

И.Е.Тимченко, Е.М.Игумнова

Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь

**ДИНАМИКО-СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «БЕРЕГ – МОРЕ»**

Предложен метод построения уравнений аддитивной модели эколого-экономической системы природно-хозяйственного комплекса берег – море, в котором коэффициенты влияний уравнений динамики рассчитываются по статистическим связям между переменными модели. В основу метода положены системные принципы аддитивного баланса влияний и информационного единства динамической модели сложной системы и данных наблюдений, усваиваемых в модели. Построена общая система уравнений динамико-стохастической модели, дающая возможность вычислять переменные коэффициенты влияний в реальном времени управления процессами развития. Рассмотрен пример управления ассилиационной емкостью прибрежной морской среды, находящейся под влиянием берегового стока, загрязненного производственными и бытовыми отходами. Предложена информационная технология управления потоком загрязняющих веществ в море по критериям эффективности производства и экологического состояния морской среды. Приведены сценарии эколого-экономических процессов в системе с учетом имитированного влияния на них динамических процессов в море. Сделан вывод о перспективности применения сформулированных системных принципов для создания цифровых информационных технологий устойчивого развития природно-хозяйственных систем берег – море.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *аддитивный баланс влияний, динамико-стохастические уравнения, ковариационная матрица, агенты управления, биоразнообразие, коэффициенты влияний, аддитивная модель управления, имитированная динамика морской среды*

doi: 10.22449/2413-5577-2018-3-98-106

Управление устойчивым развитием природно-хозяйственных комплексов (ПХК) «берег – море» является фундаментальной задачей, требующей системного подхода к ее решению [1 – 3]. Наряду с известными системными принципами целостности, причинности, подчиненности и др. [4, 5] важную роль в реализации системного подхода в задаче моделирования ПХК играют принцип аддитивного баланса взаимных влияний процессов развития и принцип информационного единства динамической модели этих процессов и данных наблюдений над ними [6]. Первый из этих двух принципов служит основой для построения нового класса аддитивных моделей сложных систем, предназначенных для прогноза сценариев развития процессов в ПХК. Второй обеспечивает усвоение данных наблюдений в аддитивных прогностических моделях ПХК и служит основой для создания цифровых информационных технологий управления сценариями устойчивого развития [6, 7].

Опыт применения этих принципов содержится в исследованиях, посвященных развитию динамико-стохастического подхода к моделированию сложных природно-хозяйственных систем. В частности, в монографиях [2, 6] © И.Е.Тимченко, Е.М.Игумнова, 2018

Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2018. вып.3. С.98-106.

были применены методы теории адаптивных систем управления, разработанные Колмогоровым [8] и Калманом [9], для построения динамико-стохастических моделей (ДСМ) морской среды [10]. На основе этих исследований был создан новый метод адаптивного баланса влияний (АБС-метод), позволяющий упростить задачу моделирования сложных систем за счет оценки коэффициентов моделей по данным наблюдений [7].

В настоящей работе рассмотрена задача построения ДСМ ПХК «берег – море», предназначенных для управления потреблением ассилиационного ресурса морской среды. Общая структура модели управления ресурсами ПХК была опубликована в работе [11]. Основное отличие данной работы заключается в новом статистическом методе определения коэффициентов влияний в уравнениях ДСМ: вместо применения нормированных отношений средних значений переменных предложено использовать ковариационные матрицы статистических связей между процессами.

Сохранение балансов влияний в адаптивных моделях эколого-экономических систем. Принцип адаптивного баланса влияний позволяет создавать такие дифференциальные уравнения динамических процессов, которые автоматически сохраняют материальные балансы реакций превращения веществ в эколого-экономических системах. Этому способствует принцип адаптивного баланса влияний, который постулирует существование отрицательных обратных связей первого и второго порядков между моделируемыми процессами и скоростями их изменений [7]. Рассмотрим построение подобных уравнений. Введем обозначения u_i для n моделируемых процессов и будем предполагать, что моделируемая система находится в стационарном (равновесном) состоянии, когда все переменные равны своим средним значениям: $u_i = C_i$. Система обладает устойчивостью в том смысле, что она возвращается в стационарное состояние, когда внешние влияния $A_i = 0$. Материальные балансы реакций внутрисистемных взаимодействий можно выразить следующим образом:

$$u_i - C_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} (u_j - C_j) + A_i. \quad (1)$$

В этом выражении a_{ij} – коэффициенты влияний, которые устанавливают степени влияния переменных u_j (ресурсов) на продукты реакций u_i .

Запишем уравнения эколого-экономической системы в общем виде:

$$\frac{du_i}{dt} = r_i [C_i - F_i(u_i, u_j, A_i)], \quad (2)$$

где $F_i(u_i, u_j, A_i)$ – функционалы влияний, r_i – параметры, которые имеют смысл удельных скоростей изменения функций u_i . Структура уравнений (2) позволяет поставить условия, при которых решения уравнений будут автоматически сохранять материальные балансы (1):

$$F_i(u_i, u_j, A_i) = C_i = u_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} (u_j - C_j) - A_i. \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получим систему уравнений метода адаптивного баланса влияний [7] с отрицательными обратными связями первого порядка,

поскольку переменные u_i входят в правые части в первой степени:

$$\frac{du_i}{dt} = r_i \left\{ C_i - \left[u_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} (u_j - C_j) - A_i \right] \right\}. \quad (4)$$

Как показали исследования [2, 7], можно существенно повысить устойчивость решений и чувствительность адаптивных моделей к управляющим воздействиям A_i , если перейти к уравнениям адаптивных моделей второго порядка. В работе [7] была предложена новая структура уравнений (2):

$$\frac{du_i}{dt} = r_i [u_i F_i^- - u_i F_i^+], \quad (5)$$

в которой F_i^+ – монотонно растущий, а F_i^- – монотонно убывающий, функционалы влияний. Функционалы контролируют положительные и отрицательные влияния, поскольку они управляют ростом и стремлением к нулю переменных u_i . В [7] было предложено также связать функционалы F_i^- и F_i^+ между собой дополнительными условиями:

$$F_i^- + F_i^+ = 2C_i. \quad (6)$$

Эти условия обеспечивают согласованное управление источниками и стоками в уравнениях системы (5), благодаря чему модель эколого-экономической системы приобретает адаптивное свойство автоматического сохранения балансов влияний. Так, например, если переменная u_i находится под воздействием m положительных и $n - m$ отрицательных влияний, выражение для функционалов F_i^+ принимает вид:

$$F_i^+ = u_i - \sum_{k=1, k \neq i}^m a_{ik} (u_k - C_k) + \sum_{l=1, l \neq i}^{n-m} a_{il} (u_l - C_l) - A_i. \quad (7)$$

Подставляя выражение (7) в систему уравнений (5) с учетом условий (6), получим уравнения адаптивной модели эколого-экономической системы с отрицательными обратными связями 2-го порядка, поскольку скорости изменения переменных теперь зависят от квадратов этих переменных:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \sum_{k=1, k \neq i}^m a_{ik} (u_k - C_k) + \sum_{l=m+1, l \neq i}^{n-m} a_{il} (u_l - C_l) - A_i \right] \right\}, \quad (8)$$

$$(i, l = 1, 2, \dots, n).$$

Конечно-разностное представление этой системы уравнений при дополнительном условии $2\Delta t r_i C_i = 1$, которое всегда можно удовлетворить выбором шага интегрирования по времени Δt , принимает вид:

$$u_i^{k+1} = 2u_i^k \left\{ 1 - \frac{1}{2C_i} \left[u_i^k - \sum_{p=1, p \neq i}^m a_{ip} (u_p^k - C_p) + \sum_{l=m+1, l \neq i}^{n-m} a_{il} (u_l^k - C_l) - A_i^k \right] \right\}. \quad (9)$$

Построение динамико-стохастических уравнений эколого-экономических систем. В силу множественных влияний на процессы в эколого-экономических системах отклонения сценариев процессов от их средних значений могут рассматриваться как случайные функции, а уравнения моделей как динамико-стохастические [1, 10]. Так, например, рассматриваемые системы «берег – море» находятся под влиянием случайных изменений спроса на продукцию береговой системы и ее себестоимости, а биоресурсы

и ассилияционная емкость прибрежной зоны моря подвержены случайным изменениям концентраций веществ, которые обусловлены динамикой морской среды. В подобных моделях возможна адаптация прогнозируемых сценариев процессов к данным наблюдений путем нахождения оптимальных поправок к модельным прогнозам. Для этого должны быть использованы корреляционные связи временных рядов отклонений.

Разработаны методы построения прогностических уравнений для коэффициентов влияний [2, 7, 10], использующие идеи Колмогорова [8] и Калмана [9]. В данной работе мы рассмотрим более простой статистический метод получения оценок коэффициентов влияний, основанный на анализе ковариационных функций наблюдаемых отклонений эколого-экономических процессов.

Балансовые соотношения в форме (3) связывают между собой случайные отклонения $u'_i = u_i - C_i$ переменных модели следующим образом:

$$u'_i = \sum_{k=1, k \neq i}^m a'_{ik} u'_k - \sum_{l=m+1, l \neq i}^{n-m} a'_{il} u'_l + A_i. \quad (10)$$

Введем в рассмотрение ковариационную матрицу отклонений $G_{ij} = E\{u'_i u'_j\}$ и приведем ресурсные функции к интервалам изменчивости и размерности продуктов эколого-экономической системы ($-C_i \leq u'_i \leq C_i$). Для этого преобразуем коэффициенты влияний в выражениях (8) следующим образом:

$$u'_i = \sum_{k=1, k \neq i}^m a'_{ik} C_i C_k^{-1} u'_k - \sum_{l=m+1, l \neq i}^{n-m} a'_{il} C_i C_l^{-1} u'_l + A_i, \quad (11)$$

где a'_{ij} – безразмерные множители, которые подлежат определению.

Примем, что внешние влияния не зависят от внутрисистемных процессов и они не коррелированы с u'_k и u'_l . Умножая справа уравнения (11) по-очередно на u'_k и u'_l , выполняя осреднение полученных выражений и используя обозначения для элементов ковариационной матрицы G_{ij} , получим систему алгебраических уравнений относительно множителей a'_{ik} и a'_{il} :

$$\begin{aligned} G_{ik} &= \sum_{k=1, k \neq i}^m a'_{ik} C_i C_k^{-1} G_{kk} - \sum_{l=m+1, l \neq i}^{n-m} a'_{il} C_i C_l^{-1} G_{lk}, \\ G_{il} &= \sum_{k=1, k \neq i}^m a'_{ik} C_i C_k^{-1} G_{kl} - \sum_{l=m+1, l \neq i}^{n-m} a'_{il} C_i C_l^{-1} G_{ll}. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, уравнения адаптивной ДСМ эколого-экономической системы принимают следующий общий вид:

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \sum_{k=1, k \neq i}^m a'_{ik} C_i C_k^{-1} u'_k + \sum_{l=m+1, l \neq i}^{n-m} a'_{il} C_i C_l^{-1} u'_l - A_i \right] \right\}, \quad (13)$$

$$(i, l = 1, 2, \dots, n).$$

где безразмерные множители a'_{ik} и a'_{il} находятся из уравнений (12). Систему уравнений дополняют логические ограничения, которые удерживают переменные в пределах их заданной изменчивости:

$$u_i = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)]. \quad (14)$$

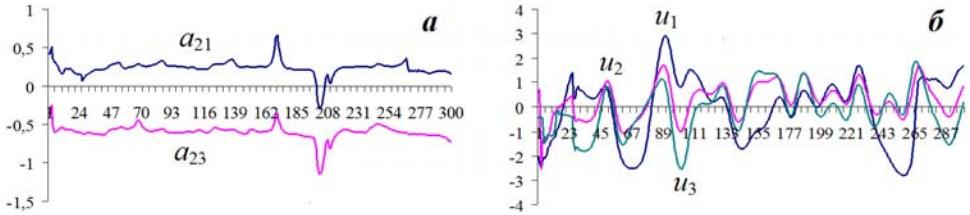


Рис. 1. Коэффициенты влияний (а), рассчитанные по ковариационной матрице временных рядов трех взаимосвязанных процессов (б).

Рассмотрим пример нахождения коэффициентов влияний на основе ковариационной матрицы, связывающей между собой значения трех процессов: u_1 , u_2 , u_3 . Пусть балансовое соотношение имеет вид: $u_2 = a_{21}u_1 - a_{23}u_3$. Тогда из системы уравнений (12) несложно найти коэффициенты влияний:

$$a_{21} = a'_{21} \frac{C_2}{C_1} = (G_{21}G_{33} - G_{23}G_{31})(G_{11}G_{33} - G_{13}G_{31})^{-1},$$

$$a_{23} = a'_{23} \frac{C_2}{C_3} = (G_{13}G_{21} - G_{11}G_{23})(G_{33}G_{11} - G_{31}G_{13})^{-1}. \quad (15)$$

Для проверки этого метода были имитированы временные ряды наблюдений, полученных их трех случайных функций u'_1 , u'_2 и u'_3 (рис.1, б), и проведен расчет коэффициентов при скользящем осреднении элементов ковариационной матрицы по 25 значениям этих рядов (рис.1, а).

Динамико-стохастическая модель управления ассимиляционной емкостью прибрежной зоны моря. Построим систему уравнений (12) – (14) для адаптивной ДСМ управления балансом скоростей накопления и деструкции (ассимиляции) загрязнений, поступающих с береговым стоком. Причинно-следственные связи модели управления приведены на рис.2.

В экономической части модели (берег) учитывались: спрос на продукцию D и объемы производства V , которые определяли скорость потребления ассимиляционного ресурса, цена продукции P и ее себестоимость E . В экологической части (море) учитывались: концентрация загрязняющих веществ PL , поступающих в море в качестве отходов производства, штрафные санкции TX , налагаемые на производство за загрязнение морской среды, и дефицит ее ассимиляционной емкости S . Предполагалось, что накопление санкций в специальном фонде TX_{acc} позволяет осуществить очистку берегового стока от загрязнений, когда величина фонда достигнет размера TX_{acc}^* . В этом случае восстанавливается баланс скоростей потребления и воспроизведения ассимиляционного ресурса морской среды.

Для построения уравнений эколого-экономической системы выпишем функционалы влияний $F_i(u_i, u_j, A_i)$ в правых частях уравнений модели в форме (13) в соответствии с рис.1:

$$F_D = a'_{D/P} C_D C_P^{-1} P' + DM^*; \quad (16)$$

$$F_V = -AG_V(P, E) - AG_V(S, S^*) + C_V C_D^{-1} a'_{V/D} D',$$

$$AG_V(P, E) = IF\{P > E; 0; V_E^*[1 - \exp(-b_V \tau)]\},$$

$$AG_{V/S}(S, S^*) = IF\{S < S^*; 0; V_S^*[1 - \exp(-b_S \tau)]\};$$

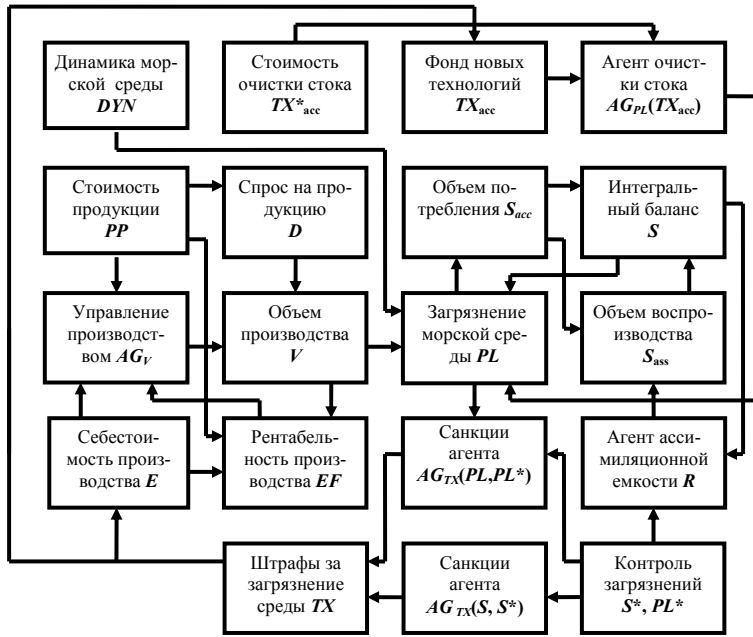


Рис. 2. Структура динамико-стохастической модели управления загрязнением морской среды в природно-хозяйственном комплексе «берег – море».

$$\begin{aligned}
F_{PL} &= a'_{PL/V} C_{PL} C_V^{-1} V'_V + AG_{PL/S}(S, S^*) - AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*) + a_{PL/DYN} DYN, \\
AG_{PL/TX_{acc}}(TX_{acc}, TX_{acc}^*) &= a_{PL/TX_{acc}} IF\{TX_{acc} < TX_{acc}^*; 0; PL[1 - \exp(-b_{PL_{TX}} \tau)]\}, \\
F_{TX} &= a'_{TX/PL} C_{TX} C_{PL}^{-1} PL' + AG_{TX/PL}(PL, PL^*) + AG_{TX/S}(S, S^*) + TX^*, \\
AG_{TX/PL^*}(PL, PL^*) &= IF\{PL < PL^*; 0; a_{TX/PL^*}(PL - PL^*)[1 - \exp(-b_{TX/PL^*} \tau)]\}, \\
AG_{TX/S}(S, S^*) &= IF\{S < S^*; 0; a_{TX/S}(S^* - S)[1 - \exp(-b_{TX/SD} \tau)]\}, \\
F_E &= a'_{E/TX} C_E C_{TX}^{-1} TX' + E^*.
\end{aligned}$$

Аsterисками отмечены установочные параметры модели, штрихами – отклонения переменных от своих средних значений, а также безразмерные множители, которые определялись из уравнений стохастической части модели (12) с использованием соответствующих ковариационных матриц $G_j = E\{u_i' u_j'\}$. Интегральный баланс скоростей потребления $S_{acc}(t)$ и воспроизводства $S_{acc}(t)$ ассимиляционного ресурса за период времени $(0, t)$ был представлен формулой дефицита ассимиляционной емкости морской среды:

$$S(t) = S_{acc}(t) - S_{ass}(t) = a_{S/V} \int_0^t [(1 - R(\tau)] V(\tau) d\tau , \quad (17)$$

в которой агент $R(t)$ контролировал баланс скоростей потребления и воспроизводства ассимиляционного ресурса:

$$R(t) = IF\{S < S^*; 1; IF[TX_{acc} < TX_{acc}^*; \exp(-\alpha_R \tau)]; R(t) + [1 - R(t)][1 - \exp(-\beta_p \tau)]\} \}. \quad (18)$$

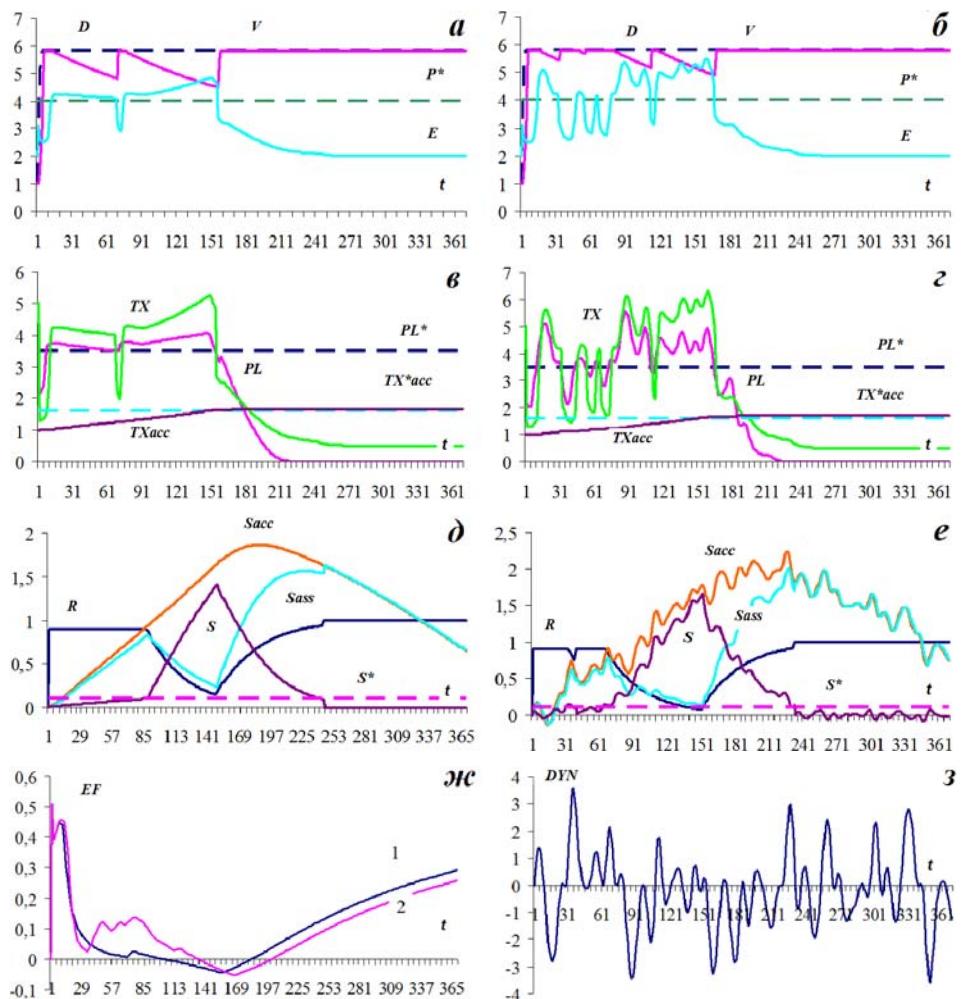
Когда скорости накопления и асимиляции загрязнений совпадали по величине, выполнялись условия: $S(t) = 0, R(t) = 1$. Если же скорость воспроизведения экосистемой асимиляционного ресурса начинала отставать от скорости его потребления, то функция $R(t)$ экспоненциально убывала, учитывая дефицит концентрации этого ресурса в морской среде. При условии $TX_{acc} > TX^*_{acc}$ включалась очистка берегового стока от загрязнений, и функция $R(t)$ экспоненциально стремилась к единице. Допустимое значение дефицита асимиляционной емкости S^* было связано с предельно допустимой концентрацией загрязнений в береговом стоке PL^* .

Вычислительные эксперименты с моделью. Численная реализация ДСМ-модели (12) – (18) была выполнена в соответствии со стандартным уравнением АВС-метода в форме (9). Безразмерные сценарии эколого-экономических процессов были построены в двух вариантах: без учета и с учетом влияния динамики морской среды (случайной функции DYN) на концентрацию загрязнений в море и, как следствие, на интегральный баланс скоростей потребления и воспроизведения асимиляционного ресурса $S(t)$. Результаты вычислений суммированы на рис.3.

Поясним сценарии процессов без учета динамики моря, приведенные на рис.3, *a, в, д*. При постоянном спросе D на продукцию экономической системы агент $AG_1(P, E)$ ограничивал ее выпуск V , когда себестоимость производства E становилась выше рыночной цены P . Причиной роста себестоимости служили штрафы TX за превышение уровнем загрязнения стока PL предельно допустимого значения PL^* . В начале эксперимента значение агента асимиляционной емкости было задано $R(t) = 0,9$, и скорость асимиляции загрязнений отставала от скорости их накопления. На 90-м шаге вычислений дефицит асимиляционной емкости морской среды вырос до значения $S^* = 0,1$, и агент R резко ограничил скорость асимиляции загрязнений, в то время как их накопление продолжалось с прежней скоростью. Штрафы TX увеличились, и на 154-м шаге было достигнуто условие начала очистки стока от загрязнений $TX_{acc} > TX^*_{acc}$. После этого, по мере падения концентрации PL уменьшался дефицит асимиляционного ресурса $S(t)$, и на 225-м шаге было восстановлено условие $S(t) = 0, R(t) = 1$, при котором концентрация загрязнений в сточных водах исчезла, а концентрация накопленных загрязнений $S_{acc}(t)$ в морской среде устремилась к нулю.

Для оценки экономической эффективности EF системы «берег» был использован логарифм отношения накопленных доходов к накопленным расходам за период времени $(0; t)$ (графики функции EF на рис.3, *ж*).

Динамика моря была имитирована случайной функцией DYN (рис.3, *з*), у которой среднеквадратичное отклонение от среднего значения функции PL составило 1,32 (26 %). С учетом динамики моря сценарии эколого-экономических процессов претерпели заметные изменения, которые отображены на рис.3, *б, г, е, ж* (кривая 2). Колебания уровня загрязнения стока и, как следствие, изменение интегрального баланса загрязнений $S(t)$ привели к заметным вариациям штрафных санкций TX и себестоимости E . Поэтому функция дефицита асимиляционного ресурса $S(t)$ на рис.3, *е* превысила допустимое значение S^* уже на 61-м шаге вычислений, когда агент R начал ограничивать скорость асимиляции загрязнений. Рост дефицита функции $S(t)$ продолжался до момента включения режима очистки стока.



Р и с . 3 . Сценарии эколого-экономических процессов в ДСМ-модели берег – море без учета динамики (a, в, д, ж (кривая 1)) и с ее учетом (б, г, е, ж (кривая 2)).

Заключение. Предложенный метод построения адаптивных динамико-стохастических моделей эколого-экономических систем может служить основой для создания цифровых информационных технологий управления природопользованием в прибрежной зоне моря. Применение агентов управления балансом потребления и воспроизводства морских ресурсов позволяет осуществлять контроль экологического состояния морской среды и находить согласованные режимы функционирования береговой экономической системы и экосистемы прибрежной морской среды.

Работа выполнена по проекту 18-47-920001 в рамках фундаментальных научных исследований, поддержанных РФФИ и г. Севастополь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е. Системные методы в гидрофизике океана.– Киев: Наукова думка, 1988.– 180 с.

2. *Ivanov, V.A., Igumnova E.M., Timchenko I.E.* Coastal zone resources management.– Kiev: Academperiodica, 2012.– 304 p.
3. *Саркисян А.С.* Об основных направлениях моделирования физических характеристик Мирового океана и морей // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2015.– т.52, № 4.– С.381-387.
4. *von Bertalanffy L.* Perspectives on general system theory: scientific philosophical studies.– New York: G. Braziller, 1975.– 183 p.
5. *Мусеев Н.Н.* Математические задачи системного анализа.– М.: Наука, 1981.– 487 с.
6. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М.* Моделирование процессов устойчивого развития территорий.– Симферополь.: Изд. ТНУ, 2005.– 132 с.
7. *Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И.* Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития.– Севастополь: МГИ НАН Украины, 2000.– 225 с.
8. *Колмогоров А.Н.* Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. // Изв. АН СССР. Серия матем.– 1941.– 5.– С.3-13.
9. *Kalman R.E.* A New approach to linear filtering and prediction problems // J. Basic Engen., Trans. of ASME.– 1960.– March.– P.35-45.
10. *Timchenko I.E.* Stochastic modeling of ocean dynamics.– New York: Harwood Acad. Publ., 1984.– 311 p.
11. *Игумнова Е.М., Тимченко И.Е.* Управление потреблением возобновляемых ресурсов прибрежной зоны моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря.– 2018.– вып.1.– С.13-21.

Материал поступил в редакцию 17.07.2018 г.

I.E.Timchenko, E.M.Igumnova

DYNAMIC-STOCHASTIC MODEL OF ECO-ECONOMIC SYSTEM «COAST – SEA»

A method of constructing the equations of the adaptive model of ecological- economic system for the natural-economic “coast-sea” object is proposed, in which the coefficients of influence in the dynamics equations are calculated by statistical relationships between the variables of the model. The method is based on the system principles of adaptive balance of causes and information unity of the dynamic model of a complex system and observational data assimilated in the model. The general system of equations of the dynamic-stochastic model, which gives the possibility to calculate the variable coefficients of the effects in real time of the control process development. The example of the assimilation capacity management in the coastal marine environment under the influence of coastal runoff contaminated with industrial and household wastes is constructed. The information technology of management of a stream of polluting substances in the sea by criteria of efficiency of production and an ecological condition of a marine environment is offered. The management is based on the use of logical agents that impose economic sanctions on production for marine pollution and control the marine assimilative capacity index. The scenarios of ecological and economic processes in the system are given taking into account the simulated influence of dynamic processes in the sea on them. The conclusion is made about the prospects of the application of the formulated system principles for the creation of digital information technologies for sustainable development of natural and economic systems of the coast-sea.

KEYWORDS: adaptive balance of causes, dynamic-stochastic equations, covariance matrix, control agents, adaptive control model, dynamics of the marine environment