

## ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОБЩИЙ МЕТОД ОПИСАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЙ В СЛОЖНЫХ ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННЫХ СИСТЕМАХ

© 2006 г. А.В. Карнаухов

*Институт биофизики клетки РАН, 142290, Пущино Московской области*

Поступила в редакцию 01.02.05 г.

Дана строгая формулировка понятия причинно-следственной модели сложного явления и сформулированы правила представления подобных моделей в виде причинно-следственных диаграмм. Проанализировано соотношение между причинно-следственным моделированием и традиционными методами математического моделирования. Приведены примеры причинно-следственных моделей (диаграмм) явлений различной физической природы и продемонстрировано использование подобных моделей при исследовании некоторых конкретных задач. В частности, рассмотрен механизм перенормировки констант скоростей химических реакций в рамках явления диссипативного резонанса. Рассмотрен также пример перенормировки параметров климатической чувствительности и времени релаксации климатической системы Земли в рамках двухкомпонентного ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) парникового эффекта.

*Ключевые слова: причинно-следственная модель, сложные системы, иерархически организованные системы, диссипативные структуры, диссипативный резонанс, парниковый эффект, константа климатической чувствительности, тепловая инерция климатической системы, теория перенормировок.*

*Посвящается памяти И.Г. Акоева*

Прежде чем перейти к изложению основного материала, считаю необходимым отметить следующее.

Долгое время я не решался представить метод причинно-следственного моделирования как самостоятельный метод теоретического анализа сложных систем, используя его в своих работах как вспомогательный прием, позволяющий провести предварительный анализ сложной системы для дальнейшего математического моделирования. Такой предварительный причинно-следственный анализ позволил получить принципиально новые результаты, связанные с математическим исследованием ряда сложных систем самой различной физической природы. Это дало основание полагать, что метод причинно-следственного моделирования может иметь и самостоятельное значение, особенно для задач описания процессов в биологических системах, как на уровне отдельных клеток, так и на уровне целостного организма.

Знакомство с замечательной книгой И.Г. Акоева «Биофизика познает рак» [1] стало еще одним аргументом в пользу этого вывода, поскольку в ней, по существу, речь идет о создании причинно-следственной модели развития онкологического заболевания, которую автор

описывает в терминах «порочных кругов». К сожалению, непривычность подхода и неготовность читателя анализировать сложные причинно-следственные взаимосвязи явлений привели к тому, что книга И.Г. Акоева и его теория онкогенеза не получили того признания, которого, на мой взгляд, они заслуживают.

На самом деле, мы являемся свидетелями настоящей революции в естествознании. До сих пор ученые в основном изучали простые процессы, причинно-следственная структура которых была тривиальна. На каком-то этапе развития естествознания это было оправдано. К сожалению, данный подход оказался закреплен в организационной структуре современной науки – в отраслевом принципе формирования научных учреждений и журналов, жесткой специализации фондов и ученых советов. Такая организационная структура привела к формированию «жестко отраслевого» мышления среди современных ученых и крайне затруднила междисциплинарные исследования. Наиболее ярко «недостаточность» данного типа мышления проявляется в неспособности строить адекватные модели таких сложных явлений в живых системах, как онкологические заболевания, атеросклероз, старение.

Сегодня, когда все большее количество ученых осознает необходимость развития междисциплинарных исследований и интеграции накопленных знаний, теория онкогенеза И.Г. Акоева [1,2] может служить примером успешно выполненного исследования в рамках новой парадигмы естественно-научного поиска.

Развитие формализма причинно-следственного моделирования ставит задачу не только совершенствования методов исследования сложных систем, но и создания доступного языка общения ученых, работающих над междисциплинарными проблемами.

Прежде чем дать определение причинно-следственной модели, рассмотрим некоторые исходные понятия.

### 1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СОГЛАШЕНИЯ

**Определение 1.** Процесс – изменение каких-либо параметров системы во времени.

*Замечание.* Данное определение является общим, включающим в себя также понятия «явления» и «события».

**Определение 2.** Явление – это процесс, внутренняя структура которого существенна.

*Замечание.* Выделение понятия «явления» продиктовано, прежде всего, необходимостью разграничивать процессы разных ступеней иерархии. Различие между процессами и явлениями достаточно условно. Явление представляет собой процесс более высокой степени иерархии. Например, явление горения газовой смеси представляет собой совокупность таких процессов, как химическая реакция окисления, теплопроводность, газодинамические процессы, процесс распространения акустических колебаний и т.д., а с другой стороны, представляет собой один из процессов в рамках явления следующего уровня иерархии, например пожара, работы двигателя внутреннего сгорания и т.д.

**Определение 3.** Событие – процесс, в котором существенны лишь начальное и конечное состояние.

*Замечание.* Следует выделять два различных класса событий.

**Определение 4.** Элементарное событие – изменение параметров системы, разделенных минимальным интервалом времени (элементарные интервалы для дискретных моделей, инфинитезимально малые для непрерывных моделей).

**Определение 5.** Асимптотическое событие – процесс перехода системы из одного стабильного (метастабильного) состояния в другое.

На основе данных определений и сделанных выше замечаний можно дать определение причинно-следственного моделирования.

**Определение 6.**

*Причинно-следственное моделирование* – представление изучаемого явления в виде множества (совокупности) протекающих в системе процессов и задание отношений причинности на этом множестве, отражающих реальную причинно-следственную структуру явления.

*Пример:* Пусть  $P = \{p_i\}$  – множество процессов, представляющих некоторое изучаемое явление  $Z$ , а матрица  $\tilde{A} = \{a_{ik}\}$  представляет собой набор коэффициентов, характеризующих отношения причинности, таких, что:

$$a_{ik} = \begin{cases} 0, & \text{если процесс } p_k \text{ непосредственно не} \\ & \text{влияет на протекание процесса } p_i \\ & \text{(или этим влиянием можно пренеб-} \\ & \text{речь)} \\ 1, & \text{если процесс } p_k \text{ непосредственно} \\ & \text{влияет на протекание процесса } p_i \end{cases} \quad (1)$$

тогда причинно-следственная модель  $M(Z)$  явления  $Z$  представляет собой следующую конструкцию:

$$M(Z) = \{P, A\}. \quad (2)$$

**Определение 7.**

*Причинно-следственная диаграмма* некоторого явления – графическая форма представления причинно-следственной модели в виде направленного графа, где узлами графа являются процессы, а стрелками обозначено наличие причинно-следственного влияния между процессами.

*Пример:*

Пусть изучаемое явление  $Z$  представлено процессами  $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ , а причинная матрица  $a_{ik}$  имеет следующий набор коэффициентов:

$$a_{ik} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

тогда причинно-следственная диаграмма будет иметь следующий вид (рис. 1).

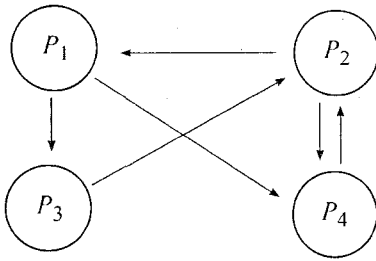


Рис. 1. Пример причинно-следственной диаграммы явления, представленного процессами  $p_1, p_2, p_3, p_4$ .

Сформулированы основные соглашения об обозначениях для причинно-следственных диаграмм:

*Явление*, причинно-следственная структура которого изучается, обозначается в виде пунктирной линии, ограничивающей некоторую область, где располагаются процессы, входящие в состав изучаемого явления. Название явления записывается в прямоугольной рамке, включаемой в разрыв пунктирной линии. Внешние для данного явления процессы (внешние параметры) располагаются за пределами области, ограниченной пунктирной линией.

*Процессы*, входящие в состав изучаемого явления, обозначаются динамическими параметрами (переменными), изменяющимися в результате протекания данного процесса. Параметры на причинно-следственной диаграмме могут помещаться в кружок (овал).

*Внешние процессы* обозначаются аналогично внутренним, но располагаются за пределами области, ограниченной пунктирной линией.

*Причинно-следственная связь* между процессами изображается в виде стрелки, которая указывает на процесс, являющийся следствием:

Замечание 1. Качественно степень причинно-следственного влияния может отображаться толщиной линий.

Замечание 2. Комментарии к причинно-следственной связи могут записываться рядом со стрелкой (например, список постоянных параметров модели).

Замечание 3. Ускоряющие и тормозящие причинно-следственные связи могут изображаться линиями разного цвета или начертания (в пп. 2.2 и 2.3. настоящей работы сплошными линиями обозначаются ускоряющие, а пунктирными – тормозящие причинно-следственные связи).

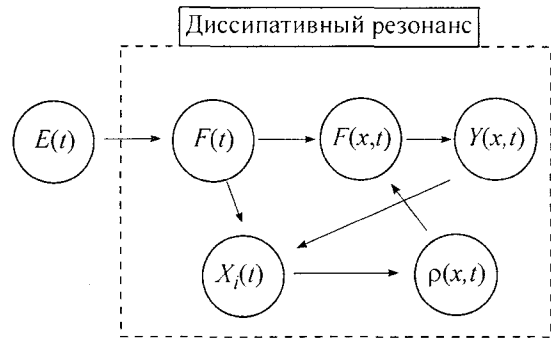


Рис. 2. Причинно-следственная модель явления диссипативного резонанса.

## 2. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕКОТОРЫХ ЯВЛЕНИЙ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ

**2.1. Диссипативный резонанс.** Диссипативный резонанс представляет собой явление нарастания колебаний в системе под действием периодической силы за счет возникновения в системе структуры порядка. В предыдущих работах [3–6] были проанализированы условия возникновения и приведены примеры модельных систем, в которых может наблюдаться явление диссипативного резонанса. Более того, в последних работах [7–9] для наиболее простых модельных систем удалось получить точные решения. Вместе с тем во всех (включая простейшие) системах, в которых наблюдается явление диссипативного резонанса, содержится нетривиальный набор причинно-следственных связей, входящих в это явление процессов. Рассмотрим более подробно причинно-следственную модель явления диссипативного резонанса, представленную в виде диаграммы на рис. 2.

В общем случае система, в которой наблюдается явление диссипативного резонанса, состоит из вязкоупругой среды и некоторого множества дискретных объектов (например, это могут быть ионы какого-либо вещества), которые, с одной стороны, являются рецепторами внешнего периодического воздействия, а с другой – обладают возможностью перемещения в этой вязкоупругой среде. Набор переменных  $x_i(t)$  описывает изменение пространственного положения данных дискретных объектов. Внешнее воздействие (например, электромагнитное поле)  $E(t)$  действует как периодическая сила  $F(t)$  ( $E(t) \rightarrow F(t)$ ) на объекты – рецепторы внешнего воздействия (ионы). Имеющаяся начальная не-

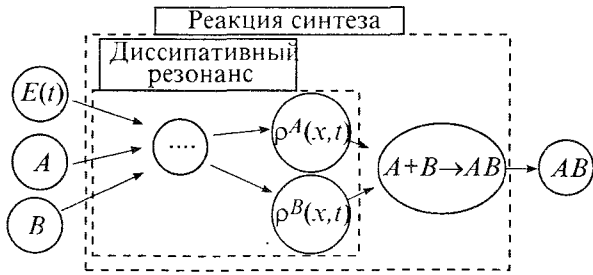


Рис. 3. Причинно-следственная диаграмма реакции синтеза при внешнем периодическом воздействии с раскрытием механизма изменения макроскопических скоростей химических реакций.

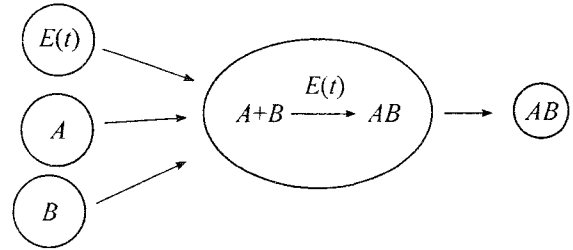


Рис. 4. Причинно-следственная диаграмма реакции синтеза при внешнем периодическом воздействии как элементарный процесс.

равномерность распределения объектов-рецепторов (ионов)  $\rho(x,t)$  приводит к неравномерному распределению силы, действующей на вязкоупругую среду  $F(x,t)$  ( $F(t), \rho(x,t) \rightarrow F(x,t)$ ). Это, в свою очередь, приводит к возникновению колебаний в вязкоупругой среде  $Y(x,t)$  ( $F(x,t) \rightarrow Y(x,t)$ ). Важно подчеркнуть, что колебания вязкоупругой среды всегда имеют частоту, совпадающую с частотой внешнего воздействия  $E(t)$ . Это приводит к тому, что при наличии определенных условий (свойств среды и объектов – рецепторов взаимодействия) наряду с быстрым движением объектов – рецепторов (ионов) вместе с колебаниями среды может происходить их относительно медленный дрейф относительно вязкоупругой среды  $X_i(t)$  ( $F(t), Y(x,t) \rightarrow X_i(t)$ ), что также при определенных условиях будет приводить к формированию структуры порядка – неоднородной концентрации объектов – рецепторов  $\rho(x,t)$  ( $X_i(t) \rightarrow \rho(x,t)$ ) и к увеличению амплитуды колебаний среды  $F(x,t)$  ( $F(t), \rho(x,t) \rightarrow F(x,t)$ ).

Явление диссипативного резонанса может влиять на макроскопическую скорость химических реакций, протекающих в вязкоупругой среде. Действительно, нетрудно показать, как возникновение микроконцентрационных неоднородностей  $\rho^A(x,t), \rho^B(x,t)$  веществ, участвующих в реакции синтеза  $A + B \rightarrow AB$  вызывает изменение макроскопической константы химической реакции  $C_{AB}(E(t))$ . Рассмотрим изменение средней концентрации продукта химической реакции  $\rho^{AB}(t)$ , которое может быть выражено как через макроскопические  $C_{AB}(E(t)), \rho^A, \rho^B$ , так и через микроскопические параметры  $c_{AB}, \rho^A(x,t), \rho^B(x,t)$ :

$$\frac{d\rho^{AB}(t)}{dt} = C_{AB}(E(t))\rho^A\rho^B = \frac{1}{V} \int_V c_{AB} \rho^A(x,t) \rho^B(x,t) d^3x, \quad (4)$$

где средние макроскопические концентрации  $\rho^A, \rho^B$  реагирующих веществ  $A, B$  следующим образом связаны с микроконцентрациями  $\rho^A(x,t), \rho^B(x,t)$ :

$$\rho^A = \frac{1}{V} \int_V \rho^A(x,t) d^3x, \quad (5)$$

$$\rho^B = \frac{1}{V} \int_V \rho^B(x,t) d^3x.$$

Важно подчеркнуть здесь также тот факт, что микроскопическая скорость химической реакции  $c_{AB}$  принципиально не содержит зависимости от микроконцентраций веществ  $A, B$ . В то же самое время макроскопическая константа  $C_{AB}(E(t))$  зависит от распределения микроконцентраций  $\rho^A(x,t), \rho^B(x,t)$ , а следовательно, зависит от внешнего периодического воздействия на систему  $E(t)$

$$C_{AB}(E(t)) = c_{AB} \frac{\frac{1}{V} \int_V c_{AB} \rho^A(x,t) \rho^B(x,t) d^3x}{\rho^A \rho^B}. \quad (6)$$

Причинно-следственная диаграмма реакции синтеза  $A + B \rightarrow AB$  в присутствии внешнего периодического воздействия показана на рис. 3.

Важно отметить, что с точки зрения макроскопического наблюдателя воздействие внешнего периодического воздействия в рамках явления диссипативного резонанса приводит лишь к изменению скорости химической реакции, что можно отобразить в виде следующей причинно-следственной диаграммы (рис. 4).

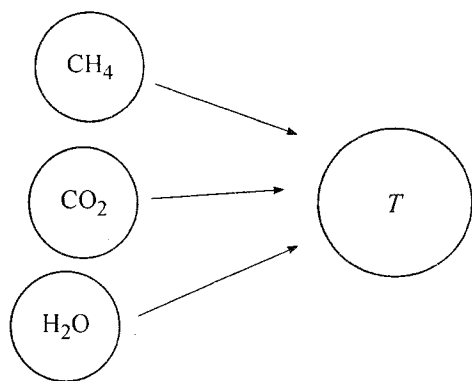


Рис. 5. Причинно-следственная диаграмма явления парникового эффекта.

Нетрудно видеть, что причинно-следственные диаграммы, изображенные на рис. 2–4, описывают явления различных уровней иерархии. Если причинно-следственная диаграмма диссипативного резонанса на рис. 2 детально рассматривает это явление как совокупность более элементарных процессов, то на причинно-следственной диаграмме химической реакции (рис. 3) диссипативный резонанс рассматривается как элементарный процесс, входящий в рассматриваемое явление. Диаграмма на рис. 4 представляет уже химическую реакцию, протекающую в условиях внешнего периодического воздействия, как элементарный процесс, который может рассматриваться в рамках явлений следующего уровня иерархии (например, каскадов химических реакций).

Здесь мы должны обратить внимание на существенное упрощение при переходе к высшим уровням иерархии. Достаточно сложный, требующий для своего описания значительное количество переменных процесс оказывается возможным свести к простой перенормировке константы скорости химической реакции.

Подобная процедура перенормировки, впервые разработанная для фейнмановских диаграмм, по-видимому, является достаточно общим и полезным приемом при исследовании сложных иерархически организованных систем. Ниже мы рассмотрим еще один пример использования процедуры перенормировки.

**2.2. Перенормировка константы климатической чувствительности при учете сильной положительной обратной связи «среднепланетарная температура – концентрация паров воды в атмосфере».** В наших предыдущих работах уже анализировались причинно-следственные модели различных климатообразующих явлений, таких как парниковая катастрофа [10–14], периодические оледенения в Северном полушарии,

происходящих вследствие перестройки картины течений в Северной Атлантике [15–17], и некоторые другие. В данной работе мы рассмотрим более подробно явление, называемое парниковым эффектом. Причинно-следственная диаграмма парникового эффекта, как его обычно принято рассматривать, изображена на рис. 5.

Учитывая, что средняя концентрация паров воды в атмосфере практически не зависит от деятельности человека, а определяется средней температурой окружающего воздуха, и исключая из рассмотрения другие парниковые газы (для упрощения описания), приходим к следующей причинно-следственной диаграмме.

Покажем, что учет сильной положительной связи «среднепланетарная температура-концентрация паров воды в атмосфере» сводится к перенормировке константы климатической чувствительности, связанной с наличием CO<sub>2</sub> в атмосфере ( $\sigma_{\text{CO}_2}$ ). Действительно, для приращений температуры и концентрации водяных паров имеем:

$$dT = \sigma_{\text{CO}_2} \frac{d\rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}} + \sigma_{\text{H}_2\text{O}} \frac{d\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (7a)$$

$$d\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \left( \frac{\delta}{\sigma_{\text{H}_2\text{O}}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} \right) dT, \quad (7b)$$

где (7a) непосредственно следует из выражения для величины дифференциального парникового эффекта:

$$\Delta T = \sigma_{\text{CO}_2} \ln \left( \frac{\rho_{\text{CO}_2} + \Delta \rho_{\text{CO}_2}}{\rho_{\text{CO}_2}} \right) + \sigma_{\text{H}_2\text{O}} \ln \left( \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}} + \Delta \rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} \right), \quad (8)$$

более подробный вывод которого можно посмотреть, например, в [14], а (7b) представляет собой аппроксимацию изменения средней влажности воздуха при изменении температуры. При этом близкая к экспоненте форма зависимости отражает примерно экспоненциальную зависимость давления насыщенных паров воды от температуры, а коэффициент  $\delta$  выбирается исходя из того эмпирического факта, что средняя относительная влажность атмосферного воздуха составляет около 70%.

Подставляя выражение для  $d\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  (7b) в (7a) получим:

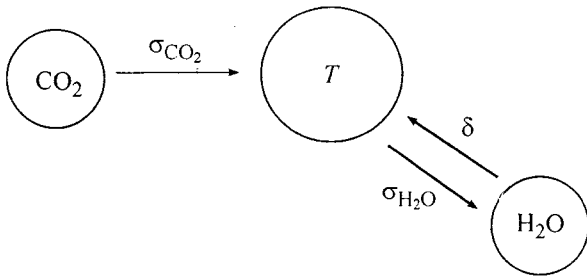


Рис. 6. Причинно-следственная диаграмма явления парникового эффекта с учетом сильной положительной обратной связи «среднепланетарная температура-концентрация паров воды в атмосфере».

$$dT = \sigma_{CO_2} \frac{d\rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \sigma_{H_2O} \frac{\left(\frac{\delta}{\sigma_{H_2O}} \rho_{H_2O}\right) dT}{\rho_{H_2O}} = \sigma_{CO_2} \frac{d\rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \delta dT \quad (9)$$

и окончательно:

$$dT = \frac{\sigma_{CO_2}}{(1 - \delta)} \frac{d\rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} = \sigma'_{CO_2} \frac{d\rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}}, \quad (10)$$

где  $\sigma'_{CO_2} = \frac{\sigma_{CO_2}}{(1 - \delta)}$  – величина климатической чувствительности, перенормированная с учетом вклада паров воды в суммарный парниковый эффект. При этом причинно-следственную диаграмму парникового эффекта можно упростить, исключив из нее группу процессов, связанных с изменением концентрации паров воды (рис. 7).

Отметим здесь нетривиальный характер такого исключения. Дело в том, что пары воды дают в настоящий момент существенно больший (более чем в 10 раз) энергетический вклад в суммарный парниковый эффект по сравнению с  $CO_2$ , но именно углекислый газ является здесь ключевым (управляющим) параметром.

**2.3. Перенормировка времени релаксации климатической системы при учете сильной положительной обратной связи «среднепланетарная температура – концентрация паров воды в атмосфере».** Выполненная в предыдущем параграфе перенормировка константы климатической чувствительности является достаточно хорошо известным приемом в современной климатологии. Вместе с тем оценка конкретных параметров  $\sigma_{CO_2}$ ,  $\sigma_{H_2O}$ ,  $\delta$  методами аналитических рас-

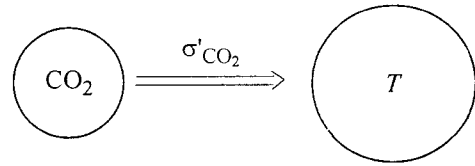


Рис. 7. Учет положительной обратной связи «среднепланетарная температура – концентрация паров воды в атмосфере» через перенормировку константы климатической чувствительности.

четов невозможна, а методами численных расчетов выполняется с большой погрешностью.

Поэтому при оценке величины перенормированной (суммарной) климатической чувствительности используются данные инструментальных наблюдений за изменением температуры и концентрации  $CO_2$  за последние примерно 100 лет. Принимая, что среднепланетарная температура Земли за указанное время изменилась примерно на 0,8 К, а концентрация  $CO_2$  примерно на 35%, получим оценку для  $\sigma_{CO_2}$ :

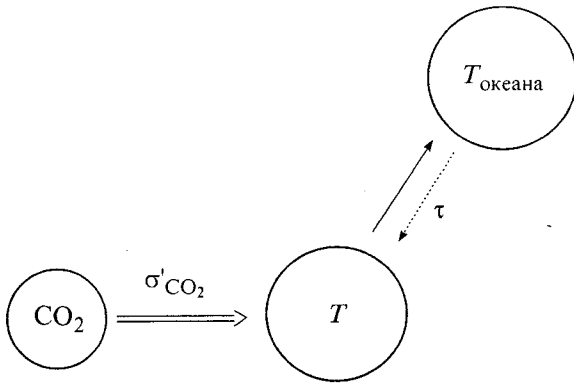
$$\sigma_{CO_2} = 2,66 \text{ К (или в единицах удвоения концентрации } CO_2: \sigma_{2 \times CO_2} = 1,8 \text{ К)}. \quad (11)$$

С другой стороны, имеющиеся палеоклиматические данные анализа ледяных кернов [18,19] и кернов донных отложений [20] свидетельствуют о гораздо больших изменениях температуры в прошлом ( $\Delta T$  составляет до 10 К), сопровождающих изменение концентрации  $CO_2$  от 200 до 280 ppm, что примерно соответствует 40% изменения концентрации  $CO_2$ . Если теперь произвести оценку суммарной климатической чувствительности исходя из этих данных, то получится следующая величина:

$$\sigma'_{CO_2} = 29 \text{ К (или в единицах удвоения концентрации } CO_2: \sigma'_{2 \times CO_2} = 20 \text{ К)}, \quad (12)$$

которая существенно выше величины суммарной климатической чувствительности, полученной исходя из приведенных выше данных инструментальных наблюдений (13). Такое драматическое расхождение оценок до сих пор в климатологической литературе не получило общепринятого объяснения и существенно подрывает доверие к исследованиям в этой области.

Следует отметить, что такое расхождение достаточно легко могло бы быть объяснено учетом тепловой инерции климатической сис-



**Рис. 8.** Пример некорректной причинно-следственной диаграммы, учитывающей тепловую инерцию мирового океана, в которой только часть причинно-следственных связей представлена перенормированными величинами.

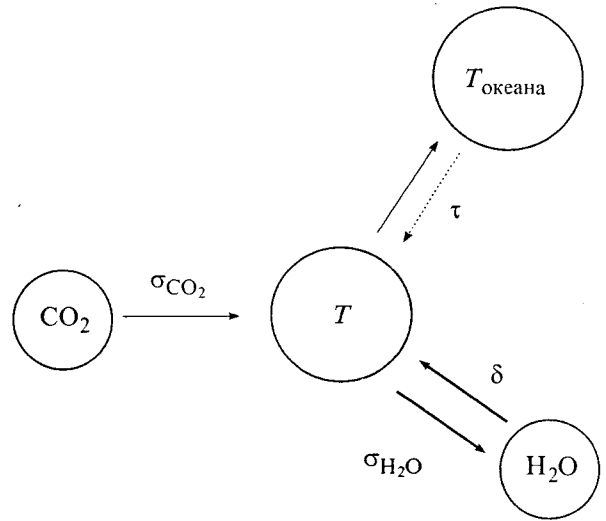
темы, однако прямые оценки времени релаксации дают значение этой величины порядка 10 лет, что недостаточно для объяснения столь существенных различий в оценках климатической чувствительности.

Ниже мы покажем, что учет положительной обратной связи «среднепланетарная температура – концентрация паров воды в атмосфере» должен быть произведен не только при перенормировке параметра суммарной климатической чувствительности, но и при перенормировке параметра времени релаксации климатической системы. Иными словами, рассмотрение упрощенной причинно-следственной диаграммы (рис. 7) с включением в нее группы процессов, описывающих теплообмен атмосферы с верхней (конвективной) зоной Мирового океана (рис. 8) некорректно.

Для корректного учета роли паров воды нужно вернуться к исходной подробной причинно-следственной модели, представленной в виде диаграммы на рис. 9, а затем уже переходить к упрощенной модели с перенормированными параметрами (рис. 10).

Чтобы выполнить процедуру перенормировки, запишем систему уравнений для приращения среднепланетарной температуры  $dT$  и концентрации паров воды  $\Delta\rho_{H_2O}$  в рамках исходной причинно-следственной модели, учитывающей тепловую инерцию климатической системы:

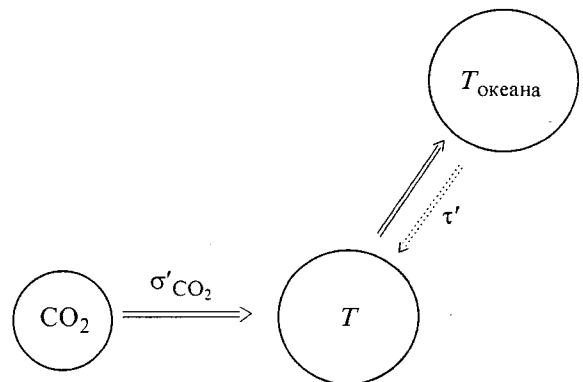
$$dT = \frac{1}{\tau} \left( \sigma_{CO_2} \frac{\Delta\rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \sigma_{H_2O} \frac{\Delta\rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} - \Delta T \right) dt, \quad (13a)$$



**Рис. 9.** Подробная причинно-следственная диаграмма явления парникового эффекта с учетом как сильной положительной обратной связи «среднепланетарная температура – концентрация паров воды в атмосфере», так и тепловой инерции Мирового океана без перенормировки основных климатических параметров.

$$\Delta\rho_{H_2O} = \left( \frac{\delta}{\sigma_{H_2O} \rho_{H_2O}} \right) \Delta T, \quad (13б)$$

где  $\Delta\rho_{CO_2} \ll \rho_{CO_2}$ ,  $\Delta\rho_{H_2O} \ll \rho_{H_2O}$ ,  $\tau$  – неперенормированная величина климатической чувствительности, а  $\Delta T$  определяется следующим образом:



**Рис. 10.** Подробная причинно-следственная диаграмма явления парникового эффекта, в которой и константа климатической чувствительности, и параметр, описывающий тепловую инерцию Мирового океана, перенормированы с учетом сильной обратной связи основных климатических параметров «среднепланетарная температура – концентрация паров воды в атмосфере».

$$\Delta T = \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) dt. \quad (14)$$

Подставляя  $\Delta \rho_{H_2O}$  (13б) в (13а), получим выражение:

$$\begin{aligned} dT &= \frac{1}{\tau} \left( \sigma_{CO_2} \frac{\Delta \rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \sigma_{H_2O} \frac{\left( \frac{\delta}{\sigma_{H_2O}} \rho_{H_2O} \right) \Delta T}{\rho_{H_2O}} - \Delta T \right) dt = \\ &= \frac{1}{\tau} \left( \sigma_{CO_2} \frac{\Delta \rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \delta \Delta T - \Delta T \right) dt = \\ &= \frac{1}{\tau} \left( \sigma_{CO_2} \frac{\Delta \rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} - (1 - \delta) \Delta T \right) dt = \\ &= \frac{(1 - \delta)}{\tau} \left( \frac{\sigma_{CO_2}}{(1 - \delta)} \frac{\Delta \rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} - \Delta T \right) dt, \end{aligned} \quad (15)$$

что эквивалентно системе уравнений для «упрощенной системы» (рис. 10) с перенормированными параметрами:

$$dT = \frac{1}{\tau'} \left( \sigma'_{CO_2} \frac{\Delta \rho_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} - \Delta T \right) dt, \quad (16)$$

где перенормирован не только параметр климатической чувствительности:

$$\sigma'_{CO_2} = \frac{\sigma_{CO_2}}{(1 - \delta)}, \quad (17)$$

но и постоянная времени климатической системы:

$$\tau' = \frac{\tau}{(1 - \delta)}, \quad (18)$$

причем параметр перенормировки для обеих величин одинаков и равен  $\frac{1}{(1 - \delta)}$ . С учетом данного перенормировочного множителя эффективная постоянная времени климатической системы может достигать величины 200 и более лет, что позволяет согласовать палеоклиматические и инструментальные данные наблюдения за климатом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здесь важно сделать несколько замечаний относительно места и роли причинно-следственного моделирования в общей схеме исследова-

ования явлений в сложных иерархически организованных системах.

1. Построение причинно-следственной модели является желательным, а в ряде случаев необходимым предварительным этапом для последующего более детального численного или аналитического моделирования с использованием традиционных методов.

2. Причинно-следственное моделирование, не сопряженное с необходимостью освоения громоздкого современного аппарата теоретической и математической физики, вполне доступно широкому кругу специалистов, работающих в самых различных областях, в том числе далеких от теоретической физики и математики.

3. Стандартизация обозначений при построении причинно-следственных диаграмм может выполнять важную коммуникативную функцию, поскольку в компактной и наглядной форме позволяет представить картину взаимовлияния происходящих в системе процессов, словесное описание которой не только потребовало бы существенно больше места, но и было бы значительно труднее для восприятия.

4. Причинно-следственное моделирование помогает также решить очень важную задачу интеграции знаний. Высокая степень специализации современной науки приводит к тому, что различные группы исследователей, изучая различные стороны одного и того же явления, зачастую с трудом могут соотнести полученные результаты, не говоря уже о генерации целостного представления об изучаемом явлении. Построение причинно-следственных диаграмм дает в руки исследователей своеобразный метаязык, позволяющий «объединять» знания, относящиеся к общему изучаемому явлению.

5. Несмотря на доступность причинно-следственного моделирования, создание адекватной, целостной причинно-следственной модели сложного явления можно считать весьма нетривиальной эвристической задачей. Действительно, явление, включающее в себя  $N$  процессов, может иметь  $2^M$  (где  $M = N^2$ ) различных причинно-следственных моделей (например, для  $N = 4$  (рис. 1) около 60000 (!) различных причинно-следственных диаграмм).

По-видимому, построение адекватных причинно-следственных моделей (диаграмм) должно рассматриваться в качестве полноценного научного результата наряду с такими традиционными научными результатами как экспериментальное обнаружение (уточнение) новых научных фактов, построение численной модели или разработка аналитической теории.



6. Программной задачей при развитии методологии причинно-следственного моделирования является создание формализма аналогичного лагранжу (или гамильтонову) формализму для задач классической механики или технике фейнмановских диаграмм в квантовой теории поля [21,22].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акоев И.Г.* Биофизика познает рак. М.: Наука, 1988, 160 с.
2. *Акоев И.Г., Мотлох Н.Н.* Биофизический анализ предпатологических и предлейкозных состояний. М.: Наука, 1984, 288 с.
3. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1994. Т. 39, вып. 6. С. 1009–1014.
4. *Карнаухов А.В., Новиков В.В.* // Биофизика. 1996. Т. 41, № 24. С. 916–918.
5. *Novikov V.V., Karnaukhov A.V.* // Bioelectromagnetics. 1997. V. 18. P. 25–27.
6. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1997. Т. 42, вып. 4. С. 985–992.
7. *Карнаухов А.В., Пономарев В.О.* // Медицинская электроника. 2001. Вып. 8. С. 35–38.
8. *Пonomarev В.О., Карнаухов А.В.* // Биофизика. 2002. Т. 47, вып. 5. С. 825–832.
9. *Пonomarev В.О., Карнаухов А.В.* // Биомедицинская технология и радиоэлектроника. 2003. Вып. 3. С. 39–44.
10. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1994. Т. 39, вып. 1. С. 148–152.
11. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1996. Т. 41, вып. 2. С. 523–526.
12. *Карнаухов А.В., Карнаухов В.Н.* // Биофизика. 1998. Т. 43, вып. 6. С. 1106–11121.
13. *Карнаухов В.Н., Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1999. Т. 44, вып. 1. С. 143–144.
14. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 2001. Т. 46, вып. 6. С. 1078–1088.
15. *Карнаухов А.В.* // Биофизика. 1994. Т. 39, вып. 6. С. 1094–1098.
16. *Карнаухов А.В., Карнаухов В.Н.* // Природа. 1997. Вып. 1. С. 46–55.
17. *Карнаухов А.В., Карнаухов В.Н.* // Биофизика. 1999. Т. 44, вып. 4. С. 750–761.
18. *Barnola J.M., Pimienta P., Raynaud D., Korotkevich Y.S.* // Tellus. 1991. V. 43B. P. 83–90.
19. *Семилетов И.П., Гусев А.М., Барков Н.И. и др.* // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309. С. 196–199.
20. *Pichon J.J., Laberyrie L.D., Barelille G., et al.* // Paleooceanography. 1992. V. 7. P. 289–318.
21. *Владимиров Ю.С., Карнаухов А.В.* // Изв. вузов. Физика. 1987. Вып. 3. С. 49–54.
22. *Кулаков Ю.И., Владимиров Ю.С., Карнаухов А.В.* Введение в теорию физических структур и бинарную геометрофизику. М.: Изд-во Архимед, 1992. С. 1–183.
23. *Карнаухов А.В.* // Биологические эффекты слабых электромагнитных излучений. Пушкино, ИБК РАН, 2002. С. 103–113.

## Cause-Effect Modeling as a General Method of Description and Study of Phenomena in Complex Hierarchical Systems

A.V. Karnaukhov

*Institute of Cell Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia*

The definition of the cause-effect model of a phenomenon and the rules of presenting these models in the form of cause-effect diagrams have been formulated. The relationship between cause-effect modeling and traditional methods of mathematical modeling has been analyzed. Examples of cause-effect models (diagrams) of phenomena of different physical nature are given, and the application of these models in studies of some problems is demonstrated. In particular, the mechanism of renormalizing the rate constants of chemical reactions in terms of dissipative resonance is considered. In addition, the renormalization of the climate sensitivity parameters and the relaxation time of the Earth climate system in terms of the two-component ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ ) greenhouse effect is considered.

*Key words: cause-effect system, complex systems, hierarchical systems, dissipative structures, dissipative resonance, greenhouse effect, climate sensitivity constants, thermal inertia of the climate system, renormalization theory*