

УДК 911.1

И. Е. Тимченко,
Е. М. Игумнова ✉

Моделирование экогеодинамики природно-хозяйственных комплексов

Таврический национальный университет им. В. И. Вернадского,
г. Симферополь, Украина

Аннотация. Для слежения за динамикой процессов в имитированном природно-хозяйственном комплексе была использована объединенная модель, которая содержала ДСМ морской среды, управляемую внешними гидрометеорологическими условиями, и эколого-экономическую модель, построенную АВС методом. Как показали вычислительные эксперименты, подобные модели способны обеспечивать прогностические сценарии развития процессов в ПХК, которые, в свою очередь, позволяют контролировать экологическое состояние природной среды наряду с экономическими показателями потребления ее ресурсов.

Ключевые слова: природно-хозяйственный комплекс, моделирование.

Природно-хозяйственные комплексы (ПХК) представляют собой сложные системы, которые объединяют в своем составе природные процессы, характеризующие экологическое состояние окружающей среды, и социально-экономические процессы, сопровождающие хозяйственную деятельность в природной среде. С точки зрения системного подхода среди многообразия экогеодинамических процессов при изучении ПХК выделяются процессы, отвечающие за управление социальными эколого-экономическими системами (СЭЭС). Отмеченные две категории процессов, развивающихся в СЭЭС, существенно отличаются друг от друга. Процессы в природной среде (атмосфере, океане и на поверхности суши) моделируются пространственно-временными полями физических, химических, биологических, геологических и других компонентов вектора состояния системы. Для описания социально-экономических процессов обычно используют одномерные временные функции.

Основная проблема экологической геодинамики заключается в создании информационных технологий управления, которые совмещают в себе эколого-экономические модели и традиционные модели динамики сплошной природной среды. Под экологической динамикой ПХК мы будем подразумевать совместную взаимно обусловленную изменчивость всех процессов, развивающихся в СЭЭС. Совмещение моделей должно давать

возможность пересчитывать распределенные в пространстве и времени параметры природной среды в распределения значений эколого-экономических параметров, таких, как экологические штрафы за загрязнение окружающей среды в процессе хозяйственной деятельности или в оценки стоимости потребляемых природных ресурсов. Итогом совмещения моделей двух указанных типов станут пространственно-временные поля эколого-экономических характеристик ПХК.

Одним из перспективных подходов к построению совмещенных моделей является метод системного анализа, использующий принцип взаимных влияний между контролируемыми процессами. На его основе в работе [1] был предложен метод формального описания причинно-следственных отношений в сложных системах - метод адаптивного баланса влияний (АВС - метод), который позволяет связать экологическую динамику ПХК с результатами его хозяйственной деятельности. Мы рассмотрим эти вопросы на примере управления природно-хозяйственным комплексом "море-суша" в регионе Азовского моря. С этой целью мы введем динамическую стохастическую модель морской среды и свяжем ее с эколого-экономической моделью управления концентрацией биоресурса в акватории моря. Таким путем может быть осуществлено управление пространственно распределенным ресурсом, находящимся как под влиянием динамики природной среды (ветер, изменчивость мор-

ской среды), так и под воздействием экономических факторов (интенсивность потребления биоресурса, загрязнение окружающей среды и др).

Основы метода адаптивного баланса влияний. Рассмотрим n процессов: x_1, x_2, \dots, x_n , которые характеризуют какой-либо природно-хозяйственный комплекс и должны быть использованы для его опи-

$$x_i = a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + a_{i3} x_3 + \dots + a_{in} x_n, \text{ при } a_{ii} = 0, \quad (1)$$

в котором коэффициенты a_{ps} учитывают влияние процесса x_s на процесс x_p и сохраняют постоянные значения в пределах выбранного интервала времени.

$$dx_i / dt = x_i [1 - 2 F^{(+)} (a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + a_{i3} x_3 + \dots + a_{in} x_n + x_i)] \quad (2)$$

В этом уравнении в качестве функции $F^{(+)}$, называемой базовой функцией влияния, может быть использована любая монотонно растущая функция. Если, например, выбрать наиболее простой вариант

$$dx_i / dt = x_i - 2 (a_{i1} x_1 x_i + a_{i2} x_2 x_i + a_{i3} x_3 x_i + \dots + a_{in} x_n x_i + x_i^2).$$

При этом взаимные влияния процессов внутри системы относятся к так называемым "парным взаимодействиям" $x_p x_s$, которые обычно используют в биологии для описания систем типа "хищник-жертва" [2].

$$F^{(+)}(x_i) = 1 - \exp(x_i - a_{i1} x_1 - a_{i2} x_2 - a_{i3} x_3 - \dots - a_{in} x_n) \quad (3)$$

Стандартное уравнение для описания процессов в экосистеме при этом принимает следующий вид

$$dx_i / dt = c_i x_i [\exp(a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + a_{i3} x_3 + \dots + a_{in} x_n - x_i) - 1] \quad (4)$$

Придавая индексу i в последнем уравнении значения $1, 2, \dots, n$, при соблюдении условия (1), получим систему уравнений динамической АВС модели ПХК. При отсутствии внешних влияний система уравнений (4) приходит в состояние равновесия, когда имеют место равенства

$$\begin{aligned} x_1 &= a_{12} x_2 + a_{13} x_3 + \dots + a_{1n} x_n \\ x_2 &= a_{21} x_1 + a_{23} x_3 + \dots + a_{2n} x_n \\ &\dots \dots \dots \dots \dots \dots (5) \\ x_n &= a_{n1} x_1 + a_{n2} x_2 + \dots + a_{nn-1} x_{n-1} \end{aligned}$$

Состояние баланса системы может быть использовано для определения коэффициентов влияния a_{ps} . В работе [1] было показано, что эти коэффициенты вычисляются через коэффициенты корреляции,

$$a_{ps} = D_{ps} - \sum_i a_{pi} D_{si}, \quad (p, s, i = 1, 2, \dots, n; i \neq p; i \neq s) \quad (6)$$

Как следует из этой формулы, каждому процессу x_p соответствует своя система

сания. Поставленное условие объединяет эти процессы в единую систему и вводит между ними причинно-следственные отношения. Примем, что, по крайней мере на небольших интервалах времени, каждый из процессов может быть выражен линейной комбинацией остальных процессов. Тогда для процесса x_i справедливо представление

Основное уравнение АВС метода выражает собой баланс тенденций в изменении значений процесса, обусловленных влияниями на него со стороны других процессов [1]

линейной зависимости этой функции от своих аргументов

$F^{(+)}(x_i) = a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 + a_{i3} x_3 + \dots + a_{in} x_n + x_i$,
уравнение (2) принимает форму нелинейного уравнения Бернулли

В настоящей работе качестве базовой функции влияния мы будем использовать функцию вида

ляции, которые отражают статистические связи между процессами x_1, x_2, \dots, x_n .

Обозначим через $D_{ps} = M\{x_p x_s\} / (D_{pp} D_{ss})^{1/2}$ элементы корреляционной матрицы системы. Оператор нахождения математического ожидания $M\{x_p x_s\}$ предполагает осреднение по тому интервалу времени, в пределах которого коэффициенты уравнения считаются постоянными. Применяя к системе уравнений (5) операции, подобные тем, которые были использованы, А.Н.Колмогоровым [3], при выводе уравнений оптимальной интерполяции случайных функций, можно получить следующую общую формулу для определения коэффициентов a_{ps}

уравнений (6) для нахождения $n-1$ неизвестных коэффициентов влияний, входя-

щих в динамическое уравнение для x_p в (4). Для того, чтобы вычислить коэффициенты влияния на процесс x_p , должны быть заданы все те коэффициенты корреляции, которые составляют строку с номером s в корреляционной матрице $\{D_{ps}\}$.

Эколого-экономические модели природно-хозяйственных комплексов. Важнейшим критерием управления развитием территорий, является критерий динамического баланса между экономической целесообразностью потребления природных ресурсов и экологической оправданностью вмешательства в естественное состояние природной среды. Любая эколого-экономическая система представляет собой баланс интересов ограниченных групп общества (фирм, корпораций), стремящихся к максимальной экономической выгоде от использования природных ресурсов, и всего общества в целом, заинтересованного в получении части этой прибыли при соблюдении экологических, социальных, правовых и прочих ограничений, обеспечивающих защиту окружающей среды. Общий баланс естественно связан с компонентами вектора состояния системы. Применяя обычно используемый критерий сохранения биоразнообразия окружающей среды, следует ввести в модель ПХК баланс между тенденцией к уменьшению биоразнообразия и к его росту за счет естественной устойчивости природных экосистем и осуществляемых природоохранных мероприятий.

Будем считать, что предприятие, потребляющее биоресурс, уменьшает его концентрацию пропорционально объему выпуска продукции. Существует предельно допустимая концентрация биоресурса, за которой наступают необратимые изменения естественного биоразнообразия природной среды. В качестве тенденции, препятствующей такому развитию событий, естественно выбрать экономические санкции против предприятия. Этой цели служит ресурсная рента или природоохранный налог на выпуск продукции, сокращающей концентрацию биоресурса. Ресурсная рента призвана регулировать потребление биоресурса и поддерживать баланс биоресурса в природной среде.

Еще один вид экологического баланса связан с загрязнением окружающей среды отходами производства. Тенденции роста концентрации загрязняющих веществ в природной среде противостоит тенденция

к естественному самоочищению среды, поддерживаемая природоохранными мероприятиями. Как и в случае с биоресурсом, баланс загрязняющих веществ должен обеспечиваться введением экологических штрафов

Достаточно общая модель эколого-экономической системы, которая учитывает основные балансы в экономической и в экологической подсистемах, была предложена в работе [1]. Структура модели изображена на рис. 1. Динамика системы представлена 11 развивающимися процессами X_i , которые образуют ее вектор состояния. Компоненты вектора имеют следующий смысл: X_1 - спрос на продукцию предприятия, входящего в состав системы, X_2 - цена единицы продукции, X_3 - показатель качества продукции, X_4 - себестоимость продукции, X_5 - объем выпуска продукции, X_6 - кредит оборотных средств, накопленный к текущему моменту времени, X_7 - инвестиции в основные фонды, требующие возврата кредиторам, X_8 - имеющиеся основные фонды, X_9 - необходимые основные фонды, X_{10} - концентрация загрязнений в природной среде, X_{11} - концентрация биоресурса в природной среде.

В модели присутствуют также переменные, являющиеся производными функциями от компонент вектора состояния: H - объем готовой продукции на складе, S - скорость реализации продукции, I - норма прибыли, U - управление выпуском и реализацией продукции, D - текущие доходы предприятия, C - текущие затраты предприятия, A - текущий кредит оборотных средств, M - проценты по кредиту, G - текущие инвестиции в основные фонды, F - проценты по инвестициям, E - доля экологического штрафа в себестоимости, R - доля ресурсной ренты в себестоимости, AD - накопленные доходы, AC - накопленные расходы, AI - накопленная прибыль, T - рентабельность, B_1 - баланс выпуска, B_2 - баланс оборотных средств, B_3 - баланс основных фондов, B_4 - баланс загрязняющих веществ, B_5 - баланс биоресурса.

Изображенная на рис. 1 концептуальная модель представляет причинно-следственные связи в эколого-экономической системе: рынок - предприятие - природная среда - государство. Динамические уравнения эколого-экономической модели могут быть построены с помощью общей ABC модели (6). С уче-

том связей, изображенных на рис.1, они имеют следующий вид:
 $dX_1/dt = c_1 X_1 [\exp(-a_{11} X_1 + a_{21} X_2 + a_{31} X_3) - 1];$
 $dX_2/dt = c_2 X_2 [\exp(-a_{22} X_2 + a_{42} X_4 + a_{s4} S) - 1];$

$$\begin{aligned} dX_3/dt &= c_3 X_3 [\exp(-a_{33} X_3 + a_{s3} S) - 1]; \\ dX_4/dt &= c_4 X_4 [\exp(-a_{44} X_4 + a_{64} X_6 + a_{74} X_7 + \\ &+ a_{E4} E + a_{R4} R + a_{34} X_3) - 1]; \end{aligned} \quad (7)$$

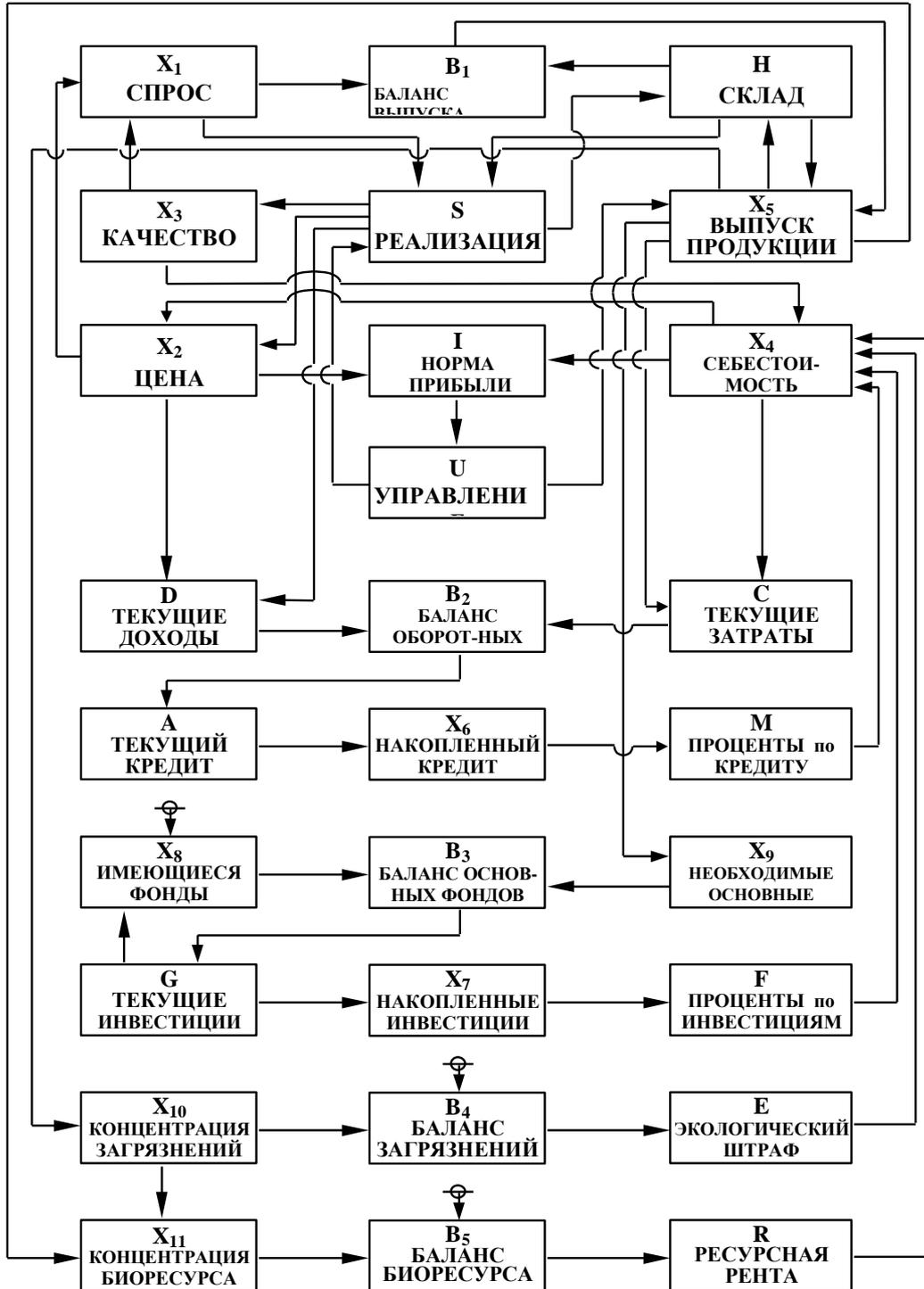


Рис. 1. Концептуальная модель эколого-экономической системы.

$$\begin{aligned}
 dX_5/dt &= c_5 X_5 [\exp(-a_{55} X_5 + a_{U5} U X_5 + a_{B15} B_1) - 1]; \\
 X_6 &= M_{06} X_6 + A \\
 X_7 &= F_{07} X_7 + G; \\
 dX_8/dt &= c_8 X_8 [\exp(-a_{88} X_8 + a_{78} X_7 + a_{08} \exp(-c_{08} n\tau)) - 1]; \\
 dX_9/dt &= c_9 X_9 [\exp(-a_{99} X_9 + a_{59} X_5) - 1]; \\
 dX_{10}/dt &= c_{10} X_{10} [\exp(-a_{1010} X_{10} + a_{510} X_5) - 1]; \\
 dX_{11}/dt &= c_{11} X_{11} [\exp(-a_{1111} X_{11} + a_{511} X_5 + a_{1011} X_{10}) - 1]; \\
 B_1 &= IF((X_1 - H) \leq 0; 0; X_1 - H), B_2 = D - C; B_3 = X_8 - X_9; \\
 B_4 &= X_{10} - X_{10}; B_5 = X_{11} - X_{11}; \\
 S &= IF(I > 0; IF(X_1 \leq H; X_1; H); 0); A = IF(B_2 > 0; 0; B_2); \\
 G &= IF(B_3 > 0; 0; B_3); E = IF(B_4 > 0; 0; -B_4); \\
 R &= IF(B_5 > 0; r_0 X_5; r_1 X_5); H = H' + X_5 - S; \\
 I &= X_2 - X_4; D = X_2 S; C = X_4 X_5; AD = AD + S X_2; \\
 AC &= AC + X_4 X_5; T = AD / AC - 1.
 \end{aligned}$$

Для прогноза процессов в системе необходимо задать начальные значения компонент вектора состояния X_1^0, \dots, X_{11}^0 , а также определить входящие в модель коэффициенты функций влияния.

Моделируемый природно-хозяйственный комплекс. Общая эколого-экономическая модель (7) должна учитывать особенности конкретного ПХК. Мы рассмотрим ее применение на примере некоторого промышленного объекта, потребляющего биоресурсы Азовского моря и загрязняющего его акваторию отходами производства.

Характерной особенностью Азовского моря - мелководного внутреннего водоема, окруженного территориями с интенсивной хозяйственной деятельностью, является динамический баланс между процессами воспроизводства и потребления живых ресурсов, с одной стороны, и растущим уровнем загрязнения - с другой. В настоящее время основным источником загрязнения Азовского моря является сброс сточных вод промышленного, сельскохозяйственного и бытового происхождения. Поступающие в море отходы существенно влияют на биохимические процессы и, как следствие, на биомассу планктона, видовой состав и количество рыб, моллюсков, микроорганизмов и других форм жизни.

По некоторым оценкам ухудшение экологической ситуации в Азовском море в последние годы привело к снижению запасов промысловых рыб более, чем в 20 раз. Поэтому проблема Азовского моря заключается в разработке и внедрении научно обоснованной технологии управления всем природно-хозяйственным комплексом региона, включающим как экоси-

стему моря, так и экономическую систему прилегающих территорий.

Будем считать, что распределенный по акватории моря биоресурс используется для производства и реализации некоторого морепродукта, имеющего спрос на рынке. Если производство рентабельно, существует прибыль, стимулирующая развитие производства и увеличение потребления биоресурса. Существует также предельный объем потребления, за которым нарушается естественный процесс воспроизводства живых морских организмов. Кроме того, производство загрязняет окружающую среду и, как следствие, понижает ее качество, что уменьшает концентрацию биоресурса в море за счет сокращения количества живых организмов, образующих пищевую цепь для выделенного вида биоресурса.

Ресурсное качество среды отражается также на качестве производимого продукта. Его величина может служить основанием для определения размера компенсационных отчислений из прибыли предприятия, производящего продукт. Так как экологические платежи увеличивают затраты на производство продукта, в эколого-экономической системе действуют две противоположных тенденции: одна направлена на расширение производства и увеличение прибыли, другая - на его ограничение до пределов, определяемых спросом, и на снижение доли компенсационных отчислений в структуре затрат

Динамико-стохастическая модель Азовского моря. Для расчетов пространственно-временных полей природной среды обычно используют численные гидродинамические модели. Наряду с модельными оценками значений полей применяются данные наблюдений, которые уточ-

няют эти оценки. Реализуется схема так называемого четырехмерного анализа наблюдений, при которой данные наблюдений усваиваются в численной модели природной среды. Для этой цели вводится статистическая процедура корректировки прогнозов, которая превращает динамическую модель природной среды в динамико-стохастическую модель (ДСМ) [4,5].

Динамико-стохастическая модель Азовского моря состояла из динамической части, моделирующей детерминированные компоненты полей, и стохастической части, служащей целям усвоения данных наблюдений. Это означает, что наряду с прогнозированием по модели простран-

$$\begin{aligned} U_t + U U_x + V U_y + f V + g \xi_x + R U H^{-1} |V| - (\rho H)^{-1} \tau^x &= 0; \\ V_t + U V_x + V V_y + f U + g \xi_y + R V H^{-1} |V| - (\rho H)^{-1} \tau^y &= 0; \quad (8) \\ \xi_t + (H U)_x + (H V)_y &= 0; \\ (H \varphi)_t + (H U \varphi)_x + (H V \varphi)_y - (H D^x \varphi_x)_x - (H D^y \varphi_y)_y &= H S; \end{aligned}$$

Здесь были использованы следующие обозначения: ζ - возвышение свободной поверхности моря над отсчетной поверхностью уровня, h - расстояние от отсчетной поверхности уровня до дна, U , V - осредненные по глубине проекции вектора скорости течений на оси координат (Ox - на север, Oy - на восток, Oz - вверх), φ - концентрация пассивной примеси, f - параметр Кориолиса, g - ускорение свободного падения, R - коэффициент сопротивления, S - мощность источника концентрации примеси, τ^x , τ^y - проекции касательного напряжения ветра на оси координат, D^x , D^y - коэффициенты горизонтальной турбулентной диффузии в направлении осей Ox и Oy соответственно, $H = h + \xi$. Модель позволяла осуществлять прогнозы полей концентраций биоресурса в морской среде и концентраций загрязняющих веществ, источником которых считалось предприятие, расположенное на берегу моря и потребляющее морской биоресурс.

На поверхности моря были заданы касательные напряжения ветра и концентрация загрязняющих веществ, на твердых границах - условие непротекания и условие неизменности концентрации по нормали к берегу. Краевые условия для участков границ в устьях рек Дон и Кубань были заданы в форме функций источников. Значения коэффициентов горизон-

тальных распределений полей скорости течений, температуры и солености рассчитывались элементы статистической структуры этих полей: корреляционные функции невязок прогнозов полей по отношению к их наблюдениям.

Динамическая часть ДСМ Азовского моря, предназначенная для прогнозирования полей, состояла из уравнений теории мелкой воды, выражающих собой законы сохранения, импульса, массы и энергии. Обозначая операцию вычисления частной производной нижним индексом при соответствующей функции, эти уравнения можно записать в следующем виде [6]

тальной диффузии принимались равными $10^8 \text{ см}^2/\text{сек}$.

Тестовые расчеты по модели показали, что она адекватно описывает реакцию морской среды на атмосферное воздействие. Акватория моря была покрыта квадратной сеткой, содержащей 24 x 36 узлов. Шаг сетки по горизонтали составлял 10 км. Установившаяся картина горизонтальных течений в Азовском море была получена на вторые сутки модельного времени. Она приведена на рис. 2.

Стохастическая часть ДСМ Азовского моря содержала эволюционное уравнение для корреляционной функции ошибок прогнозов полей концентраций φ . Оно было построено на основе последнего из уравнений динамической модели (8). Наблюдения полей концентраций биоресурса и загрязняющих веществ были распределены неравномерно по акватории моря и выполнялись не одновременно. Поэтому для усвоения данных наблюдений была использована лишь небольшая часть из имевшихся архивных материалов. Для упрощения вычислений было принято предположение о локальной однородности поля ошибок, что позволило прогнозировать только дисперсии ошибок: закон пространственного убывания корреляционной функции ошибок был аппроксимирован экспоненциальной зависимостью.

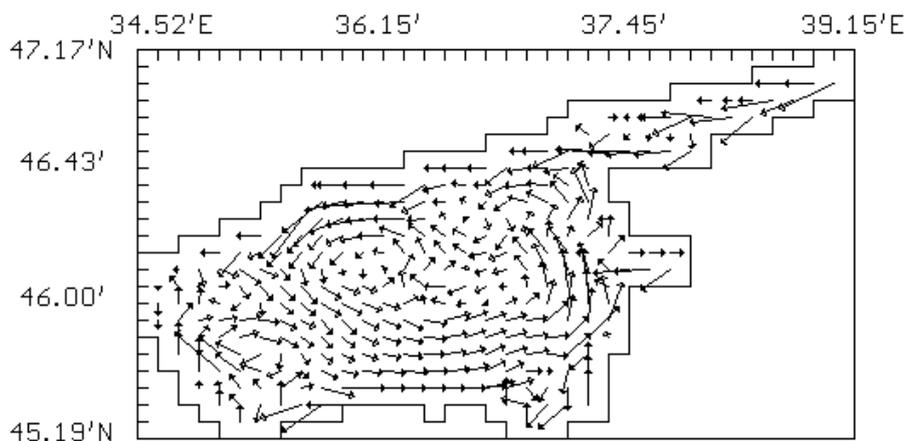


Рис. 2. Горизонтальные течения в Азовском море, рассчитанные по модели.

После выхода поля течений на стационарный режим были проведены эксперименты по слежению за полями концентраций на основе динамико-стохастической модели. Предполагалось, что один из источников загрязняющих веществ расположен на южной береговой границе моря, в районе Керченского пролива, другой - на северной, в районе г. Бердянска. На рис. 3 показана динамика распространения загрязняющей примеси: карты изолиний концентраций загрязняющих веществ через 1 сутки, 2 суток и 4 суток физического времени. Располагая подобными расчетами, нетрудно построить концентрации вредных для биоресурса веществ (в любой выделенной акватории моря) в зависимости от интенсивности загрязняющего производства, при заданной скорости самоочищения морской среды и контролируемой динамике водных масс.

Численные эксперименты с объединенной моделью природно-хозяйственного комплекса. Объединенная динамическая модель рассматриваемой системы "суша-море" отражала динамический баланс двух главных тенденций: потребления биоресурса, пропорционального выпуску морепродукта X_5 , и воспроизводства биоресурса X_{11} , которое зависит от уровня загрязнения X_{10} морской среды. Потребление биоресурса стимулировалось нормой прибыли I . С ростом потребления увеличивалась концентрация загрязняющих веществ в районах промысла. Экологические штрафы E понижали норму прибыли предприятия и ограничивали потребление им биоресурса в тех районах моря, где концентрация загрязняющих веществ оказывалась высокой.

Второй экономический рычаг управления промыслом представляет цепь:

X_5 - X_{11} - B_5 - R - X_4 . Повышенная ресурсная рента R существенно ограничивала потребление морепродукта в тех акваториях, где концентрация биоресурса оказывалась ниже допустимой нормы X_{11}^* . С этой целью в модели (7) было применено логическое условие:

$$R = IF (X_{11} > X_{11}^*; R; 10 R),$$

то есть, десятикратное увеличение стоимости потребляемого биоресурса в этих районах. С помощью рассмотренной выше динамико-стохастической модели моря отслеживалась фоновая динамика распределения загрязняющих веществ по его акватории, которая находилась под воздействием гидрометеорологических условий на поверхности моря, а также распреснения моря устьях рек, водообмена через Керченский пролив и других факторов. Поэтому уровень загрязнения морской среды являлся сложной функцией динамики водных масс и промысла биоресурса. Пространственные распределения концентраций биоресурса и концентраций загрязняющих веществ, рассчитываемые по модели, поступали на входы X_{10} и X_{11} модели (7) и служили источниками внешнего влияния на эти компоненты вектора состояния эколого-экономической модели.

Для проведения вычислительных экспериментов с моделью показатели степени экспонент подбирались с учетом взаимных корреляционных связей между отдельными полями, характеризующими природно-хозяйственный комплекс. Целью экспериментов были пространственные сценарии изменчивости осредненных по глубине распределений концентрации биоресурса и концентрации загрязняющих веществ в акватории Азовского моря. Результаты экспериментов показали воз-

возможность управления пространственными сценариями путем экономического регулирования потребления биоресурса и контроля за концентрацией загрязняющих веществ в акватории моря.

В качестве примера на рис. 4 а показано распределение концентраций загрязняющих веществ, полученное путем усвоения данных наблюдений с использованием модельного прогноза, показанного

на рис. 3 с. Для сравнения на рис. 3 в приведено поле солёности, построенное при тех же условиях. Оба распределения получены при равномерном западном ветре, имевшем скорость 10 м/сек. Из сравнения этих распределений видно, что эффект загрязнения морской среды промышленным предприятием усиливает градиенты концентраций загрязнений у восточной границы моря.

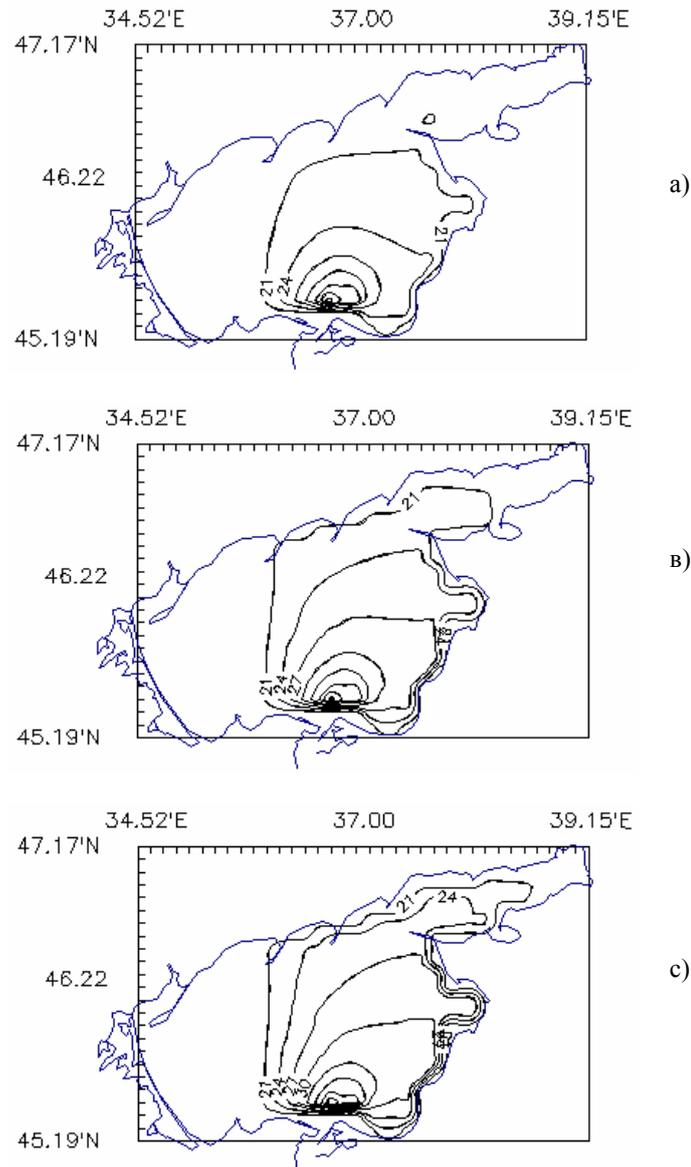


Рис. 3. Динамика распространения загрязняющих веществ от промышленного источника на южном берегу моря

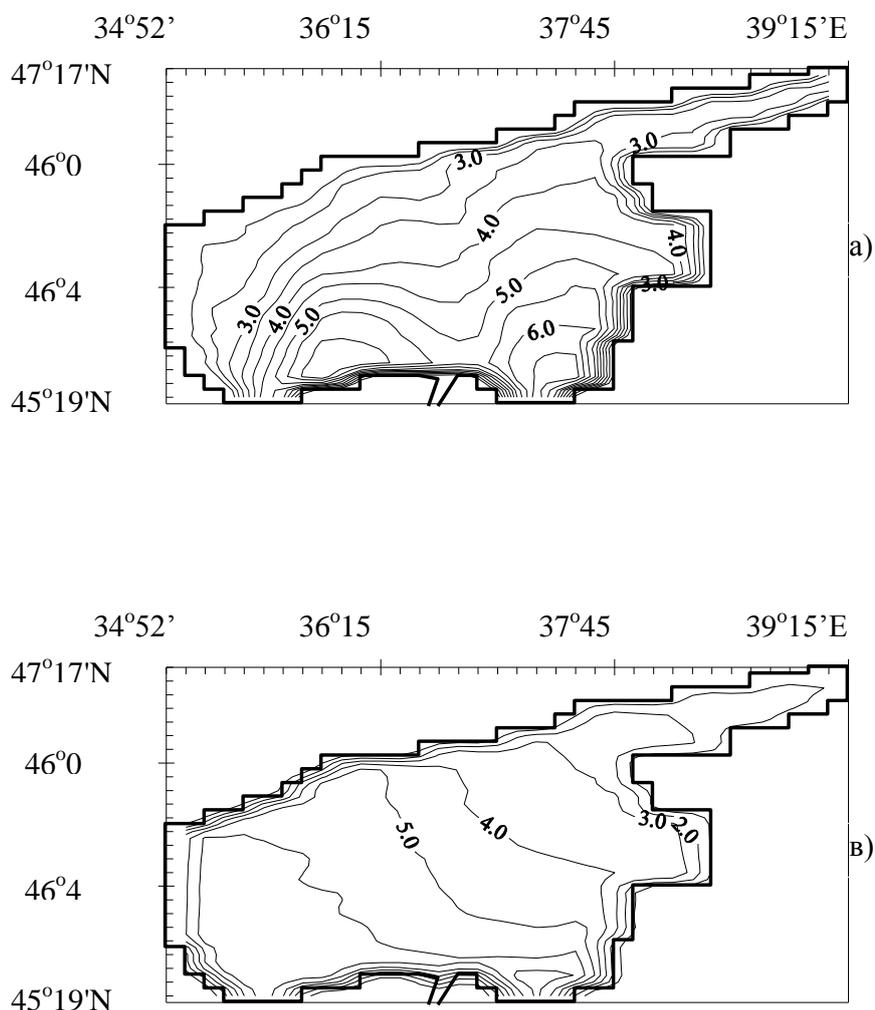


Рис. 4. Результаты четырехмерного анализа: а) поля концентрации загрязнений, в) поля солености.

На рис. 5 а – с представлены пространственные сценарии, связанные с потреблением биоресурса. На рис. 5 а приведены расчетные уровни рентабельности производства морепродукта с учетом его себестоимости. Из рисунка следует, что наиболее выгодным районом промысла является западная часть моря. Пространственное распределение биоресурса представлено на рис. 5 б. В этом вычислительном эксперименте в качестве дополнительного фактора, отрицательно влияющего на концентрацию биоресурса, было использовано поле солености, изоб-

раженное на рис. 4 б. Сценарий распределения концентрации биоресурса отражает общую тенденцию ухудшения экологической ситуации при движении от западной к восточной границе моря. Отрицательный эффект повышения концентрации загрязняющих веществ у восточного побережья, обусловленный действием западного ветра, оказался более сильным, чем положительный эффект уменьшения солености вод в этом районе. Поэтому в проведенных расчетах концентрация биоресурса в основном зависела от концентрации загрязняющих веществ.

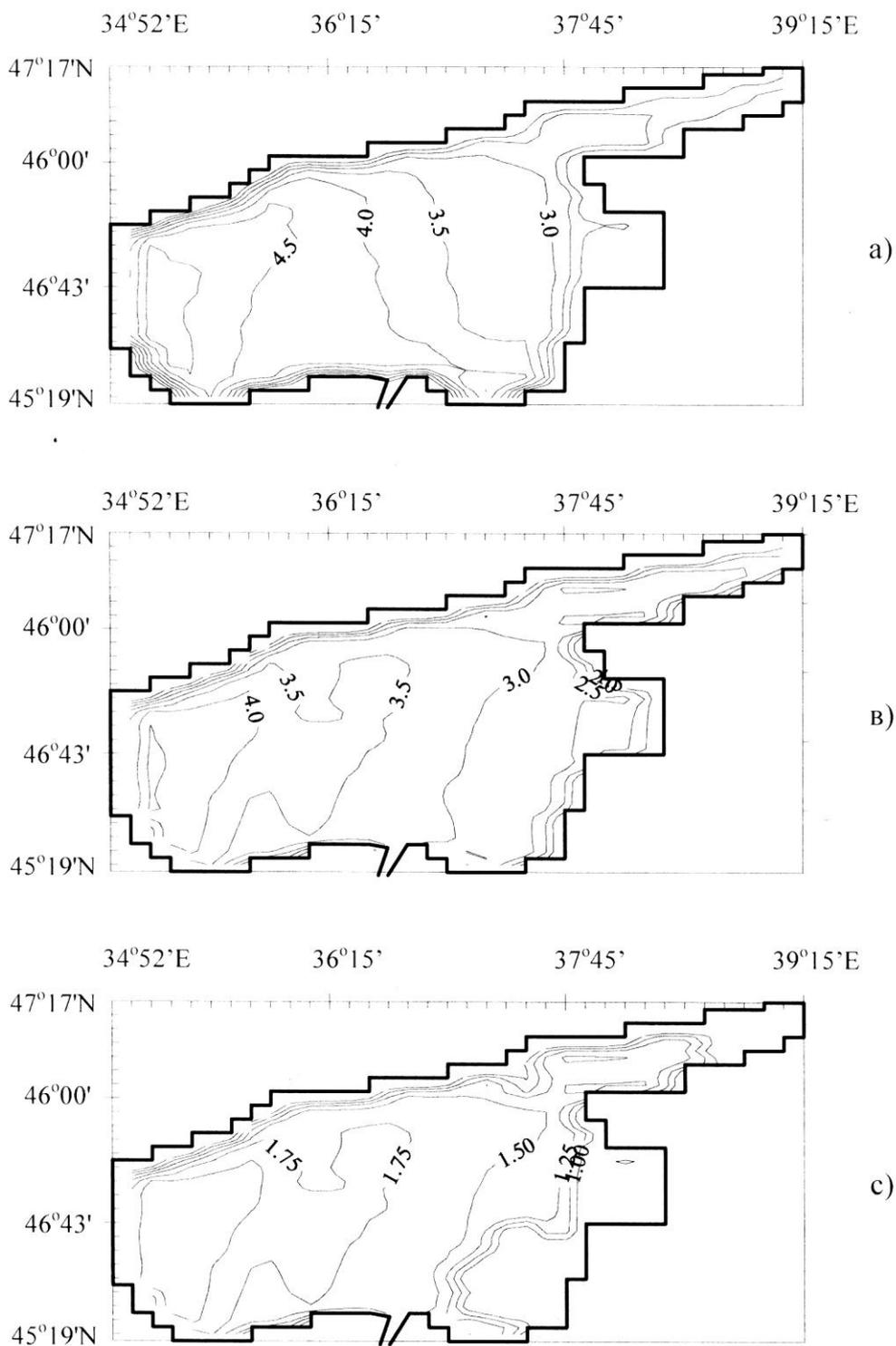


Рис. 5. Пространственные сценарии потребления биоресурса: а) показатель рентабельности, в) концентрация биоресурса, с) допустимые уровни потребления

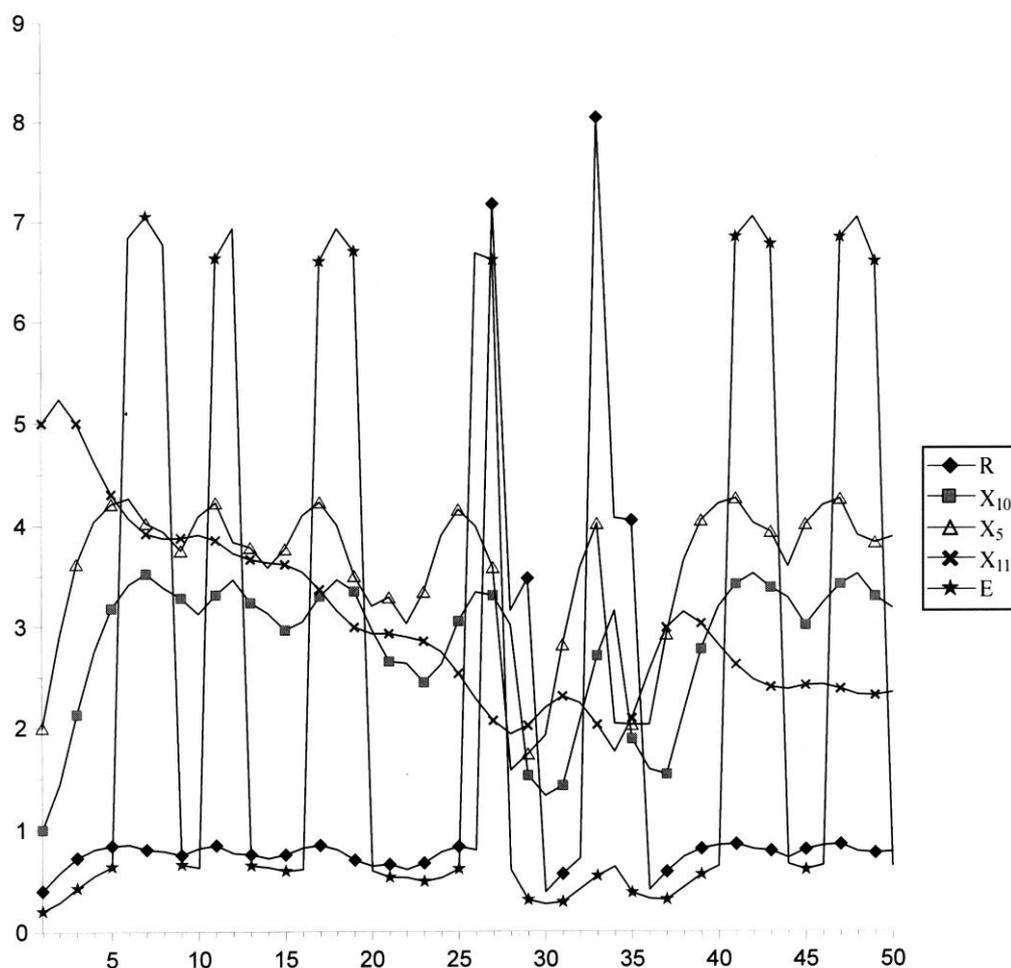


Рис. 6. Управление концентрацией биоресурса X_{11} и уровнем загрязнения X_{10} с помощью ресурсной ренты R и экологических штрафов E .

На рис.5 с приведены рассчитанные по модели возможные объемы потребления биоресурса (выпуска морепродукта). В качестве допустимой концентрации биоресурса была принята величина, равная 2.8 безразмерным единицам. Как отмечалось выше, X_5 - выпуск морепродукта стимулируется нормой прибыли, но ограничивается экологическим состоянием морской среды. Из рис. 5 с следует, что наилучшие условия для соблюдения эколого-экономического баланса в системе существуют в западной части моря.

Для того, чтобы проанализировать эффекты одновременного использования ресурсной ренты и механизма штрафных санкций за загрязнение природной среды, был проведен следующий эксперимент. Были установлены предельно допустимые уровни концентрации биоресурса $X_{11}^* = 2,1$ и загрязнений $X_{10}^* = 3,3$. и имитированы

случайные колебания спроса и сезонный ход концентрации биоресурса. Сценарии развития процессов в системе показаны на рис.6. Как следует из рисунка, баланс между интересами производства и интересами охраны природной среды заставляет периодически включать не только экологические штрафы, но и повышенную ресурсную ренту. Таким путем устанавливается коридор допустимых объемов потребления биоресурса. Концентрация биоресурса колеблется при этом возле установленного значения, а концентрация загрязнений не превосходит предельно допустимой величины.

Заключение. Для слежения за динамикой процессов в имитированном природно-хозяйственном комплексе была использована объединенная модель, которая содержала ДСМ морской среды, управляемую внешними гидрометеороло-

гическими условиями, и эколого-экономическую модель, построенную ABC методом. Как показали вычислительные эксперименты, подобные модели способны обеспечивать прогностические сценарии развития процессов в ПХК, которые, в свою очередь, позволяют контролировать экологическое состояние природной среды наряду с экономическими показателями потребления ее ресурсов.

Литература

1. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC- технологии устойчивого развития. – Севастополь, "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2000. – 225 с.
2. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Солодова С.М. Управление природными ресурсами. Имитационная технология ABC AGENT. // Препринт. Севастополь, Изд. "ЭКОСИ-Гидрофизика", 2001. – 95 с.
3. Колмогоров А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. // Изв. АН СССР. Серия матем. – 1941 - 5, С.3-13.
4. Timchenko I.E. Stochastic Modeling of Ocean Dynamics // Harwood Acad. Publ. Chur- London-Paris-New-York, 1984. - 320 p.
5. Тимченко И.Е. Системные методы в гидрофизике океана. - Киев.: Наукова думка, 1988. - 180 с.
6. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Прималенный А.А. Управление эколого-экономическими системами. Севастополь, Изд. "ЭКОСИ-Гидрофизика", 1999. – 180 с.

Анотація. І. Є. Тимченко, О. М. Ігумнова **Моделювання екогеодинаміки природничо-господарських комплексів.** Для дослідження за динамікою процесів в імітованому природно-господарчому комплексі було застосовано загальну модель, яка включала ДСМ морського середовища, із впливом зовнішніх гідрометеорологічних умов, та еколого-економічну модель, побудовану ABC методом. Запропоновані моделі здібні забезпечити прогностичні сценарії розвитку процесів у ПГК, які у свою чергу дозволяють контролювати екологічний стан природного середовища разом з економічними показниками споживання його ресурсів.

Ключові слова: природно-господарчий комплекс, моделювання.

Abstract. I. E. Timchenko, I. M. Igumnova The modeling of the ecogeodynamics of natural-economical systems. For tracking dynamics of processes in natural-economic complex (NEC) the incorporated model which contained DSM of sea environment, controlled by external hydrometeorological conditions, and the ecological-economic model constructed by a ABC-method has been used. As have shown the computing experiments similar to model are capable to provide prognostic scripts of development of processes in NEC which, in turn, allow to supervise an ecological condition of the natural environment alongside with economic parameters of consumption of its resources.

Key words: natural-economical complex, modeling.

Поступила в редакцію 21.01.2004 г.