

# СИСТЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОЦИАЛЬНЫХ ЭКОЛОГО- ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Е.М. Игумнова, А.В. Набойкина\*,  
И.Е. Тимченко, И.И. Тимченко\*\*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины, г. Севастополь,  
ул. Капитанская, 2.

\* Харьковский национальный экономический  
университет, Харьков

\*\* Харьковский национальный политехнический  
университет – ХПИ, Харьков

Рассмотрена системная методология управления процессами развития в социальных эколого-экономических системах, основанная на предложенном авторами методе аддативного баланса влияний (ABC-методе) [1, 2]. Приведены примеры, иллюстрирующие его использование: обучение школьников навыкам системного мышления и оптимизация эколого-экономической модели сельскохозяйственного производства.

**Системная методология управления.** Системная методология управления базируется на шести принципах и предназначена для построения компьютерных моделей поддержки административных решений, которые принимаются при движении к поставленной цели [1, 2]. Системный подход предполагает создание моделей окружающей среды для прогнозирования ее влияния на принятие решений, ведущих к достижению цели. Построение системы окружающей среды наряду с обоснованием структуры обратных связей внутри управляемой системы является задачей системного мышления. Таким образом, системная методология организует такое движение к поставленной цели, при котором последовательно применяются системные принципы, системное мышление и построенные на их основе технологии системного управления. Структура системной методологии показана на рисунке 1.

На первом этапе системные принципы (они изображены на рисунке 1 справа) учитывают, что формулировка цели всегда основана на неполной информации об имеющихся ресурсах и о возможных путях ее достижения. Поэтому необходимо постоянное уточнение цели в процессе движения к ней по мере получения новой информации. Принципы целостности, причинности и подчиненности формируют второй этап системной методологии, который заключается в отборе наиболее важных с точки зрения по-

ставленных целей процессов развития, анализа взаимосвязей между ними и построении концептуальной модели системы – диаграммы причинно-следственных связей. Принцип динамического баланса обеспечивает третий этап системной методологии: перевод концептуальной модели в модель динамическую и ввод ее в компьютер для получения прогностических сценариев развития. Последний четвертый этап обеспечивает включение в компьютерную модель системы данных текущих наблюдений над процессами развития. Усвоение данных, как правило, предполагает применение стохастических алгоритмов обработки наблюдений, которые превращают модель системы в динамико-стохастическую модель [3]. Перечисленные этапы построения информационной технологии движения к цели применяются как к модели управляемой системы, так и к модели окружающей среды.



Рисунок 1 – Структура системной методологии поддержки принимаемых решений

Системный принцип аддативного баланса влияний [1] постулирует существование динамического равновесия в системе, которое обеспечено балансом положительных и отрицательных обратных связей. Применяя этот принцип, можно построить универсальную ABC-модель системы *n* взаимосвязанных процессов развития  $x_i = a_{ij}x_j$ , которая имеет следующий вид

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

Введем в рассмотрение коэффициенты взаимной корреляции процессов развития  $R_{kl} = E\{x_k x_l\}$ . Тогда, опираясь на архивные данные наблюдений над этими процессами, можно построить систему уравнений для определения коэффициентов влияния  $a_{ij}$

$$a_{ij} = R_{jj}^{-1} \left( R_{ij} - \sum_{k=1}^n a_{i,k} R_{k,j} \right), (k \neq i) \quad (2)$$

Эти уравнения совпадают по форме с известными уравнениями оптимальной интерполяции стационарных случайных функций, полученными А.Н. Колмогоровым [4]. В соответствии с ними коэффициенты влияний в уравнениях *ABC*-модели (1) подстраиваются под схему корреляционных связей, заданную выбором точек расположения измерений.

Эта же система уравнений может быть применена при усвоении данных наблюдений на этапе управления движением к цели. Прогностические сценарии развития, получаемые из модели (1), сравниваются с наблюдениями, которые поступают на моменты времени прогнозов, и образующиеся при этом отклонения (ошибки прогнозов) могут быть использованы для уточнения самих прогнозов. Таким путем реализуется динамико-стохастическая *ABC*-модель системы [2, 3].

**Модель развития навыков системного мышления в средней школе.** Рассмотрим упрощенную модель школьной системы образования, предназначенную для этой цели. В состав этой системы отобраны процессы, которые участвуют в развитии у школьников навыков системного мышления. Они обозначены символами  $x_1 - x_5$  на рисунке 2.



Рисунок 2 – Концептуальная модель школьного образования, развивающего навыки системного мышления.

Уровень системного мышления школьников зависит от качества преподавания этого предмета и интенсивности обучения. По мере развития навыков происходит осознание школьниками полезности этого предмета для повседневной жизни и в перспективе для приобретения специальности, полезной для общества. Растет интерес школьников к изучению этого предмета и интенсивность занятий, повышающая уровень системного мышления. Таким путем замыкается одна из цепей положительной обратной связи в модели школьного образования.

С ростом интереса школьников повышается удовлетворенность преподавателей результатами их труда. Это стимулирует повышение качества преподавания, приводит к уменьшению интеллектуальной нагрузки на школьников и способствует дальнейшему осознанию школьниками полезности этого предмета. Таким путем замыкается вторая цепь положительной обратной связи.

Для стабилизации системы должна существовать как минимум одна цепь отрицательной обратной связи, охватывающей процесс интереса школьников к предмету, который не может расти неограниченно. Такая цепь легко усматривается в модели, если связать интенсивность занятий с ростом интеллектуальной нагрузки школьников. С ее ростом интерес к изучению предмета ослабевает, а вместе с ним уменьшаются удовлетворенность преподавателей, качество преподавания и интенсивность обучения.

Применим *ABC*-метод системного моделирования для построения динамической модели школьного образования. Используя стандартное уравнение метода (1) и рисунок 2, получим следующую систему уравнений модели

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_1 [1 - 2(x_1 - a_{12}x_2(t - \tau_2) - a_{13}x_3(t - \tau_3))] ; \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_2 [1 - 2(x_2 - a_{26}x_6 - a_{2/21}x_{21})] ; \\ \frac{dx_3}{dt} &= x_3 [1 - 2(x_3 - a_{34}x_4 - a_{3/21}x_{21} + A_3(x_5))] ; \\ \frac{dx_4}{dt} &= x_4 [1 - 2(x_4 - a_{4/10}x_{10} + A_4(x_5))] ; \\ \frac{dx_5}{dt} &= x_5 [1 - 2(x_5 - a_{52}x_2 - a_{53}x_3)] ; \\ \frac{dx_6}{dt} &= x_6 [1 - 2(x_6 - a_{64}x_4)] ; \end{aligned} \quad (3)$$

$$A_3(x_5) = IF \left[ \begin{array}{l} x_5 < x_5^*; a_{35}x_5; \\ a_{35} + a_{35} \cdot (1 - \exp(-\alpha_3 \tau))x_5 \end{array} \right];$$

$$A_4(x_5) = IF \left[ \begin{array}{l} x_5 < x_5^*; a_{45}x_5; \\ a_{45} + a_{45} \cdot (1 - \exp(-\alpha_4 \tau))x_5 \end{array} \right].$$

В правой части первого уравнения предусмотрена задержка на некоторый интервал времени  $\tau_2$  того влияния на уровень системного мышления школьников, которое связано с изменениями качества преподавания. Аналогичная задержка, на интервал времени  $\tau_3$ , введена для учета влияния изменений интенсивности занятий.

В модели использованы также операторы (агенты) управления  $A_3(x_5)$  и  $A_4(x_5)$ . Они контролируют предельно допустимый уровень интеллектуальной нагрузки школьников, который обозначен  $x_5^*$ . При достижении этого уровня интенсивность занятий и интерес к предмету обучения должны падать. Поэтому агенты управления следят за интеллектуальной нагрузкой и включают при необходимости механизмы ослабления этих процессов.

Примеры сценариев развития в модели школьной системы приведены на рисунке 3.

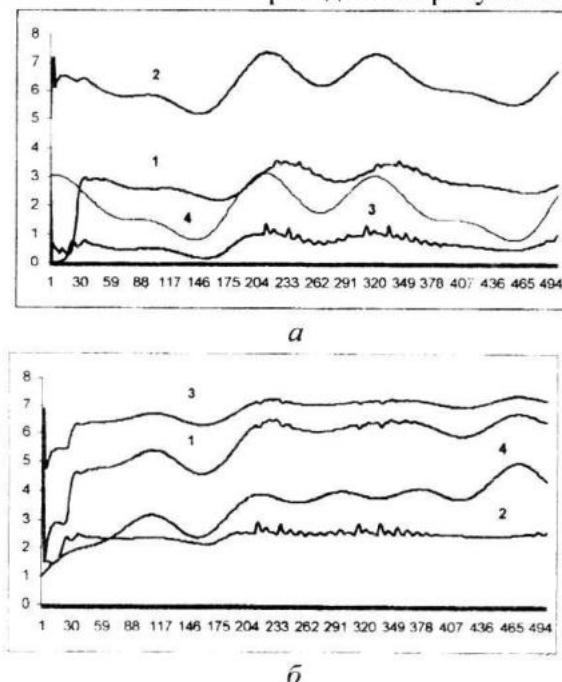


Рисунок 3 – Сценарии процессов в системе школьного образования. а) 1 –  $X_1$ , 2 –  $X_2$ , 3 –  $X_3$ , 4 –  $X_{10}$ ; б) 1 –  $X_4$ , 2 –  $X_5$ , 3 –  $X_6$ , 4 –  $X_{10}$

В качестве внешних влияний, которые призваны вывести модель из состояния рав-

новия и генерировать в ней сценарии развития, использованы два процесса, относящиеся к внешней среде по отношению к модели школьной системы. Это – спрос на системно мыслящих специалистов на рынке труда, который обозначен  $x_{10}$ , и квалификация преподавателей средних школ  $x_{21}$ , которых готовит высшая школа.

Сценарии развития следуют изменениям функции внешнего влияния  $X_{21}$ . На графиках видны введенные задержки роста уровня системного мышления при изменении качества преподавания (на 20 суток) и интенсивности занятий (на 10 суток).

**Пример эколого-экономической системы сельскохозяйственного производства.** Рассмотрим систему производства с/х продукции, стремящуюся получить наибольший урожай с некоторого поля в условиях существования двух видов вредителей урожая: № 1 и № 2. Вредитель № 1 действует непосредственно на поле и против него может быть применение безвредный для окружающей среды гербицид. Вредитель урожая № 2 находится на соседнем поле. Против него не действует имеющийся гербицид и он полностью уничтожает урожай, если проникнет на данное поле. Вредитель № 1 препятствует его проникновению на свое поле. Задача заключается в том, чтобы минимизировать потери урожая от вредителя № 1, сохраняя его количество на некотором уровне.

В этом примере основные процессы развития, отвечающие поставленной цели:  $x_1$  – объем урожая с/х культуры,  $x_2$  – количество примененного гербицида,  $x_3$  – количество вредителя № 1 на поле,  $x_4$  – количество вредителя № 2, проникнувшего на поле. Концептуальная модель системы, изображена на рисунке 4. В ее структуру включены два блока управления, обозначенные  $U_1$  и  $U_2$ .



Рисунок 4 – Концептуальная модель системы производства с/х продукции

Используя общие уравнения метода (1) и схему причинно-следственных связей на рисунке 4, получим следующую систему динамических уравнений модели

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_1[1 - 2(x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3)], \\ \frac{dx_2}{dt} &= x_2[1 - 2(x_2 - a_{2U_2}U_2)], \\ \frac{dx_3}{dt} &= x_3[1 - 2(x_3 + a_{32}x_2 - a_{31}x_1)], \\ \frac{dx_4}{dt} &= x_4[1 - 2(x_4 - a_{4U_1}U_1)] . \end{aligned} \quad (4)$$

Рост количества вредителя № 2 на поле, когда количество вредителя № 1 на нем уменьшается до уровня  $x_3^*$  можно представить следующим логическим оператором

$$U_1(x_3^* - x_3) = IF[x_3^* - x_3 < 0; 0; 1 - e^{-\alpha_1 t}],$$

где  $\alpha_1$  – коэффициент, задающий скорость распространения вредителя № 2 на поле,  $t$  – время распространения.

Потери урожая могут происходить как за счет вредителя № 1, так и № 2. Поэтому для учета всех возможных вариантов развития событий был применен двойной логический оператор управления следующего вида

$$U_2(\Delta x_1, x_3^* - x_3) = IF \left\{ \begin{array}{l} \Delta x_1 < 0; IF[x_3^* - x_3 > 0; -\beta_2 t; \beta_2 t]; \\ IF[x_3^* - x_3 < 0; \beta_2 t; -\beta_2 t] \end{array} \right\},$$

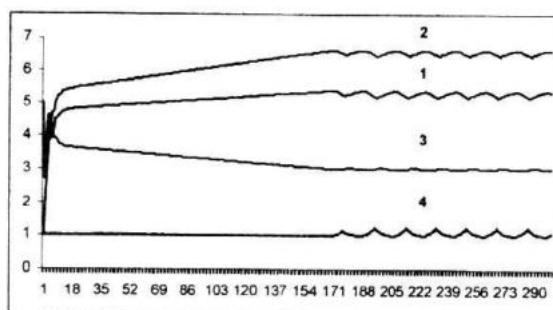
где коэффициенты  $\beta_2$  и  $-\beta_2$  задают скорости увеличения или уменьшения объемов применения гербицида, а параметр  $t$  представляет время его действия.

**Имитация возможных сценариев развития.** Все процессы были приведены к единой безразмерной шкале значений. При значениях  $x_3^* = 3$ ,  $\alpha_1 = 0,3$  и  $\beta_2 = 0,7$  были получены сценарии, показанные на рисунке 5.

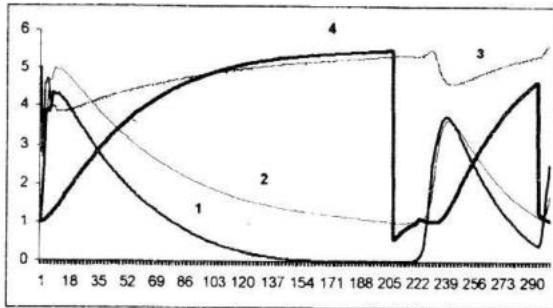
Вредитель № 1 находился на поле в количестве  $x_3 = 4,2$ . Снижение до значения  $x_3^* = 3$  произошло на 180 шаге вычислений, после чего увеличение обработки поля гербицидом было остановлено, так как количество вредителя № 2 начало возрастать. При наиболее выгодном сценарии урожай вырос на 20%.

Затем предельно допустимое количество вредителя № 1 было увеличено до значения  $x_3^* = 5,3$ . Возникли благоприятные условия для быстрого увеличения количества вредителя № 2, что привело к полному уничтожению урожая уже к 130 шагу по времени.

Уменьшение количества гербицида способствовало росту популяции вредителя № 1, который на 200 шаге вычислений и вытеснил с поля вредителя № 2.



a



б

Рисунок 5 – Сценарии процессов в системе при различных начальных условиях. а – преобладает вредитель № 1, б – преобладает вредитель № 2. 1 –  $x_1$ , 2 –  $x_2$ , 3 –  $x_3$ , 4 –  $x_4$ ,

Прогнозируемые сценарии показывают, что для обеспечения максимально возможных урожаев количество гербицида  $x_2$  должно быть 6,6 в первом случае и 1,3 – во втором.

## Л и т е р а т у р а

1. И.Е. Тимченко, Е.М. Игумнова, И.И. Тимченко. Системный менеджмент и АВС-технологии устойчивого развития. Севастополь, Изд. “ЭКОСИ – Гидрофизика”, 2000. – 225 с.
2. И.И. Тимченко, Е.М. Игумнова, И.Е. Тимченко. Образование и устойчивое развитие. Системная методология. Севастополь, “ЭКОСИ – Гидрофизика”, 2004. – 527 с.
3. I.E. Timchenko Stochastic Modeling of Ocean Dynamics // Harwood Acad. Publ. Chur-London-Paris-New-York, 1984. – 320 p.
4. А.Н. Колмогоров. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей. // Изв. АН СССР. Серия матем., – 1941. – 5. – С. 3 – 13.