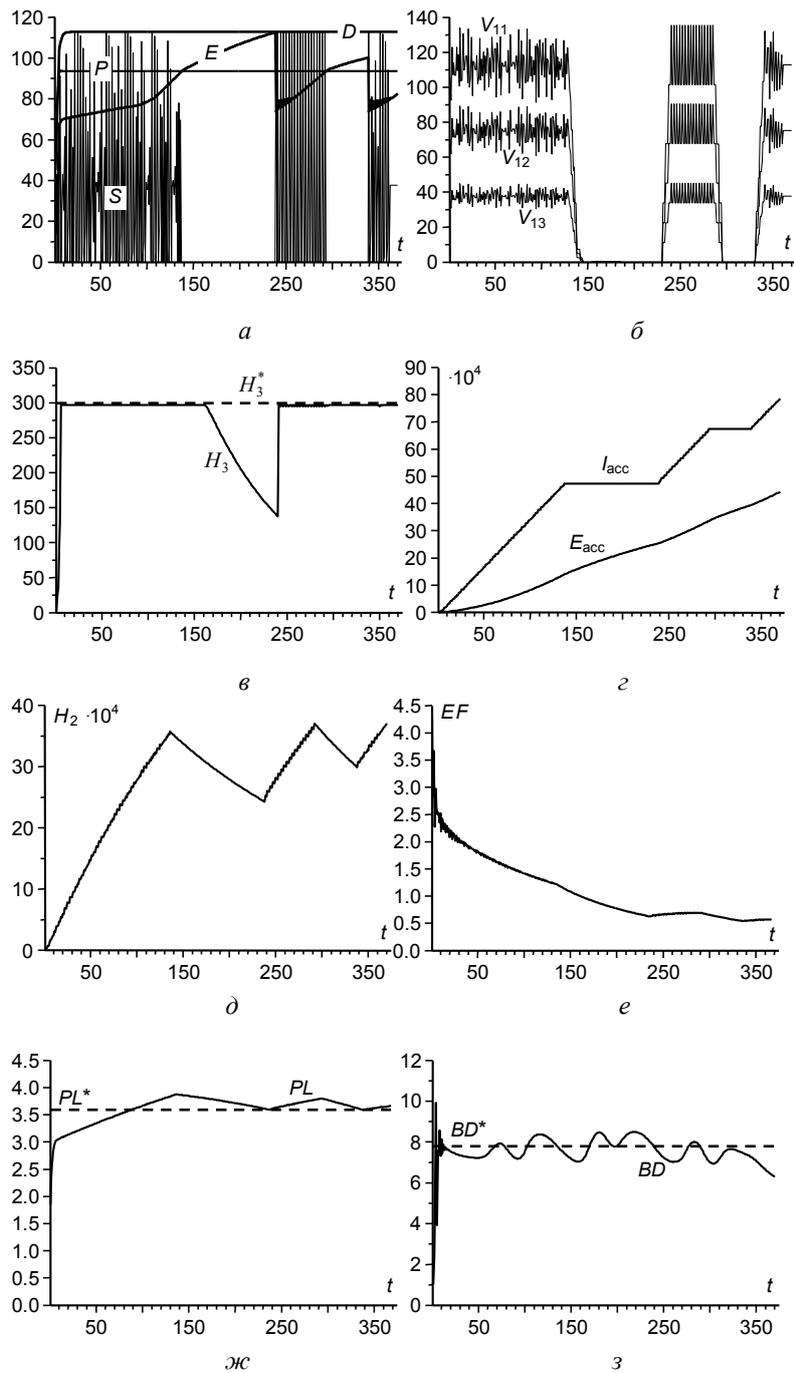


Рис. 7. Результаты управления сценариями эколого-экономических процессов по критерию уровня загрязнения морской среды PL

В начале эксперимента наблюдалась практически непрерывная реализация продукции S при постоянном спросе D и рыночной стоимости P (рис. 7,

a). Одновременно возростала концентрация загрязнений в море (рис. 7, *ж*). Индекс биоразнообразия испытывал колебания около предельно допустимого значения $BD^* = 8$ (рис. 7, *з*). Поэтому основное влияние на себестоимость производства оказывал уровень загрязнения. Себестоимость производства быстро увеличивалась, и на 130-м шаге по времени она сравнялась по величине со стоимостью продукции, в связи с чем произошла первая остановка производства (рис. 7, *a*). Подсистема «Берег», которая приобретала необходимые ей виды ресурсов, используя предельно возможные размеры кредитования (рис. 7, *e*), также прекратила эти закупки (рис. 7, *б*).

Остановка производства продолжалась до 239-го шага. После остановки производства наступил период уменьшения уровня загрязнения благодаря процессам самоочищения морской среды, а также под влиянием фонда природоохранных действий. Установленная в этом эксперименте скорость уменьшения концентрации загрязнений морской среды обеспечила падение ее до значения $PL^* = 3,7$ на 239-м шаге эксперимента, когда агент штрафных санкций $AG_{TX}(PL, PL^*)$ в уравнении (11) резко уменьшил себестоимость и агенты управления выпуском продукции возобновили производство (рис. 7, *a*). В период остановки производства прекратился рост величины накопленных доходов (рис. 7, *з*) и происходило частичное погашение накопленных кредитов (рис. 7, *e*) из имеющихся оборотных средств. Поэтому оборотные средства сокращались (рис. 7, *д*), а накопленные расходы продолжали расти (рис. 7, *з*). Этим объясняется падение суммарной рентабельности производства (рис. 7, *e*).

С момента времени возобновления производства на 239-м шаге повторился описанный выше цикл управления уровнем загрязнения. Таким образом, в течение всего времени эксперимента уровень загрязнения не выходил за верхнюю грань допустимых значений $PL < 4,0$ и имел тенденцию к уменьшению (рис. 7, *ж*). Суммарная рентабельность производства оставалась положительной и имела тенденцию к стабилизации.

Сценарии, приведенные на рис. 7, получены в эксперименте, когда была поставлена задача найти такой размер санкций за загрязнение морской среды, при котором допустимый уровень загрязнения мог достигать значения $PL^* = 3,6$, но не должен был превышать значение $PL = 4,0$. В процессе вычислений установлено, что для обеспечения этих условий отчисления из оборотных средств подсистемы «Берег» в фонд природоохранных действий должны были составлять около одного процента ($\theta = 0,01$).

Таким образом, прогнозируемые объединенной моделью «Берег – море» экологические сценарии PL, BD , а также экономический сценарий рентабельности EF позволили найти необходимый баланс природопользования. Вычислительные эксперименты показали, что существуют различные варианты применения модели системы «Берег – море» для нахождения этого баланса.

Объемы производства подсистемы «Берег», а следовательно, и уровень загрязнения влияли на индекс биоразнообразия через значения концентраций фито-, зоопланктона и биоресурса в соответствии с уравнением (12). Была найдена нижняя грань допустимых значений индекса биоразнообразия $BD^* = 7,8$ и поставлена задача определить необходимый размер санкций за загряз-

нение, при котором индекс BD не опускается ниже этой грани. Вычислительный эксперимент проведен при тех же значениях параметров модели «Берег – море», что и в случае, рассмотренном выше. Сценарии эколого-экономических процессов, полученные в этом эксперименте, показаны на рис. 8.

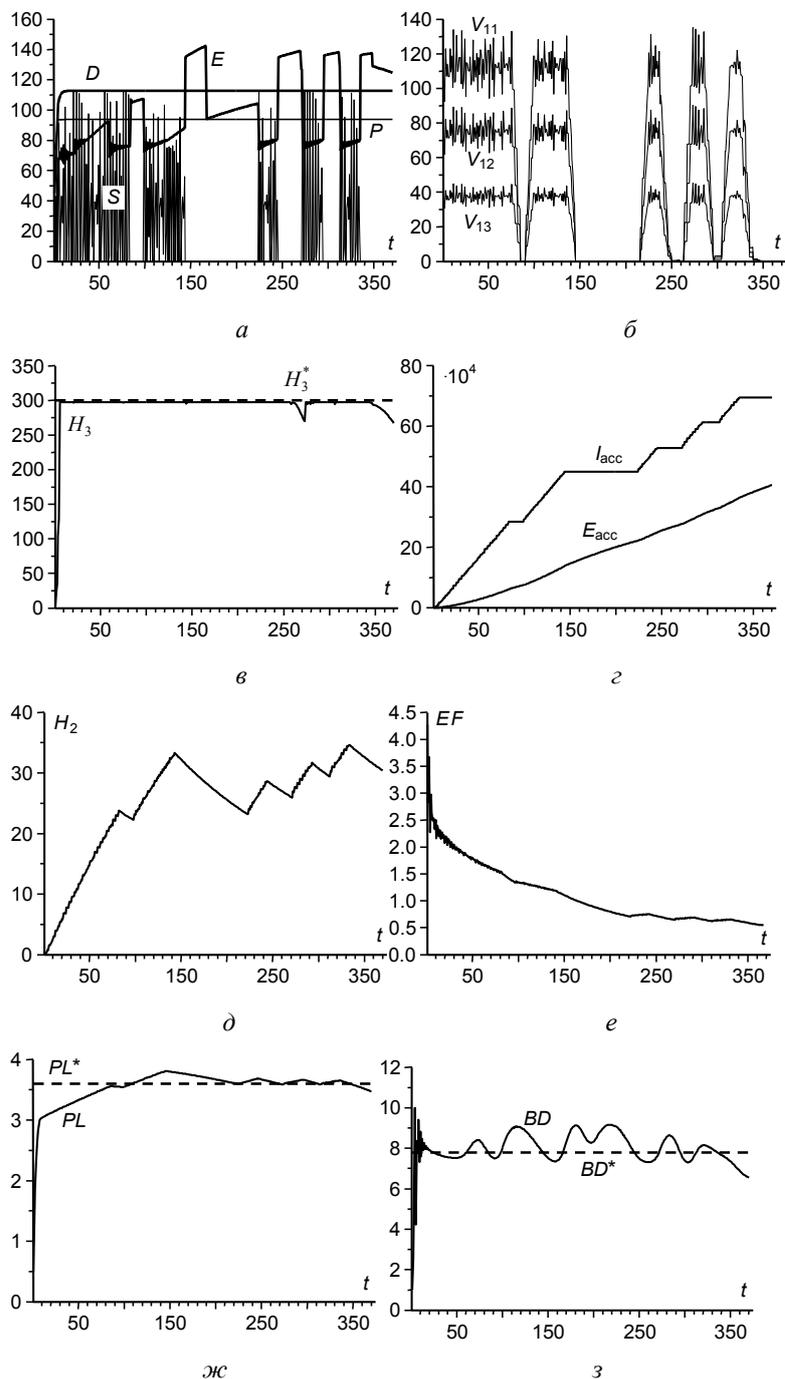


Рис. 8. Результаты управления сценариями эколого-экономических процессов по критерию уровня загрязнения PL и индексу биоразнообразия морской среды BD

В связи с использованием агента управления $AG_{BD}(BD, BD^*)$ в уравнении для себестоимости (13) кривая себестоимости E (рис. 8, *a*) стала более изменчивой по сравнению с первым экспериментом (рис. 7, *a*). Теперь на нее оказывали влияние сразу два агента управления: $AG_{TX}(PL, PL^*)$ – через уравнение (11) и $AG_{BD}(BD, BD^*)$ – через уравнение (13). В результате размеры санкций, влияющих на себестоимость, увеличились, и сценарий себестоимости 5 раз останавливал производство, вследствие чего уровень загрязнения PL (рис. 8, *ж*) и индекс биоразнообразия BD (рис. 8, *з*) удерживались около предельно допустимых значений. При тех параметрах управления моделью системы «Берег – море», которые были использованы в этих расчетах, суммарная рентабельность производства снижалась (рис. 8, *e*). Негативные тенденции наблюдались в сценариях экологических процессов – концентрации фитопланктона, зоопланктона и биоресурса уменьшались.

Для улучшения экологического состояния морской среды следовало увеличить размер санкций, налагаемых на экономическую подсистему, ценой дальнейшего понижения суммарной рентабельности производства. Альтернативой этому могло служить изменение самого производства – перевод его на ресурсосберегающие (экологически чистые) технологии. Однако перевод производства на подобные технологии требует значительных затрат. Для этого производство должно выделять определенные средства в специальный фонд новых природоохранных технологий EP , которые исключают или существенно снижают уровень загрязнения окружающей среды.

Для того чтобы проверить эффективность перевода производства на экологически чистые технологии, проведен следующий эксперимент. В модели эколого-экономической системы «Берег – море» был имитирован фонд природоохранной деятельности EP , в котором накапливались средства от экологических санкций за загрязнение морской среды. Кроме того, в этот фонд регулярно отчислялась некоторая часть оборотных средств производства (например, $0,001H_2$). Для сопоставимости результатов моделирования параметры модели сохранялись прежними, за исключением того, что теперь в уравнении для уровня загрязнений (9) было учтено влияние фонда EP , а уравнение для EP приняло следующий вид:

$$\frac{dEP}{dt} = 2r_{EP}EP\{C_{EP} - [EP - (a_{EP/TX}TX + a_{EP/H_2}H_2)_{acc}]\}. \quad (14)$$

Сценарии эколого-экономических процессов в системе «Берег – море», полученные при имитации перевода производства на экологически чистые технологии, приведены на рис. 9. Как следует из рис. 9, *ж*, в начальный период эксперимента (до 90-го шага по времени) происходил рост концентрации загрязнений и увеличивалась себестоимость производства (рис. 9, *a*) за счет экономических санкций (рис. 9, *д*). Средства на внедрение новых технологий в этот период времени было еще не достаточно (рис. 9, *в*). Поэтому после 90-го шага произошла кратковременная остановка производства (рис. 9, *a*). Однако с этого времени средства, накопленные в фонде природоохранных действий, начали превышать суммарный объем экономических санкций, так как слага-

емое $a_{EP/H_2} H_2$ в уравнении (14) имело тенденцию устойчивого роста, а слабое $a_{EP/ТХ} ТХ$ быстро убывало, следуя кривой уровня загрязнения (рис. 9, ж). Как результат, накопленные средства фонда природоохранных действий резко возросли.

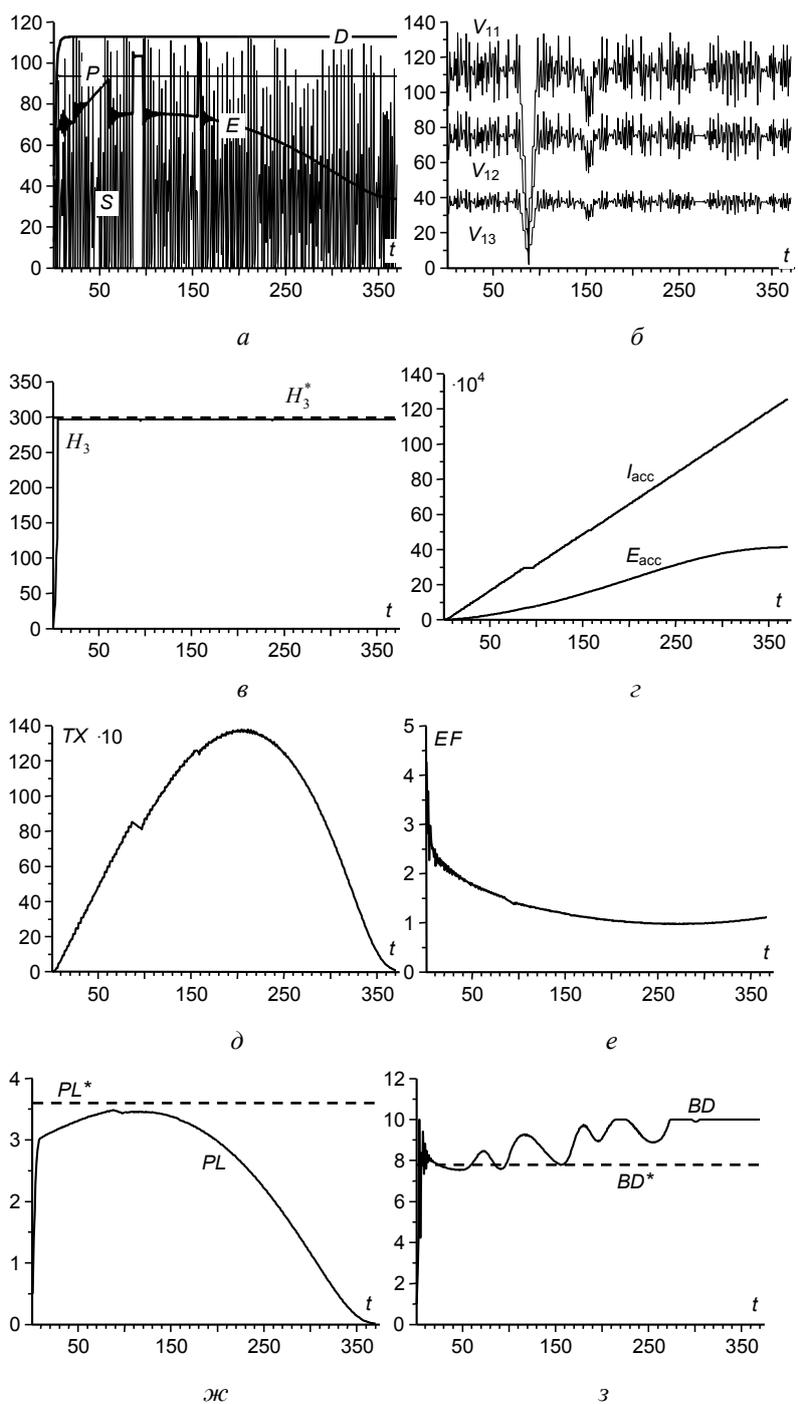


Рис. 9. Сценарии эколого-экономических процессов в системе «Берег – море» при переводе производства на экологически чистые технологии

По замыслу имитационного эксперимента увеличение средств фонда позволяло перевести производство на экологически чистые технологии. Показательным является график суммарной рентабельности производства (рис.

нального управления потреблением и воспроизводством морских ресурсов. Перевод производства на ресурсосберегающие технологии оказывается более выгодным, поскольку инвестиции на внедрение экологически чистых технологий с течением времени ведут к уменьшению штрафных санкций и остановок производства по экологическим причинам, а следовательно, повышают его эффективность при сохранении качества морской среды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-45-01013/14.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Daly H., Farley J.* Ecological Economics: Principles and Applications. 2nd edition. – Washington: Island Press, 2010. – 544 p.
2. *Voinov A.* Systems Science and Modeling for Ecological Economics. – Academic Press, 2008. – 430 p.
3. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.* Управление эколого-экономическими процессами в интегральной модели прибрежной зоны моря // Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 1. – С. 48 – 66.
4. *Ivanov V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E.* Coastal Zone Resources Management. – Kyiv: Akadempriodika, 2012. – 304 p.
5. *Тимченко И.Е., Иващенко И.К., Игумнова Е.М.* Управление интегральными эколого-экономическими процессами в системе «Берег – море» // Морской гидрофизический журнал. – 2015. – № 3. – С. 62 – 77.
6. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000. – 225 с.

Management of integrated ecological-economic processes in the «Land-Sea» system at maintaining quality of marine environment

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

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

Adaptive model for managing the processes in the ecological-economic system connecting the «Land-Sea» system industrial output, on the one hand, and the contamination degree and the marine environment biodiversity index, on the other, is proposed. Being based on analysis of the effect of economic sanctions for pollution upon the processes in marine ecosystem, the model is intended to find a rational balance between the income from marine resources use and the expenditures for preserving marine environment quality. Management agents controlling balance between consumption and reproduction of marine resources are applied in the models of «Land» and «Sea» subsystems, as well as in the integrated system model. Scenarios of ecological-economic processes arising at transferring industrial production on ecologically clean technologies are constructed, and advantages of such a variant of nature management are shown.

Keywords: ecological-economic model, adaptive balance of causes, scenarios of processes.