

**МЕТОД СОГЛАСОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ В ФОРМЕ АЛГОРИТМИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ НА ПРИМЕРЕ МОДЕЛИ АГРОЭКОСИСТЕМЫ****В. В. Михайлов, Я. А. Быков (Санкт-Петербург)**

Данные исследования являются продолжением предыдущего доклада* и посвящены практическому изложению методики взаимного согласования фрагментарных моделей, представленных в форме алгоритмических сетей. В качестве примера рассмотрим упрощенную модель агроэкосистемы, расположенной на водосборе озера (рис. 1). В состав системы входят: ферма по доращиванию телят, поле для производства кормов, очистные сооружения, озеро. Ферма ежегодно закупает x_{11} голов молодняка весом x_{10} , выкармливает его в течение года и затем реализует. Вес животных после доращивания равен x_{15} , общий прирост биомассы выкармливаемых животных равен x_{12} . Животные откармливаются корнеплодами x_7 , которые выращиваются на поле, расположенном в пределах водосбора озера. Навоз с фермы x_{18} используется в качестве удобрения, жидкие стоки x_{19} проходят систему очистки. Собранный в очистных сооружениях органика x_{22} также используется в качестве удобрений, очищенные стоки x_{23} поступают в озеро. Органические удобрения накапливаются и вносятся в почву под урожай следующего года. Кроме органических, для выращивания корнеплодов используются минеральные удобрения x_1 . Удобрения, поступившие на поля, частично используются растениями в процессе вегетации x_7 , частично смываются с полей в озеро x_3 , остаток x_8 накапливается в почве. Будем считать, что продукционные процессы в озере и в поле лимитируются фосфором. Концентрация фосфора в озерной воде зависит от его поступления со стоками очистных сооружений и стоками с полей, выноса фосфора с речными водами x_{26} и его захоронения в донных отложениях озера x_{27} . Концентрация фосфора в озерной воде определяет трофический статус озера. Модель агроэкосистемы может служить для обоснования стратегии развития хозяйственной деятельности на водосборе в зависимости от целей использования ресурсов озера.

Доля фосфора в биомассе кормовых корнеплодов, теле животных, неассимилированной пище определяется известными стехиометрическими соотношениями. Это позволяет выбрать в качестве моделируемой субстанции общий фосфор или использовать смешанные единицы измерения (общая масса – масса фосфора). Переменные x_{10} , x_{12} , x_{15} , x_{18} , x_{19} представлены в единицах массы, переменные x_1 , x_7 , x_{22} , x_{23} , x_{26} , x_{27} – в единицах фосфора.

Будем считать, что имеются модели отдельных компонентов агроэкосистемы – поля, животноводческой фермы, очистных сооружений, экосистемы озера (рис. 2). Модели представлены в форме АС и имеют общий алфавит переменных. Символами k_1 – k_8 обозначены постоянные входные коэффициенты. В моделях принят годовой шаг счета.

На рис. 3 представлен укрупненный граф причинно-следственных связей, отражающий естественный ход событий в агроэкосистеме.

Выполним согласование фрагментарных моделей в соответствии с изложенной выше методикой.

1. Формирование множества критериальных переменных фрагментарных моделей базы.

Критериальными являются общие переменные фрагментарных моделей базы (рис. 2):

$\langle x_3, x_7, x_{18}, x_{19}, x_{21}, x_{22}, x_{23} \rangle$.

* Михайлов В. В. Возможные подходы к согласованию фрагментарных моделей предметной области (настоящий сб.).

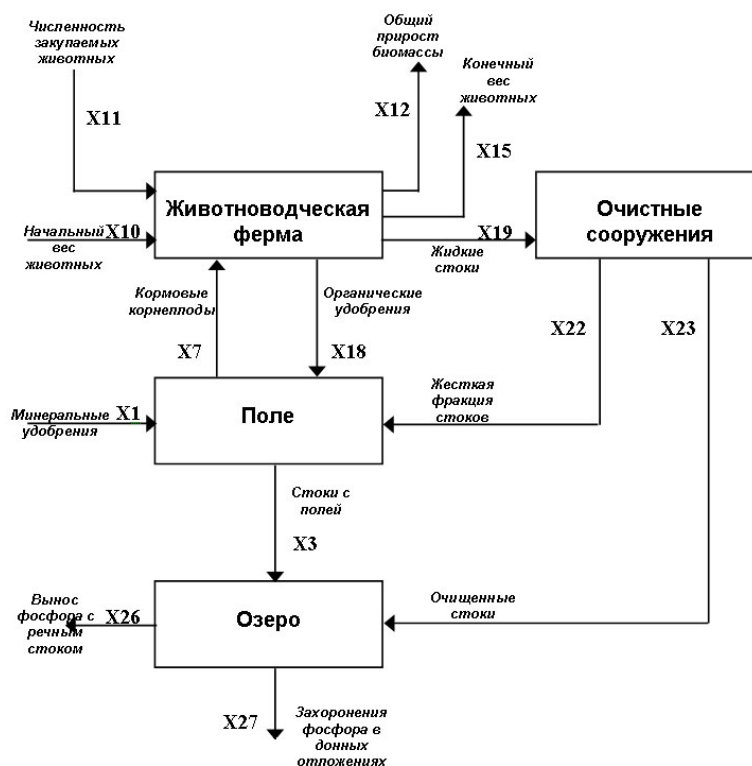


Рис. 1. Блок-схема модели агроэкосистемы

2. Формирование древовидного графа причинно-следственных связей агроэкосистемы и составление множества путей на графе.

Переход от циклического графа (рис. 3) к древовидному выполняем с помощью разрыва циклов по переменным состояния. На исходном графе существует 4 цикла – петля переменной остаточного фосфора в почве (x_8) при вершине «поле», петля переменной остаточного фосфора в озере (x_{25}) при вершине «озеро», циклы переменных <кормовые корнеплоды-органические удобрения> и <кормовые корнеплоды-жидкие стоки-органика очистных сооружений> (переменные x_7 - x_{18} и x_7 - x_{19} - x_{22} соответственно). Разрыв петель x_8 и x_{25} выполняется однозначно, переменным состояниям присваиваем имена z_1 и z_2 . Для разрыва оставшихся циклов будем учитывать, что органические удобрения с фермы и с очистных сооружений накапливаются в течение года (шага счета в модели), затем вносятся в почву и используются растениями. Таким образом, разрыв циклов должен проходить по переменным x_{18} и x_{22} . Переменным состояниям присвоим имена z_3 и z_4 . В результате разрыва циклов по переменным состояния получим древовидный граф (рис. 4). Корневые переменные графа – переменные состояния z_1 , z_2 , z_3 , z_4 и входная переменная x_1 .

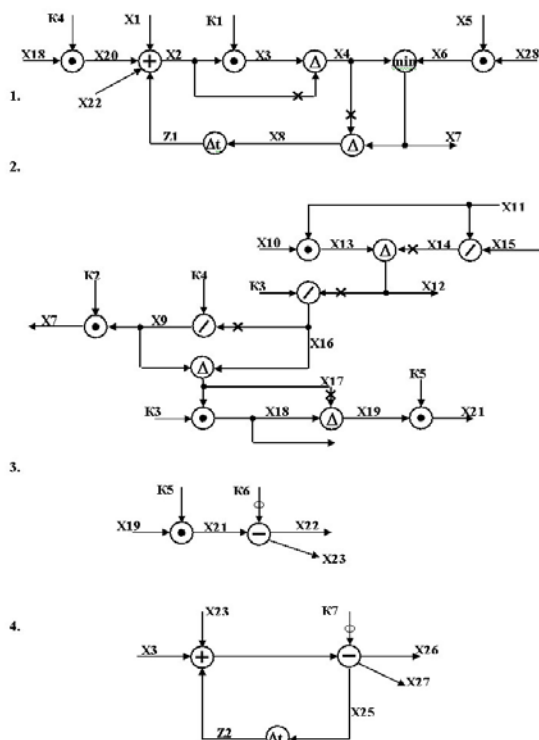


Рис. 2. Алгоритмические сети фрагментарных моделей агроэкосистемы:
1 – поле, 2 – ферма, 3 – очистные сооружения, 4 – озеро

Полное множество путей древовидного графа соответствует следующему списку:

- (z1,z3,z4,x1),x7,x18
- (z1,z3,z4,x1),x7,x12
- (z1,z3,z4,x1),x7,x19,x22
- (z1,z3,z4,x1),x7,x19,x23,x25
- (z1,z3,z4,x1),x7,x19,x23,x26
- (z1,z3,z4,x1),x7,x19,x23,x27
- (z1,z3,z4,x1),x3,x25
- (z1,z3,z4,x1),x3,x26
- (z1,z3,z4,x1),x3,x27
- z2,x26
- z2,x27.

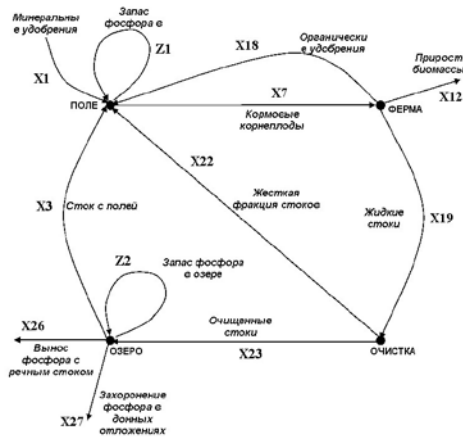


Рис. 3. Граф причинно-следственных связей агроэкосистемы

3. Проверка однозначности вычисления переменных.

Проверку выполняем путем сравнения статуса одноименных переменных фрагментарных моделей базы при парном переборе моделей. Из сравнения моделей «поле» и «ферма» видно, что переменная x_7 вычисляется как в первой, так и во второй модели и ее значение может быть неоднозначным. Для моделей «ферма» и «очистой комплекс» общей вычисляемой переменной является переменная x_{21} . Для других пар моделей условие однозначности вычисления общих переменных сетей не нарушается.

4. Проверка потери вычислимости переменных.

Для этой цели формируется множество переменных – претендентов на статус входных комплексной модели. Это множество образуют входные переменные фрагментарных моделей за вычетом переменных, вычисляемые на других моделях базы. Переменная из множества вычисляемых по блок-схеме модели агроэкосистемы (см. рис. 1), попавшая в множество претендентов, теряет вычислимость. Восстановить вычислимость можно путем обращения АС. Если обращение невозможно, модель должна быть модифицирована.

Для фрагментарных моделей агроэкосистемы полное множество входных переменных:

$$\langle x_1, x_3, x_5, x_7, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{18}, x_{19}, x_{22}, x_{23} \rangle,$$

множество переменных – претендентов на входные для комплексной модели:

$$\langle x_1, x_5, x_7, x_{10}, x_{11}, x_{12} \rangle,$$

множество вычисляемых переменных по блок-схеме (см. рис. 1):

$$\langle x_3, x_{12}, x_{15}, x_{18}, x_{19}, x_{23}, x_{26}, x_{27} \rangle.$$

Из сравнения множеств видно, что потеряла вычислимость переменная x_{12} .

5. Определение каузальной ориентированности неоднозначно вычисляемой переменной x_7 .

Определяем каузальную ориентированность вычисления переменной x_7 в моделях «поле» и «ферма» с учетом порядка событий графа причинно-следственных связей. На модели «ферма» конус вычислимости переменной x_7 – это $\langle x_9, x_{16}, x_{12} \rangle$, дерево вычислимости пусто. Таким образом, переменные x_7 и x_{12} связаны соотношением $R_1(x_{12}, x_7)$. На множестве путей древовидного графа причинно-следственных связей находим путь, содержащий события x_7 и x_{12} : $\langle (z_1, z_2, z_3, x_1), x_7, x_{12} \rangle$. Сравнив последовательность событий пути и порядок вычисления переменных на АС, получим:

$(z_1, z_2, z_3, x_1), x_7, x_{12} \rightarrow R_1(x_7, x_{12})$, что противоположно порядку вычисления отмеченных переменных на АС модели «ферма». Для переменной x_7 на модели «поле» конус вычислимости: $\langle (x_1, x_{20}, x_{22}, z_1), x_2, x_3, (x_4, ((x_5, x_7), x_6)) \rangle$, дерево вычислимости пусто. Из этой последовательности следуют, в частности, соотношения $R_1(x_1, x_7)$ и $R_1(z_1, x_7)$. Сравнивая путь на графе причинно-следственных связей, содержащий события x_1 , z_1 и x_7 , с порядком вычисления переменных на АС, получим:

$\langle (z_1, z_2, z_3, x_1), x_7 \rangle \rightarrow R_1(R_0(z_1, x_1), x_7)$. Таким образом, порядок вычисления переменной x_7 в модели «поле» ориентирован каузально, в модели «ферма» ориентирован инверсно. Для корректировки неоднозначности вычисления переменной x_7 может быть использовано частичное обращение АС одной из моделей.

6. Устранение неоднозначности вычисления переменной x_7 .

Устранение неоднозначности будем выполнять путем обращения АС модели «ферма». Переменная x_7 в ней вычисляется инверсно относительно направления причинно-следственных связей, а по переменной x_{12} имеет место потеря вычислимости. Попытаемся обратить операторы по цепочке переменных $\langle x_{12}, x_{16}, x_9, x_7 \rangle$. Все опера-

торы на этом пути обратимы. АС, полученная в результате обращения, показана на рис. 5. На сети переменная x_7 имеет статус входной, а x_{12} – выходной, что одновременно устранило неоднозначность вычисления первой переменной и потерю вычислимости второй.

7. *Определение каузальной ориентированности неоднозначно вычисляемой переменной x_{21} .*

Определяем каузальную ориентированность вычисления переменной x_{21} в моделях «ферма» (скорректированный вариант – рис.5) и «очистные сооружения». Конус вычислимости переменной x_{21} в модели «ферма» – это $\langle x_{19}, x_{17}, x_9, x_7 \rangle$, дерево вычислимости пусто. Отсюда следует, в частности: $R_1(x_{19}, x_{21})$, $R_1(x_7, x_{19})$. Анализируя пути на графе, получим: $\langle (z_1, z_3, z_4, x_1), x_7, x_{19}, x_{22} \rangle \rightarrow R_1(x_7, x_{19})$, т.е. порядок вычисления x_{19} каузально ориентирован. Относительно x_{21} такого заключения нельзя сделать.

В модели «очистные сооружения» конус вычислимости переменной x_{21} – это $\langle x_{19} \rangle$, дерево вычислимости $\langle (x_{22}, x_{23}) \rangle$. Отсюда следует: $R_1(x_{19}, x_{21})$, $R_1(x_{21}, x_{22})$, $R_1(x_{21}, x_{23})$. Сравнивая эти соотношения с путями на графе: $\langle (z_1, z_3, z_4, x_1), x_7, x_{19}, x_{22} \rangle$ и $\langle (z_1, z_3, z_4, x_1), x_7, x_{19}, x_{23}, x_{25} \rangle$ видим, что соотношения справедливы и вычисление переменной x_{21} каузально ориентировано. Полученный результат позволяет сделать заключение, что порядок вычисления пары переменных x_{19} и x_{21} в модели «ферма», удовлетворяющий условию $R_1(x_{19}, x_{21})$, так же каузально направлен. Таким образом, неоднозначность вычисления переменной x_{21} должна устраняться здесь с использованием операции вычитания АС.

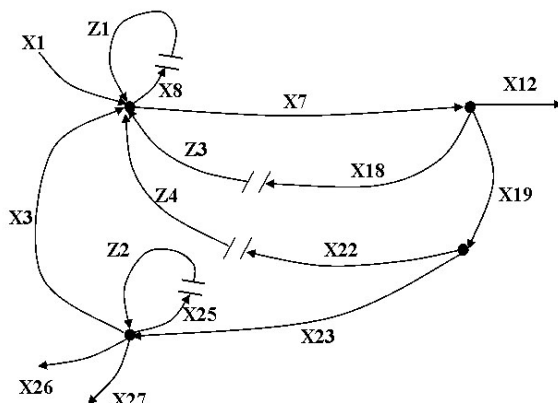


Рис. 4. Древоподобный граф причинно-следственных связей агроэкосистемы

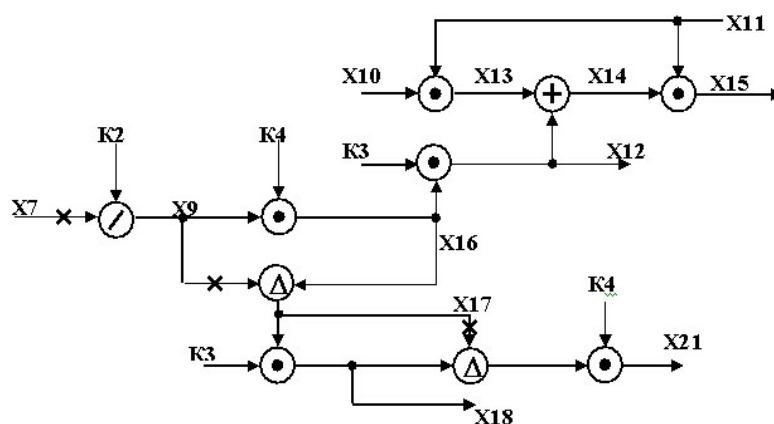


Рис. 5. Обращенная относительно переменных X_7 - X_{15} алгоритмическая сеть модели «ферма»

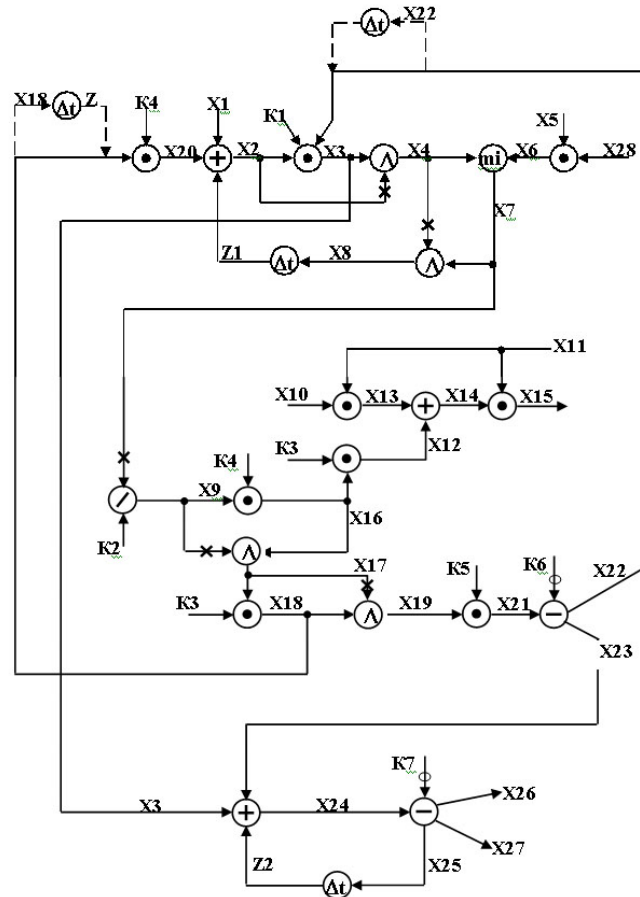


Рис. 6. Алгоритмическая сеть комплексной модели агроэкосистемы

8. Коррекция не-контуров.

В результате слияния фрагментарных моделей на АС комплексной модели (рис. 6) возникает 2 не-контур, образованных цепочками переменных $\langle x_2, x_3, x_4, x_7, x_9, x_{17}, x_{18}, x_{20}, x_{22} \rangle$ и $\langle x_2, x_3, x_4, x_7, x_9, x_{17}, x_{19}, x_{21}, x_{22}, x_{23} \rangle$. Разрыв циклов выполним по переменным x_{18} и x_{22} с учетом аналогичных действий на графе причинно-следственных связей. Подставим в разрыв переменных операторы задержки и присвоим выходным переменным операторов (переменным состояниям) имена z_3 и z_4 .

Добавленные элементы АС показаны на рис. 6 пунктиром. В результате проделанных процедур получим правильную АС комплексной модели агроэкосистемы (рис. 6). Множество моделей, образованное путем сегментации данной сети, образует базу согласованных фрагментарных моделей, для которой справедливы правила алгебры АС.