

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ИНФОРМАЦИИ О
ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЯХ
МЕЖДУ ПРОЦЕССАМИ
РАЗВИТИЯ В МОДЕЛЯХ
ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ
ЭКОНОМИКИ**

Е.М. Изумнова, А.В. Набойкина,
И.Е. Тимченко, И.И. Тимченко***

Морской гидрофизический институт
НАН Украины,

г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

* Харьковский национальный экономический университет, г. Харьков

** Харьковский национальный политехнический университет – ХПИ, г. Харьков

Предложен способ определения коэффициентов уравнений в моделях экологической экономики, построенных методом адаптивного баланса влияний. Способ основан на оценке функциональных связей между процессами по данным наблюдений. На примере модели агрегированной эколого-экономической системы показана эффективность его использования.

В соответствии с системной методологией [1, 2] задача управления развитием природно-хозяйственных комплексов решается путем правильного выбора сценариев развития, из числа возможных сценариев, прогнозируемых моделью эколого-экономической системы этого комплекса [3, 4]. Перспективным методом построения прогностических моделей подобных систем является метод адаптивного баланса влияний (ABC-метод) [1]. Система динамических уравнений ABC-метода содержит n взаимосвязанных процессов развития x_i и управляющих функций f_i и имеет следующий общий вид

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left[1 - 2 \left(x_i - \sum_{j=1}^{n-1} a_{ij} x_j - f_i \right) \right],$$

$(i, j = 1, 2, \dots, n), (i \neq j). \quad (1)$

Для определения коэффициентов взаимных влияний процессов a_{ij} может быть применен один из экспертных методов []. Речь идет о сравнительной оценке степени влияния одних процессов на другие, для которой эксперты, обладающие необходимым опытом, могут высказать свои суждения. Однако, при этом возможны ошибочные оценки, связанные с субъективными мнениями экспертов.

Использование функциональных связей, устанавливаемых путем наблюдений, дает объективный способ определения коэффициентов. Коэффициенты влияния в уравнениях ABC-метода являются следствием принятого в этом методе допущения о линейной зависимости каждого из моделируемых процессов развития друг относительно друга. Метод адаптивного баланса влияний позволяет снять это допущение и рассматривать общий случай произвольных (нелинейных) функциональных связей между процессами.

Обозначим функциональную зависимость процесса x_i от процесса x_j как $x_i = x_i(x_j)$. Влияние процесса x_j на процесс x_i тем сильнее, чем больше значение x_j и выше мгновенная скорость изменения функции $x_i = x_i(x_j)$

$$x_i = \frac{\partial x_i}{\partial x_j} x_j.$$

В частности, когда существует линейная функциональная связь $x_i = a_{ij} x_j + b_i$, выражение (1) принимает вид $x_i = a_{ij} x_j$, который и был использован ранее, например, в различных моделях, построенных ABC-методом [1 – 7].

При произвольных функциональных связях между моделируемыми процессами система уравнений ABC-метода имеет следующий наиболее общий вид

$$\frac{dx_i}{dt} = x_i \left[1 - 2 \left(x_i - \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \frac{\partial x_i}{\partial x_j} x_j - f_i \right) \right], \quad (2)$$

где f_i – функции внешних влияний на систему. Уравнения ABC-метода в форме (2) удобно использовать, когда функциональные связи между процессами могут

быть получены по данным наблюдений (например, путем регрессионного анализа). Отказ от линейного приближения функциональных связей теоретически должен привести к более точным прогнозам сценариев развития. Поэтому представляет интерес практическая проверка этого положения.

Рассмотрим систему из трех взаимосвязанных процессов развития, для которых путем предварительной экспертизы установлены следующие функциональные зависимости

$$\begin{aligned} x_1 &= 100 \cos(0,1x_2), \\ x_1 &= 100 \sin(0,1x_3), \\ x_2 &= 100 \cos(0,2x_1), \quad (3) \\ x_2 &= 100 \sin(0,2x_3), \\ x_3 &= 100 \sin(0,3x_1), \\ x_3 &= 100 \cos(0,3x_2). \end{aligned}$$

Объединим эти процессы в систему, используя уравнения (2) для учета взаимных влияний между ними (см. рис. 1).

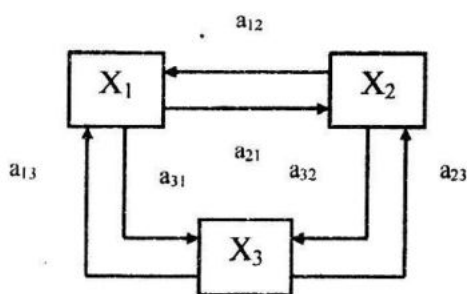


Рис. 1. Система из трех взаимосвязанных процессов

В качестве внешнего влияния будем использовать только одну функцию f_1 , для которой выберем следующее представление

$$f_1(t) = 10 \sin[0,6t - \cos(0,9t)].$$

Будем считать, что значения всех процессов x_i принадлежат интервалу чисел $(0, 100)$, а интервал времени t содержит 300 безразмерных шагов по $0,1$. Тогда графики функций (3) представляют кривые, изображенные на

рис. 2, а, а их производные – на рис. 2, б.

Как следует из этих рисунков, большинство из использованных функциональных связей значительно отличается от линейных зависимостей.

ABC-модель системы, изображенной на рис. 1, содержит следующие уравнения

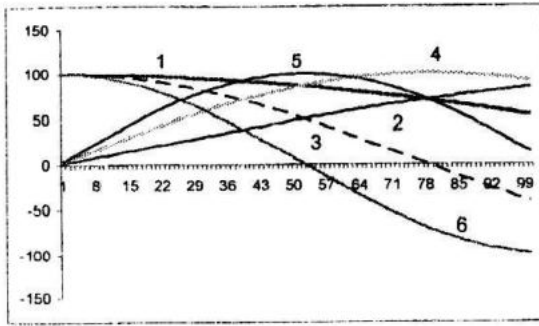
$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_1 \{1 - 2[x_1 + \gamma \sin(0,01x_2)x_2 - \\ &\gamma \cos(0,01x_3)x_3 - 10 \sin[0,6t - \cos(0,9t)]]\} \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_2 \{1 - 2[x_2 + 2\gamma \sin(0,02x_1)x_1 - \\ &2\gamma \cos(0,02x_3)x_3]\} \\ \frac{dx_3}{dt} &= x_3 \{1 - 2[x_3 - 3\gamma \cos(0,03x_1)x_1 + \\ &3\gamma \sin(0,03x_2)x_2]\} \end{aligned} \quad (4)$$

Параметр γ введен в уравнения модели (4) для того, чтобы регулировать степень чувствительности модели к уровню взаимных влияний между процессами.

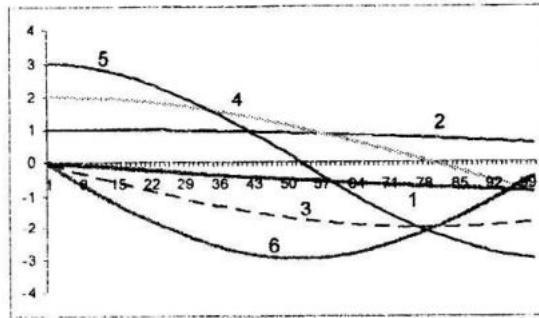
С моделью (4) было проведено два вычислительных эксперимента. В первом эксперименте нелинейные связи между процессами (3) были аппроксимированы линейными зависимостями $x_i = a_{ij}x_j$, чтобы имитировать случай использования в уравнениях ABC-модели постоянных коэффициентов влияний a_{ij} . Для этого всем аргументам тригонометрических функций в уравнениях (4) были даны постоянные значения $x_i = 50$. Сценарии процессов, полученные при этом, показаны на рис. 2, в.

Как и следовало ожидать, наибольшее подобие наблюдается между графиком внешнего воздействия (кривая 4) и сценарием процесса x_1 (кривая 1), к которому приложено это воздействие.

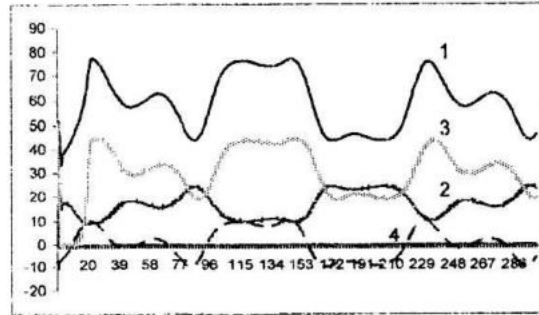
Во втором вычислительном эксперименте были использованы нелинейные функциональные связи, которые в соответствии с уравнениями (4) вводят переменные коэффициенты влияний. Графики полученных коэффициентов влияний приведены на рис. 3, а.



а



б



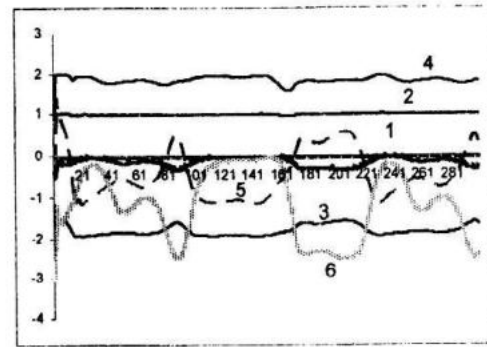
в

Рис. 2. а) Функциональные связи между моделируемыми процессами: 1 – $x_1 = x_1(x_2)$, 2 – $x_1 = x_1(x_3)$, 3 – $x_2 = x_2(x_1)$, 4 – $x_2 = x_2(x_3)$, 5 – $x_3 = x_3(x_1)$, 6 – $x_3 = x_3(x_2)$.

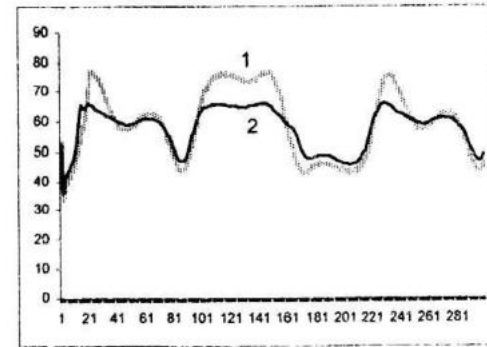
б). Производные соответствующих функций.

в) Сценарии процессов при постоянных коэффициентах влияний 1 – $x_1(t)$, 2 – $x_2(t)$, 3 – $x_3(t)$, 4 – $f_1(t)$

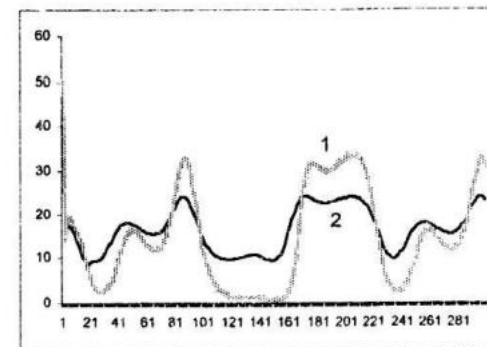
Функция внешнего влияния $f_1(t)$, включенная в правую часть первого из уравнений (4), имела доминирующее воздействие на процесс x_1 , поскольку влияние на него процесса x_2 оказалось незначительным (см. кривую коэффициента a_{12}), а влияние процесса x_3 происходило с практически



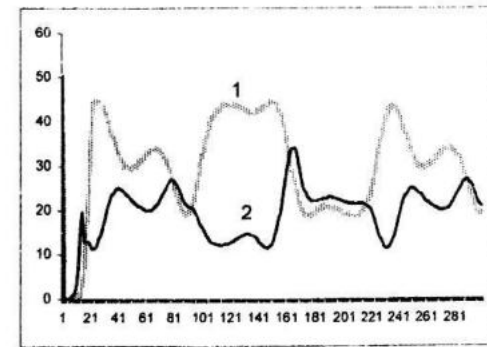
а



б



в



г

Рис. 3. Временные сценарии, рассчитанные по модели. а) – переменные коэффициенты влияний: 1 – a_{12} , 2 – a_{13} , 3 – a_{21} , 4 – a_{23} , 5 – a_{31} , 6 – a_{32} . б), в), г) – процессы при постоянных (кривые 1) и переменных (кривые 2) коэффициентах влияний: б) – $x_1(t)$, в) – $x_2(t)$, г) – $x_3(t)$

постоянным коэффициентом a_{13} . Слабые вариации около постоянных значений совершали коэффициенты второго уравнения a_{21} и a_{23} . Коэффициенты влияния третьего из уравнений a_{31} и a_{32} , как соответствующие им производные (см. кривые 5 и 6 на рис. 2, б), имели наибольшую временную изменчивость.

Переменные коэффициенты влияния значительно изменили ход сценариев моделируемых процессов по сравнению с первым экспериментом, выполненным при постоянных коэффициентах. Сценарий процесса x_1 оказался ограниченным сверху, а сценарий процесса x_2 – и сверху, и снизу. Но наиболее радикальные изменения связаны со сценарием процесса x_3 , который существенно отличается от сценария, полученного в первом эксперименте.

Поэтому параметр γ может быть назван «параметром чувствительности» к использованию переменных коэффициентов при функциях влияния в ABC-модели. (см. кривые 5 и 6 на рис. 2.5.1, б), имели наибольшую временную изменчивость.

Переменные коэффициенты влияния значительно изменили ход сценариев моделируемых процессов по сравнению с первым экспериментом, выполненным при постоянных коэффициентах. Сценарий процесса x_1 оказался ограниченным сверху, а сценарий x_3 – снизу.

Из сравнения результатов экспериментов следует вывод о необходимости учитывать нелинейные функциональные связи между процессами при построении ABC-моделей. В проведенных нами экспериментах вычислительная неустойчивость проявлялась при увеличении параметра γ выше некоторого порогового значения (при $\gamma = 0,5$). По мере приближения величины параметра к пороговому значению возрастала чувствительность моделируемых сценариев к влияющим на них факторам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. – 224 с.
2. Тимченко И.И., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2004. – 527 с.
3. Еремеев В.Н., Игумнова Е.М., Тимченко И.Е. Моделирование эколого-экономических систем. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2004. – 320 с.
4. Иванов В.А., Игумнова Е.М., Латунов В.С., Тимченко И.Е. Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ – Гидрофизика», 2007. – 258 с.
5. Игумнова Е.М., Набойкина А.В., Тимченко И.Е., Тимченко И.И. Системное моделирование социальных эколого-экономических процессов. // Системы контроля окружающей среды / Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. – Севастополь, 2008. – С. 194 – 197.
6. Игумнова Е.М., Набойкина А.В., Тимченко И.Е., Тимченко И.И. Прогнозирование сценариев социально-экономического развития. // Системы контроля окружающей среды / Сб. науч. тр. МГИ НАНУ. – Севастополь, 2009. – С. 162 – 165.
7. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Набойкина А.В. Системное моделирование процессов природопользования в прибрежной зоне. Сб. тезисов докладов «Ломоносовские чтения 2009 года». ЧФ МГУ им. М.В. Ломоносова. Севастополь. – 2009.