

## **Реанализ данных наблюдений для идентификации моделей природной среды.**

**Timchenko I.E., Igumiova E.M., Nikiforov Yu.I., Sologova C.M., Tymchenko I.I.**

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail:timchenko@stel.sebastopol.ua

Предложен общий подход к моделированию природных процессов, связанных причинно-следственными отношениями. На примере модели биогеоценоза показана возможность контроля сценариев развития процессов при переменных коэффициентах модели, идентифицируемых путем реанализа наблюдений.

### **1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

Задачи контроля окружающей среды требуют создания практических систем контроля, которые вводятся для достижения конкретных целей [1]. Современная теория управления [2] предлагает деление возможных видов систем контроля окружающей среды на два больших класса: системы с распределенными и с сосредоточенными параметрами. К классу моделей систем с распределенными параметрами относятся динамико-стохастические модели природной среды, широко используемые в meteorологии и в океанографии [3] для четырехмерного анализа наблюдений [4].

Второй класс систем контроля составляют агрегированные системы, которые вводятся для целей контроля временных процессов, происходящих в отдельных точках природной среды или вообще не имеющих привязки к координатам. Подобные системы описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями и называются системами с сосредоточенными параметрами [2]. Осреднение (агрегирование) позволяет избежать использования физических законов сохранения массы, энергии и импульса [5], а это особенно важно для биологии, экономики, социологии и экологии, где аналоги физических законов сохранения пока не найдены [6].

В качестве своеобразной замены законам сохранения в моделях систем с сосредоточенными параметрами выступают известные из опыта (т.е. по данным многократных наблюдений) причинно-следственные зависимости между отдельными контролируемыми процессами. Задача использования подобной экспертной информации для моделирования систем является центральной и имеет несколько различных подходов к ее решению [7].

Наиболее общим и наиболее успешным из них принято считать метод системной динамики, предложенный Джессом Форрестером [8]. Метод основан на поиске такой структуры модели системы, которая содержит в своей основе несколько центральных контуров положительных и отрицательных обратных связей. Модели системной динамики состоят из темпов (скоростей потоков в системе) и уровней (накопителей переносимой потоками субстанции). Их главное достоинство состоит в четких правилах формализации темпов и уровней. Метод системной динамики чрезвычайно широко используется для моделирования процессов в экономике [9] и для управления производством [10]. Однако, он имеет ряд недостатков. Главный недостаток его заключается в том, что метод не позволяет усваивать текущую информацию о контролируемых параметрах окружающей среды в процессе контроля.

Идея усовершенствования метода системной динамики привела к созданию нового метода аддитивного баланса влияний [1], суть которого заключается в следующем.

Любая из систем, выделенная нами из бесчисленного множества виртуальных систем, находится в состоянии динамического равновесия (баланса) с окружающей ее внешней средой. Изменения, наблюдаемые внутри системы, являются следствиями внешних влияний. Для сохранения состояния динамического баланса с внешними силами система должна непрерывно реагировать на них изменением своих внутренних процессов. Поэтому новый метод моделирования был назван: метод аддитивного баланса влияний или ABC метод (от английского названия Adaptive Balance of Causes) [1].

Прежде, чем перейти к описанию ABC метода, полезно охарактеризовать основные шаги построения моделей природных систем с сосредоточенными параметрами.

1. Формулировка целевых установок контроля окружающей среды. Исходя из целей контроля отбираются наиболее важные процессы, которые образуют вектор состояния системы. Каждому из отобранных процессов ставится в соответствие отдельный модуль в структуре системы.

2. Анализ причинно-следственных отношений между отобранными для составления модели процессами. На этом этапе привлекается накопленный экспертами опыт, который свидетельствует о наличии связей между различными процессами. Такого рода причинно-следственные зависимости часто удается оценить количественно по какой-либо шкале и использовать для построения концептуальной модели системы.

3. Установление границ системы. Эти границы отделяют систему от окружающей среды, которая является движущей силой всех процессов, наблюдавшихся внутри системы.

4. Нахождение математического выражения для процессов-модулей, из которых составлена концептуальная модель системы. Эта задача является принципиально важной, поскольку от ее решения зависят как сложность математической модели системы, так и ее качество. Общие требования к модулям состоят в том, чтобы их уравнения были однотипными и наиболее простыми по форме. Однако, они должны выражать некоторые основные свойства, которые присущи любой сложной системе, - способность реагировать на внешние влияния и приспособливаться к ним.

5. Нахождение математического выражения для учета влияния на данный модуль со стороны других модулей. Эта задача также чрезвычайно важна, поскольку именно объединение модулей представляет собой математическую модель системы. Для учета влияний со стороны соседних модулей необходимо ввести в модель некоторые коэффициенты, которые могли бы устанавливать степени влияний.

6. Определение коэффициентов модели. Этот шаг позволяет осуществить привязку математической модели системы к конкретной задаче контроля окружающей среды. Для установления их значений существуют два пути: обобщение опыта экспертов путем субъективной оценки уровня соответствующего влияния (по некоторой шкале) и статистический анализ наблюдений, специально организованных для верификации модели.

7. Разработка пакета программ математического обеспечения имитационной модели. Этот пакет должен включать в себя подпрограммы реанализа архивных сценариев контролируемых процессов, расчета коэффициентов модели, прогноза возможных изменений состояния системы как следствия различных внешних влияний.

8. Создание информационной технологии управления системой контроля окружающей среды. Этот шаг состоит в разработке системы операций, в соответствии с которыми должны приниматься решения по управлению системой контроля. Предполагается, что построенная имитационная модель будет давать прогнозы сценариев различных природных процессов в ответ на предъявляемые ей варианты использования ресурсов системы.

## 2. ОСНОВЫ МЕТОДА АДАПТИВНОГО БАЛАНСА ВЛИЯНИЙ.

Наряду с корреляционными связями важную роль играют причинно-следственные зависимости между природными процессами. Сам факт существования значимого коэффициента взаимной корреляции между двумя процессами еще не означает причинно-следственной связи между ними. Однако, когда причины и следствия известны заранее, статистические связи между процессами позволяют определить их количественно.

Метод адаптивного баланса влияний позволяет строить модели различных взаимно зависимых процессов, которые учитывают причинно-следственные отношения между ними. Для представления каждого из рассматриваемых процессов в АБС методе используется универсальный модуль, обладающий свойством сохранять равновесное состояние в отсутствие каких-либо внешних влияний. Его уравнение имеет следующий вид [1]

$$\frac{dx}{dt} = cx [F^-(x) - F^+(x)] \quad (1)$$

где  $c$  – некоторая константа, а

$F^+(x)$  представляет собой монотонно растущую функцию, которая связана с функцией  $F^-(x)$  соотношением

$$F^-(x) + F^+(x) = 1. \quad (2)$$

Функции  $F^-(x)$  и  $F^+(x)$ , называемые базовыми функциями влияния, представляют собой две противоположные тенденции развития процесса  $x(t)$ . Поэтому универсальный модуль стремится к равновесию, при котором обе тенденции совпадают по величине.

Рассмотрим систему, состоящую из  $n$  стандартных модулей, каждый из которых представляет один из развивающихся в ней процессов. Представим среднее значение  $x_1'$  некоторого процесса  $x_1(t)$  в этой системе как равновесное состояние модуля 1, в котором этот модуль находится при отсутствии внешних влияний со стороны модулей 2, 3, ...,  $n$ . Следствием внешних влияний (причин) будет отклонение  $x_1'(t)$  модуля 1 от равновесия. Для описания нового состояния модуля в работе [1] предложено использовать следующее выражение

$$x_1(t) = x_1' + x_1'(t) = x_1' + a_{12}x_2(t) + a_{13}x_3(t) + \dots + a_{1N}x_N(t), \quad (3)$$

где  $a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1N}$  – некоторые постоянные коэффициенты влияния. Из формул (1) и (2) получаем

$$\frac{dx_1}{dt} = cx_1 [1 - 2F^+(x_1)] \quad (4)$$

В работе [1] показано, что базовая функция влияния  $F^+(x_1)$  может быть выбрана следующей

$$F^+(x_1) = x_1(t) - a_{12}x_2(t) - a_{13}x_3(t) -$$

$$\dots - a_{1N}x_N(t) . \quad (5)$$

Тогда общее уравнение для процесса  $x_1(t)$  в системе, описываемое универсальным модулем, принимает вид

$$dx_1/dt = c_1x_1(t)[x_1 - (x_1(t) - a_{12}x_2(t) - a_{13}x_3(t) - \dots - a_{1N}x_N(t))]. \quad (6)$$

Объединение подобных уравнений, построенных для всех  $n$  модулей, позволяет получить математическую модель системы.

Наличие универсального уравнения (6), которое порождает математическую модель для любой системы с сосредоточенными параметрами, является первым важным преимуществом метода аддитивного баланса влияний перед упомянутым выше методом системной динамики. ABC метод моделирования пригоден для создания математических моделей любых сложных систем.

### 3. МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВЛИЯНИЯ

Одним из основных положений ABC метода моделирования сложных систем, является утверждение о том, что процессы, наблюдаемые в системе, являются следствиями внешних влияний эту на систему. Переходя от модуля к модулю, внешние влияния распространяются внутри системы, заставляя ее приспособливаться к новым условиям динамического равновесия. Определение корреляционных связей между процессами внутри системы и внешними влияниями на нее в этих условиях даст ценнную информацию о коэффициентах влияния одних модулей на другие. На этом и основан объективный статистический подход к оценке коэффициентов влияния, применяемый в ABC методе [1].

Предположим, что для управления некоторой сложной системой отобраны  $n$  процессов и установлена схема причинно-следственных связей между ними, характеризуемая набором коэффициентов влияния  $\{a_{ij}\}$ . Тогда можно говорить о построении концептуальной модели данной системы. Предположим далее, что на протяжении некоторого времени известны внешние влияния  $\{f_m\}$  на систему и ее реакция на них  $\{x_m\}$  со стороны системы. Это означает, что существует архив временных рядов наблюдений за поведением данной системы.

Будем представлять временные ряды наблюдений, имеющиеся в архиве, с помощью последовательностей  $\{x_j\}$ , где  $j$  обозначает момент времени  $t_j$ . Интервалы между наблюдениями (измерениями) процессов выберем равными единице:

$t_k - t_j = 1$ . Тогда, используя введенные выше обозначения для процессов в системе, внешних влияний на нее и коэффициентов влияний, можно написать следующую систему

уравнений ABC модели в конечно-разностной форме

(при  $c_1 = c_2 = \dots = c_n = 1$ )

$$\begin{aligned} x_{1k} &= 2x_{1j}(1 - x_{1j} - a_{12}x_{2j} - a_{13}x_{3j} - \dots - a_{1n} \\ &x_{nj} + f_{1j}) \\ x_{2k} &= 2x_{2j}(1 - x_{2j} - a_{21}x_{1j} - a_{23}x_{3j} - \dots - a_{2n} \\ &x_{nj} + f_{2j}) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\dots \dots \dots x_{nk} = 2x_{nj}(1 - x_{nj} - a_{n1}x_{1j} - a_{n2}x_{2j} - \dots - a_{n(n-1)}x_{(n-1)j} + f_{nj})$$

Напомним, что ABC метод построен таким образом, что его уравнения отражают стремление всех модулей данной системы к согласованному равновесному состоянию. Процессы в системе непрерывно подстраиваются под внешние влияния. Их изменения происходят в таком направлении, чтобы все скобки в уравнениях (7) одновременно становились равными 0,5. Эти условия динамического баланса можно переписать в следующем виде

$$\begin{aligned} x_{1j} + a_{12}x_{2j} + a_{13}x_{3j} + \dots + a_{1n}x_{nj} &= b_{1j} \\ a_{21}x_{1j} + x_{2j} + a_{23}x_{3j} + \dots + a_{2n}x_{nj} &= b_{2j} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\dots \dots \dots a_{n1}x_{1j} + a_{n2}x_{2j} + a_{n3}x_{3j} + \dots + x_{nj} = b_{nj},$$

где введены обозначения:  $b_{ij} = 0,5 + f_{ij}$ , а  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Будем считать, что мы располагаем  $n$  наблюдениями всех процессов  $x_i$  и внешних влияний  $b_i$ , т.е. архивными данными о предыстории развития системы. Тогда имеется возможность оценить средние арифметические значения имеющихся временных рядов, их дисперсии и коэффициенты взаимной корреляции. Так, например, можно вычислить коэффициенты взаимной корреляции процесса  $x_6$  и процесса  $x_9$ , которые мы будем обозначать  $K_{69}$ . Для коэффициентов взаимной корреляции между процессом  $x_6$  в системе и внешним воздействием  $b_9$  будем использовать другое обозначение  $G_{69}$ .

Умножая первое из уравнений (8) на сначала на  $x_1$ , затем - на  $x_2$ , далее на  $x_3$  и т.д. вплоть до  $x_n$ , то мы получим новую систему из  $n$  уравнений, неизвестными в которой будут те самые коэффициенты влияния  $a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1n}$ , которые стоят в первом из уравнений (7). Если воспользоваться известными наблюдениями предыстории развития процессов, т.е. архивными данными, то можно вычислить коэффициенты взаимной корреляции. Тогда новая система уравнений примет следующий вид

$$\begin{aligned} a_{12}K_{12} + a_{13}K_{13} + \dots + a_{1n}K_{1n} &= G_{11} - K_{11} \\ a_{12}K_{21} + a_{13}K_{23} + \dots + a_{1n}K_{2n} &= G_{21} - K_{21} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\dots \dots \dots a_{12}K_{n1} + a_{13}K_{n2} + \dots + a_{1n}K_{nn} = G_{n1} - K_{n1}$$

В этой системе коэффициенты влияния  $a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1n}$  являются неизвестными функциями, а коэффициенты корреляции - из-

всестные величины. Поэтому, решая систему уравнений (9), мы получим объективную (основанную на наблюдениях) оценку коэффициентов влияния.

Повторив перечисленные операции со вторым из уравнений системы (8), мы получим еще один набор уравнений, позволяющих найти коэффициенты влияния для второго из уравнений (7), а именно:  $a_{12}$ ,  $a_{23}$ , ...,  $a_{1n}$

$$a_{21} K_{11} + a_{23} K_{13} + \dots + a_{2n} K_{1n} = G_{12} - K_{12},$$

$$a_{21} K_{21} + a_{23} K_{23} + \dots + a_{2n} K_{2n} = G_{22} - K_{22} \quad (10)$$

$$\dots$$

$$a_{21} K_{n1} + a_{23} K_{n3} + \dots + a_{2n} K_{nn} = G_{n2} - K_{nn}.$$

Этим же способом выводятся аналогичные системы уравнений для определения всех остальных коэффициентов влияния модели (7).

Получающиеся системы линейных неоднородных уравнений имеют единственное решение, когда определители этих систем, составленные из коэффициентов взаимной корреляции компонент вектора состояния системы  $D_{ij}$ , отличны от нуля. Пусть, например, определитель системы уравнений (8)  $\Delta_{nn}$  отличен от нуля. Для нахождения коэффициентов достаточно воспользоваться формулами Крамера [11]

$$a_{11} = \Delta_{01} / \Delta_{nn}; \quad a_{21} = \Delta_{02} / \Delta_{nn}; \dots; \\ a_{n1} = \Delta_{0n} / \Delta_{nn}, \quad (11)$$

где через  $\Delta_{0i}$  обозначены определители, которые получаются из определителя  $\Delta_{nn}$  путем замены столбца коэффициентов, стоящих перед  $a_{ij}$  в системе уравнений (1), столбцом свободных членов, находящимся в правой части этой системы.

Отметим, что операция нахождения коэффициентов влияния в уравнениях ABC модели (6) завершает построение динамической модели соответствующей природной системы. Коэффициенты модели идентифицированы на основе наблюдений. Более того, процедура идентификации допускает текущий пересчет этих коэффициентов в реальном времени контроля природной среды. Это делает систему контроля гибкой и обеспечивает ее адаптацию к изменяющимся со временем внешним условиям. В этом заключается второе важное преимущество ABC метода моделирования перед упомянутым выше методом системной динамики.

#### 4. ПРИМЕР СИСТЕМЫ БИОГЕОЦЕНОЗА

Рассмотрим простую экосистему биогеоценоза, состоящую из популяции организмов и окружающей среды. Обозначим через  $x_1$  количество мужских организмов в популяции, а через  $x_2$  – женских. Условия их обитания в биогеоценозе будем характеризовать одним фактором  $x_3$ , который отрицательно влияет на количества  $x_1$  и  $x_2$ . В качестве этого фактора может выступать, на-

пример, концентрация загрязняющих веществ в морской среде. Стремясь приспособиться к этому фактору для того, чтобы выжить, организмы адаптируются к условиям среды и тем самым уменьшают вредное для них влияние фактора  $x_3$ .

Рассматриваемая модель представляет собой систему с сосредоточенными параметрами, вектор состояния которой имеет три составляющих. На рис.1 представлена схема причинно-следственных связей в экосистеме, т.е. ее концептуальная модель, и показаны соответствующие коэффициенты влияния.

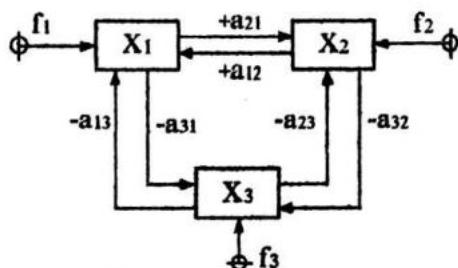


Рис. 1. Причинно-следственные связи в модели биогеоценоза.

Воспользовавшись уравнением универсального модуля (6) и его конечно-разностными представлениями (7) нетрудно построить ABC модель системы биогеоценоза. Ее уравнения имеют следующий вид

$$x_{1k} = 2 x_{1j} (1 - c_1 (x_{1j} + b_{10} - a_{12} x_{2j} + a_{13} x_{3j} - f_{1j})),$$

$$x_{2k} = 2 x_{2j} (1 - c_2 (x_{2j} + b_{20} - a_{21} x_{1j} + a_{23} x_{3j} - f_{2j})), \quad (12)$$

$$x_{3k} = 2 x_{3j} (1 - c_3 (x_{3j} + b_{30} + a_{31} x_{1j} + a_{32} x_{2j} - f_{3j})),$$

где коэффициенты  $c_1, c_2, c_3, b_{10}, b_{20}, b_{30}$  позволяют устанавливать равновесные значения параметров состояния экосистемы. Наблюдая на некотором интервале времени реакцию модели на внешние влияния, можно определить ее коэффициенты и тем самым идентифицировать модель для практического применения.

Поскольку рассматриваемая система находится под влиянием множества факторов, не учтываемых моделью, будем предполагать, что на каждый из моделируемых процессов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  воздействуют случайные внешние силы  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ . Условимся оценивать значения процессов и внешних воздействий по 10-ти бальной безразмерной шкале и будем считать, что в начальный период времени нам известна их динамика. Это означает, что существует архив сценариев  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ , который должен быть использован для идентификации коэффициентов влияния модели.

Для нахождения коэффициентов  $a_{12}$  и  $a_{13}$ , входящих в первое из уравнений (12), по

аналогии с уравнениями (8) нетрудно получить следующую систему уравнений

$$\begin{aligned} a_{12}K_{12} + a_{13}K_{13} &= G_{11} - K_{11}, \\ a_{12}K_{21} + a_{13}K_{23} &= G_{21} - K_{21} \end{aligned} \quad (13)$$

Далее по аналогии с выводом уравнений (9) находим соответствующие системы уравнений для вычисления коэффициентов  $a_{21}$  и  $a_{23}$

$$\begin{aligned} a_{21}K_{11} + a_{23}K_{13} &= G_{12} - K_{12}, \\ a_{21}K_{21} + a_{23}K_{23} &= G_{22} - K_{22} \end{aligned} \quad (14)$$

Еще одна подобная система уравнений может быть построена для определения коэффициентов  $a_{31}$  и  $a_{32}$

$$\begin{aligned} a_{31}K_{11} + a_{32}K_{12} &= G_{13} - K_{13}, \\ a_{31}K_{21} + a_{32}K_{22} &= G_{23} - K_{23} \end{aligned} \quad (15)$$

Решения полученных систем уравнений находятся по правилам линейной алгебры [11]

$$\begin{aligned} a_{12} &= [K_{23}(G_{11} - K_{11}) - K_{13}(G_{21} - K_{21})] / [K_{12}K_{23} - K_{21}K_{13}], \\ a_{13} &= [K_{12}(G_{21} - K_{21}) - K_{21}(G_{11} - K_{11})] / [K_{12}K_{23} - K_{21}K_{13}], \\ a_{21} &= [K_{23}(G_{12} - K_{12}) - K_{13}(G_{22} - K_{22})] / [K_{11}K_{23} - K_{21}K_{13}], \\ a_{23} &= [K_{11}(G_{22} - K_{22}) - K_{21}(G_{12} - K_{12})] / [K_{11}K_{23} - K_{21}K_{13}], \\ a_{31} &= [K_{22}(G_{13} - K_{13}) - K_{12}(G_{23} - K_{23})] / [K_{11}K_{22} - K_{12}K_{13}], \\ a_{32} &= [K_{11}(G_{23} - K_{23}) - K_{12}(G_{13} - K_{13})] / [K_{11}K_{22} - K_{12}K_{13}]. \end{aligned} \quad (16)$$

Заметим, что все входящие в формулы (16) коэффициенты взаимной корреляции могут быть оценены по имеющимся архивным данным с использованием стандартных формул реанализа. Поэтому задача идентификации коэффициентов влияния в модели биогеоценоза может считаться практически выполненной.

## 5. ИМИТАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ С МОДЕЛЬЮ БИОГЕОЦЕНОЗА.

Для оценки эффективности рассмотренного метода идентификации коэффициентов влияния был проведен специальный имитационный эксперимент. Первоначально коэффициенты влияния в ABC модели биогеоценоза (12) были заданы, т.е. считались известными. Они были выбраны следующими:

$a_{12} = 0,6$ ;  $a_{13} = -0,35$ ;  $a_{21} = 0,35$ ;  $a_{23} = -0,45$ ;  $a_{31} = -0,35$ ;  $a_{32} = -0,05$ . Подобный выбор коэффициентов означал, что влияние женских особей  $x_2$  на количество мужских особей  $x_1$  в популяции преобладало над противоположным влиянием  $x_1$  на  $x_2$  ( $a_{12} = 0,6$ , в то время, как  $a_{21} = 0,35$ ). Что касается лимитирующего фактора  $x_3$ , то он оказывал более сильное влияние на женские особи, которые слабо сопротивлялись его влиянию ( $a_{23} = -0,45$ , в то время, как  $a_{32} = -0,05$ ).

Заданные влияния внутри системы определили баланс трех контролируемых про-

цессов. Они принимали устойчивые постоянные значения при задании произвольных начальных условий уже на 3 - 5 шаге вычислений.

Далее были имитированы случайные внешние воздействия на систему биогеоценоза  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ . Предполагалось, что на протяжении двух лет (750 шагов вычислений при условии, что один шаг равен суткам) каждый из трех контролируемых процессов  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  подвержен значительным случайным флуктуациям, которые имели вид, представленный на рис. 2 а.

Так как коэффициенты влияния считались известными, оказалось возможным определить реакцию модели (12) на случайные внешние влияния. Результаты расчетов по уравнениям модели показаны на рис. 2 б. Сопоставляя между собой реализацию  $x_1$  и внешнее влияние  $f_1$ ,  $x_2$  и  $f_2$ ,  $x_3$  и  $f_3$ , можно сделать вывод, что сценарии развития в системе отличаются от внешних воздействий, хотя и имеют такой же случайный характер. Это позволяет вычислить коэффициенты взаимной корреляции  $K$  и  $G$  и составить из них корреляционную матрицу с элементами  $K_{lm}$  и  $G_{lm}$  ( $l, m = 1, 2, 3$ ).

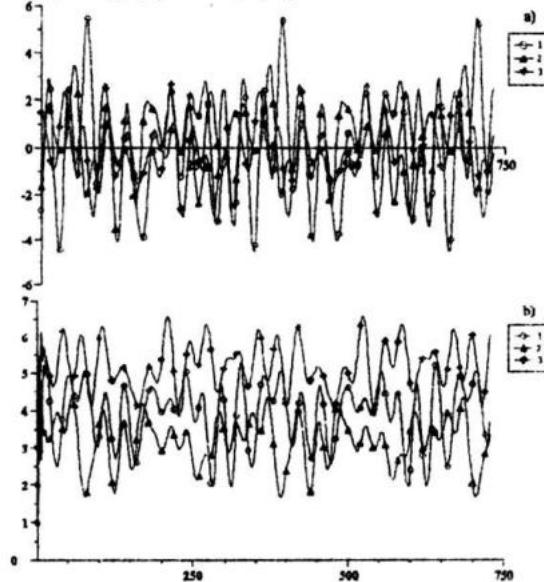


Рис.2. Внешние воздействия (а) и реакция ABC модели (б).

На рис.3 показаны коэффициенты взаимной корреляции, рассчитанные по тем сценариям внешних воздействий и по тем реакциям на них со стороны модели, которые изображены на рис. 2 а и б. При расчете корреляционной матрицы был выбран интервал осреднения, который представлял собой число измерений процессов или, что то же, длину отрезков реализации процессов, использованных для получения оценок  $K$  и  $G$ . Как отмечалось выше, располагая архивными записями сценариев внешних

воздействий на систему и ее реакций на эти воздействия, можно организовать текущий пересчет корреляционной матрицы и ввести таким путем переменные коэффициенты влияния.

На рис. 3 а показана изменчивость коэффициентов взаимной корреляции процессов в системе биогеоценоза при выборе интервала осреднения, равного 250 шагам по времени. Динамика элементов корреляционной матрицы  $K_{lm}$  свидетельствует о том, что имитированные внешние влияния на модель имеют скрытые периодичности с интервалами порядка полугода лет. Более стабильными оказались взаимные корреляционные связи  $G_{lm}$  между процессами в системе и внешними воздействиями на нее, которые изображены на рис. 3 б и с.

Приведенные результаты расчетов послужили основой для выполнения имитационного эксперимента по определению коэффициентов влияния в АВС модели биогеоценоза. Суть этого эксперимента заключалась в следующем. Предположим, что в результате наблюдений в течение  $n$  дней за поведением особей  $x_1$  и  $x_2$ , фактора окружающей среды  $x_3$  и изменениями внешних влиющими факторов, удалось построить временные ряды наблюдений

$x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}; x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}; x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n};$   
 $f_{11}, f_{12}, \dots, f_{1n}; f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2n}; f_{31}, f_{32}, \dots, f_{3n};$

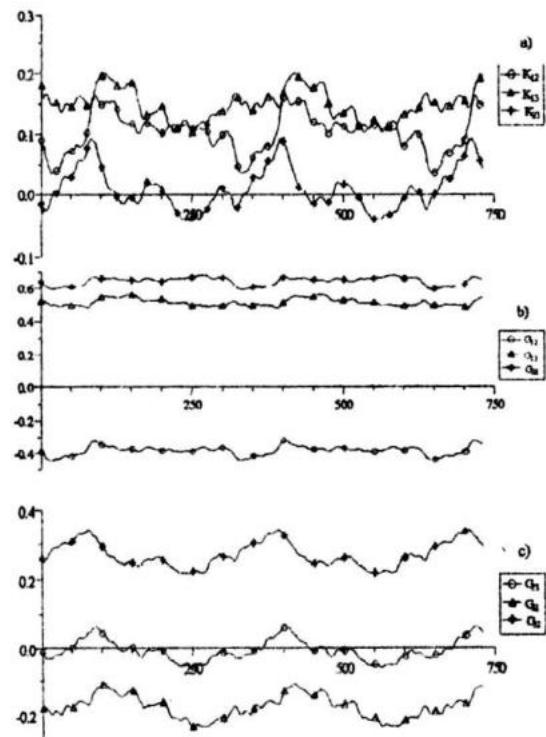


Рис. 3. Динамика элементов корреляционной матрицы

Пусть эти временные ряды совпадают с теми процессами, которые изображены на рис. 3 а и б, например, для первых 250 точек. Тогда по этим временным рядам могут быть вычислены все элементы корреляционной матрицы, т.е.  $K_{lm}$  и  $G_{lm}$  ( $l, m = 1, 2, 3$ ). Очевидно, что их величины будут теми самыми, которые приведены для первых  $n$  шагов по времени на рис. 3 а, б, с. Теперь, располагая значениями  $K_{lm}$  и  $G_{lm}$ , можно получить оценки величин коэффициентов влияния в уравнениях модели (12). Для этого достаточно воспользоваться формулами (16).

Результаты вычислений приведены на рис. 4 а и б. Как следует из этого рисунка, все 6 коэффициентов влияния были идентифицированы практически точно как для начального периода времени (250 суток), так и для последующего времени эксперимента. Таким образом, предложенный алгоритм количественной оценки причинно-следственных зависимостей в системе оказался достаточно эффективным.

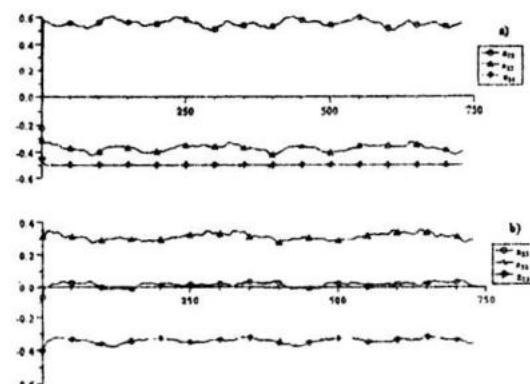


Рис. 4. Коэффициенты влияния, идентифицированные АВС моделью

## 6. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ.

В качестве примера, поясняющего возможности управления процессами в биогеоценозе с использованием модели (12), рассмотрим задачу восстановления каждого из трех контролируемых процессов  $x_1, x_2, x_3$  при заданных внешних управлении. Предположим, что после идентификации коэффициентов модели информация о процессах  $x_1, x_2, x_3$  прекратилась, хотя данные о процессах  $f_1, f_2, f_3$  продолжали поступать. Можно ли в этих условиях восстановить сценарии развития процессов  $x_1, x_2$  и  $x_3$ ?

АВС метод дает положительные ответы на эти вопросы. Однако для проверки точности восстановления необходимо проводить имитационные эксперименты. Подставим в уравнения модели (12) найденные выше коэффициенты влияния и известные сце-

нарии внешних воздействий, представленные на рис.2 а. Тогда модель позволит воспроизвести процессы  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$  для всех тех моментов времени, когда имеются известные значения внешних воздействий, т.е. для всего интервала времени имитации.

Представляет интерес сравнить эти восстановленные сценарии с теми процессами  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_3$ , которые были построены ранее при заданных коэффициентах влияния и были изображены на рис. 2 б (назовем эти сценарии истинными). Результаты сравнения приведены на рис.5 а, б, с. Точность воспроизведения истинных сценариев оказалась весьма высокой. Это еще раз подтверждает эффективность использованного метода идентификации коэффициентов влияния. Следовательно, идентифицированная по наблюдениям модель биогеоценоза (12) может быть использована для того, чтобы прогнозировать все происходящие в нем процессы при любых изменениях внешних условий:

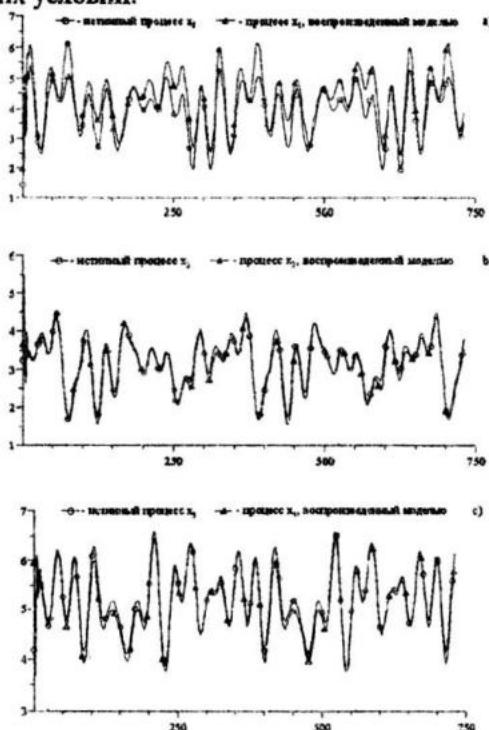


Рис. 5. Результаты воспроизведения истинных процессов АВС моделью

Таким образом, концепции динамического баланса и аддитивного учета влияний, на которых основан АВС метод моделирования систем, позволяют унифицировать описание адаптационных процессов, происходящих в системах с сосредоточенными параметрами. Предложенный в работе [1] метод идентификации коэффициентов уравнений в АВС моделях может быть эффективно использован при создании моделей природных систем, когда наряду с экспер-

тной информацией о причинно-следственных связях в системе имеются архивные данные о внешних влияниях на нее и об адаптационных процессах, происходящих в самой экосистеме.

Проведенные имитационные эксперименты демонстрируют быструю сходимость алгоритмов решения уравнений АВС моделей. Это подтверждает возможность использовать АВС модели с переменными коэффициентами влияния, т.е. такие модели, которые способны описывать адаптацию внутренней структуры природной системы в процессе ее приспособления к условиям окружающей среды.

#### ЛИТЕРАТУРА.

1. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Тимченко И.И. Системный менеджмент и АВС технологии устойчивого развития. Севастополь. Изд. "Экоси-гидрофизика". 2000. 225 с.
2. Брайсон А., Хо-Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. - М. : Мир. 1972. - 544 с.
3. Timchenko I.E. Stochastic Modelling of Ocean Dynamics // Harwood Acad. Publ. Chur-London-Paris-New-York, 1984. - 320 p.
4. Тимченко И.Е. Системные методы в гидрофизике океана. - Киев.: Наукова думка, 1988. - 180 с.
5. Монин А.С., Яглом А.М. Статистическая гидромеханика: в 2-х т. - М.: Наука, 1965, 1967. - 1. 630 с., - 2. - 720 с.
6. Мусеев Н.Н., Александров В.В., Тарко А.М. Человек и биосфера. М.: Наука, 1985. - 275 с.
7. Математические модели в биологической океанографии. Сб. под ред. Т.Платта, К.Х.Майна и Р.Е.Улановича - Париж.: Изд. ЮНЕСКО, 1984. - 195 с.
8. Forrester, J.W. Principles of Systems. Cambridge MA, Productivity Press. 1968.
9. Forrester, J.W. World Dynamics. (2 ed.), Cambridge MA, Productivity Press. 1973.
10. Sterman, J.D. Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World, Irwin/McGraw-Hill. 1999.
11. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т.III. Часть 1. ГИТЛ. Москва. 1956. 330 с.
12. Тимченко И.Е., Игумнова Е.М., Соловьева С.М. Управление природным ресурсами. Имитационная технология АВС AGENT. Препринт. Изд. МГИ НАНУ. Севастополь. "Экоси-гидрофизика". 2001. 95 с.