

**Научно-популярная лекция для молодежи**  
**Тема: «Окружающий мир – мир сложных систем»**  
**Автор: Моргунов Евгений Павлович**

Лекция подготовлена при поддержке  
гранта Красноярского краевого фонда науки 4PL26 за 2007 г.

## **1. Введение**

Слова «система», «систематический», «системный» встречаются в повседневной речи современных людей все чаще. Сегодня мы нередко слышим: «системный кризис», говорим о проблемах в системе здравоохранения и в системе образования. И даже люди, не занимающиеся разработкой компьютерных программ, знают, что такое операционная система и система управления базой данных. Таким образом, на бытовом, на интуитивном уровне все мы имеем некоторое представление о том, что означает термин «система». Но для более полного понимания закономерностей развития сложных систем, окружающих нас, необходимо дать более четкие определения основных терминов, имеющих отношение к области систем.

Начнем с определения главного термина – «системы». Существует несколько десятков определений этого понятия. Значительное их число приведено в книге В. Н. Волковой «Из истории теории систем и системного анализа» [5]. Одно из самых простых определений принадлежит основателю теории систем Л. фон Берталанфи: «система – комплекс взаимодействующих компонентов». Он предлагал еще и такой вариант: «система – совокупность элементов, находящихся в определенных отношениях друг с другом». Для полноты картины приведем еще несколько определений, каждое из которых делает упор на тех или иных аспектах определяемого понятия.

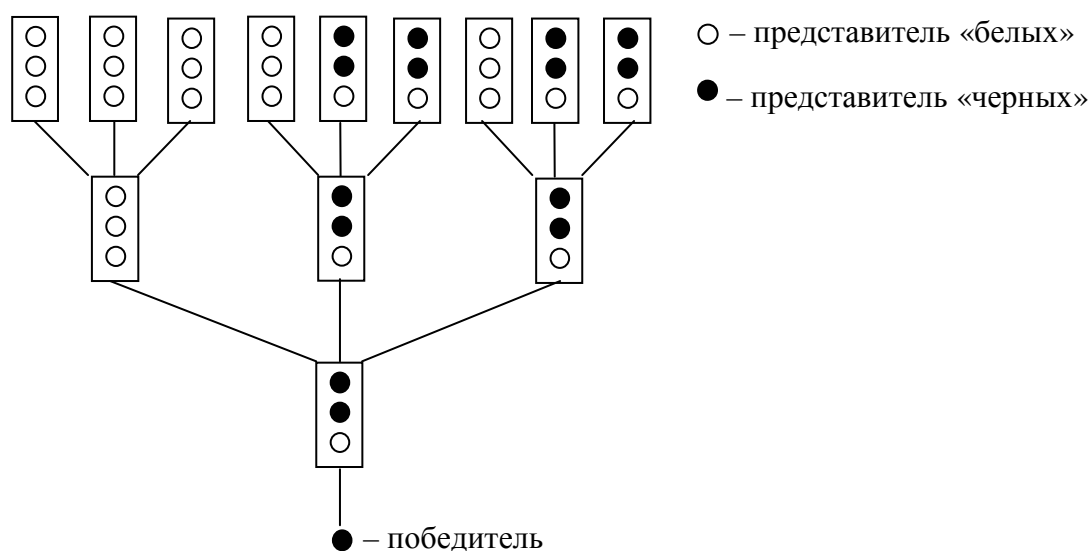
Американский кибернетик и системный аналитик Р. Акофф считает так: «система – любая сущность, концептуальная или физическая, которая состоит из взаимодействующих частей». А его всемирно известный английский коллега С. Бир говорит, что «система – любой комплекс динамически связанных элементов». Автор одной из первых в Советском Союзе переводных книг по системному анализу С. Оптнер заявляет, что «система есть средство решения проблемы». По мнению же одного из основателей «системного» движения в Советском Союзе Ф. Е. Темникова, «система – организованное множество».

Существуют и более сложные, более, если так можно выразиться, «научные» определения этого термина. Например, определение, данное В. Н. Сагатовским, следующее: «система – конечное множество функциональных элементов и отношений между ними, выделенное из среды в соответствии с определённой целью в рамках определённого временного интервала». Один из тех ученых, кто стоял у истоков системного анализа в СССР, Ю. И. Черняк, давал такое определение: «система – отражение в сознании субъекта (исследователя, наблюдателя) свойств объектов и их отношений в решении задачи исследования, познания».

В ходе развития терминологии было решено использовать понятие системы в качестве абстракции для описания и изучения сложных объектов. Поэтому ряд авторов предлагают различать *понятие* системы и саму систему, которая является *объективной реальностью*.

В приведенных определениях прозвучало понятие элемента, или части. Элемент – это часть системы, которая является пределом ее деления, расчленения. Конечно, элементы определяются с учетом специфики решаемой задачи по изучению системы. Например, с точки зрения большой организации или предприятия отдельный человек, при всем к нему уважении, является элементом. Но для врача или биолога человек сам представляет сложнейшую систему, состоящую из ряда подсистем и множества эле-

ментов, объединенных множеством связей. В свою очередь совокупность наиболее существенных элементов и связей есть не что иное, как структура системы. Структура показывает устройство, или строение системы. Важным является тот факт, что системы, состоящие из одних и тех же элементов, но объединенных в различные структуры, могут иметь совершенно разные свойства. В качестве примеров можно привести свойства таких минералов как алмаз и графит, которые состоят из атомов углерода, но имеют различную структуру. Еще одним примером может служить параллельное и последовательное соединение проводников в электротехнике. Различные процессы, протекающие в природе и обществе, также имеют свою структуру. В качестве одного интересного примера структуризации процесса приведем способ организации процедуры голосования. Если эту процедуру структурировать так, чтобы она проходила в несколько этапов, то можно получить, казалось бы, парадоксальный результат. Пусть имеется 2 коалиции: «черные» (8 голосов) и «белые» (19 голосов). Тогда при проведении голосования в три тура в результате возможна победа малочисленной группы «черных». Для этого требуется лишь соответствующим образом сгруппировать «черных» и «белых» на первом этапе, как показано на рисунке.



В качестве родоначальника теории систем называют австрийского биолога Людвиг фон Бергаланфи. Он написал свои основополагающие работы в 40-х гг. XX века. Однако еще за двадцать лет до этого русский ученый А. А. Богданов (Малиновский) предложил новую теорию, которую он называл «тектологией», или «организационной наукой». Однако в те годы его новаторские идеи не были восприняты в полной мере. Этот разносторонний исследователь плодотворно работал и в других областях. Он был философом и автором научно-фантастических романов о будущем обществе, занимался медицинскими исследованиями.

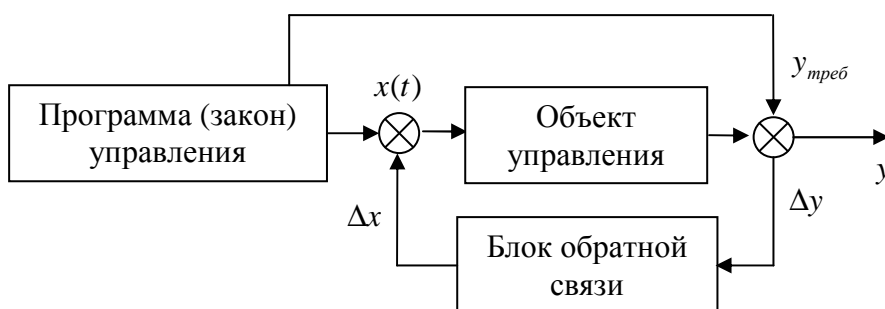
Развитие системных представлений привело к созданию в 40-х – 50-х гг. XX века новой науки – кибернетики. Ее основателем стал американский математик Норберт Винер. Кибернетика – наука об управлении. Управление – это воздействие на систему для достижения поставленной цели. Известный американский ученый, который также был биологом по образованию, У. Росс Эшби сформулировал закон «необходимого разнообразия» [11]. Этот закон играет важную роль в выборе стратегии и механизма управления сложными системами. Под разнообразием понимается сложность системы, разнообразие возможных ее состояний, разнообразие методов решения проблем. Суть этого закона в том, что сложная система, создаваемая для решения какой-то проблемы, должна иметь большее разнообразие, чем решаемая проблема. То есть, лицо, принимающее решения (ЛПР), должно иметь в своем арсенале такой набор методов решения

сложных проблем, которого будет достаточно для реагирования на все проблемы, которые только могут возникнуть в управляемой системе.

С. Бир отмечает, что люди в политическом контексте создают огромное разнообразие, которое как-то должно сокращаться, если правительство не хочет быть им раздавленным. Он приводит примеры типичных методов уменьшения разнообразия при демократическом правлении [4, с. 291]:

- формирование партий, представляющих крупные блоки разнообразия по всей стране;
- избрание представителей от крупных блоков разнообразия из разных регионов, частей страны;
- разделение времени, во-первых, на сроки пребывания на высших официальных постах, во-вторых, на сроки проведения выборов. Тем самым искусственно вводятся периоды относительной стабильности.

В рамках кибернетики было введено очень важное понятие – понятие «обратной связи». Приведем его иллюстрацию.



Здесь  $x(t)$  – управляющее воздействие;  $y_{\text{треб}}$  – требуемое значение выходного сигнала;  $\Delta y$  – отклонение значения выходного сигнала от требуемого уровня;  $\Delta x$  – изменение величины управляющего воздействия;  $y$  – фактический результат.

Если в технических системах использование обратной связи довольно легко проиллюстрировать, то с организационными системами дело обстоит несколько труднее.

Обратная связь может быть как положительной, так и отрицательной. Назначение положительной обратной связи заключается в том, чтобы обеспечивать сохранение тенденции изменения того или иного выходного параметра. А вот отрицательная обратная связь, напротив, направлена на противодействие таким изменениям, то есть на сохранение, стабилизацию требуемого значения выходного параметра. Высока роль обратной связи в процессах саморегулирования и развития систем, в их «умении» приспособляться к изменяющимся условиям окружающей среды.

Система может иметь цель, т. е. некий конечный результат функционирования, некоторое желаемое состояние, которого требуется достичь. Р. Акофф вводит даже понятие целеустремленных систем.

Системность окружающего мира подчеркивали многие известные ученые и исследователи. В частности, тот же Р. Акофф считал: «Нужно перестать поступать так, словно природа делится на дисциплины, как в университетах».

С. Бир отмечал, что «определение любой конкретной системы является произвольным. Вполне обоснованно ножницы можно назвать системой. Однако более сложная совокупность элементов, включающая, например, работницу, режущую что-нибудь ножницами, также является подлинной системой. В свою очередь работница с ножницами представляет часть более крупной системы производства какого-либо изделия и т. д.» [3, с. 22].

## 2. Сложные системы

С. Бир приводит такой пример. Рассмотрим совокупность объектов, состоящую из  $n$  элементов. Если не считать их системой, то для выяснения природы этих элементов пришлось бы выполнить  $n$  отдельных исследований. Однако если считать это множество элементов системой, перед нами возникает задача исследования не только самих  $n$  элементов, но также и  $n(n - 1)$  связей между ними. Число связей в общем случае будет именно таким, поскольку связь элемента  $A$  с элементом  $B$  не обязательно определяет и связь элемента  $B$  с элементом  $A$ . Возьмем в качестве примера систему, состоящую всего лишь из семи элементов. Внутри такой системы может существовать максимум сорок две связи. Если подойти к делу упрощенно и определить состояние изучаемой нами системы конфигурацией цепи, в которой каждая из этих связей реализована или отсутствует (не учитывая силу связей, их тип и т. д.), то число различных состояний, в которых может находиться система, составит  $2^{42}$ . Это очень большое число, оно превышает  $4 \cdot 10^{12}$  [3, с. 24–25].

Как видим, исследование даже не самых больших систем является сложной задачей.

Предложено много различных классификаций систем. Но, пожалуй, одной из наиболее важных из них можно считать классификацию систем по степени их сложности, поскольку сложность влияет на возможность познания, исследования системы. Британский кибернетик С. Бир предложил следующую, как он выразился, произвольную, классификацию систем.

«В нашей произвольной классификации систем целесообразно исходить из двух четких критериев. Первым, бесспорно существенным, критерием можно считать степень *сложности* системы. Приняв этот критерий, мы получаем возможность разделить все системы на три класса. Наименее сложные системы, которые мы будем рассматривать, назовем *простыми динамическими системами*. Системы, не являющиеся простыми и отличающиеся разветвленной структурой и большим разнообразием внутренних связей, назовем *сложными системами, поддающимися описанию*. Наконец, мы будем рассматривать системы настолько сложного вида, что хотя их и можно называть сложными, но точно и подробно описать их уже нельзя. Мы будем называть такие системы *очень сложными*.

Вторым существенным критерием, на котором основывается наша классификация, является различие между *детерминированными* и *вероятностными* системами. Эти мудреные определения можно очень просто пояснить. Детерминированной системой следует считать систему, в которой составные части взаимодействуют точно предвидимым образом. При исследовании детерминированной системы никогда не возникает никакой неопределенности. Если задано предыдущее состояние системы и известна программа переработки информации, то, определив динамическую структуру системы, всегда можно безошибочно предсказать ее последующее состояние. Напротив, для вероятностной системы нельзя сделать точного детального предсказания. Такую систему можно тщательно исследовать и установить с большой степенью вероятности, как она будет вести себя в любых заданных условиях. Однако система все-таки остается неопределенной, и любое предсказание относительно ее поведения никогда не может выйти из логических рамок вероятностных категорий, при помощи которых это поведение описывается. Швейная машинка является детерминированной системой: вы поворачиваете ручку, и игла поднимается вверх и опускается вниз. Собака в большинстве случаев ведет себя как вероятностная система: вы протягиваете ей кость, и вполне вероятно, что она подойдет к вам, даже в высшей степени вероятно; однако не исключена возможность, что она вместо того, чтобы подойти к вам, внезапно убежит прочь» [3, с. 26–27].

Далее С. Бир, комбинируя эти два критерия, получает шесть классов систем, которые он последовательно рассматривает. Проследим за его мыслью.

**Простой детерминированной системой** является система из небольшого числа элементов, имеющая небольшое число внутренних связей, которая характеризуется вполне определенным динамическим поведением. Примером такой системы может служить оконная задвижка.

Перейдем к рассмотрению **сложных детерминированных систем**. Представителем этого класса является электронная вычислительная машина. И действительно, это весьма сложный механизм, но в то же время он полностью детерминирован. Вычислительная машина выполняет только те операции, которые ей предписаны.

Такая вещь, как **простая вероятностная система**, представляет собой вполне реальный факт. Характерным примером может служить процесс подбрасывания монеты. В качестве второго примера мы можем рассмотреть *живой организм*. Для иллюстрации «простых» систем можно взять поведение медузы, рассматривая ее в целом.

Далее мы переходим к **сложным вероятностным системам**. Примером может служить система управления запасами материалов на предприятии.

С. Бир утверждает, что класс **очень сложных детерминированных систем** является пустым. Он обосновывает это так: любую полностью детерминированную систему, даже, например, астрономическую систему, можно, в конце концов, подробно описать. Какой бы сложной ни стала система, принципиально ее можно точно определить. Следовательно, условие отнесения системы к классу сложных систем не выполняется.

Совершенно иная картина наблюдается, однако, в отношении класса **очень сложных вероятностных систем**. Так, например, экономика государства настолько сложна и настолько случайна, что, по мнению С. Бира, было бы наивным считать, что ее когда-либо удастся полностью описать. То же самое можно сказать и о человеческом мозге, который служит примером из области живых организмов. Пожалуй, самым ярким примером *промышленной системы* данного класса является предприятие или фирма [3, с. 28–33].

Советский ученый Б. С. Флейшман в своей книге «Основы системологии» [9] приводит классификацию систем по сложности. Он указывает, что лишь иерархическая упорядоченность мира позволяет обозреть его многообразие. Б. С. Флейшман выделяет три последовательно возникшие иерархии: это физико-биологическая и социальная иерархии, имеющие естественное происхождение, а также искусственно возникшая техническая иерархия. Перечисленные иерархии сосуществуют, взаимодействуя друг с другом. К физико-биологической иерархии он относит атом, молекулу, клетку, особь, стадо, популяцию, биоценоз, биосферу. Ко второй иерархии – человека, коллектив, общество, сообщество, человечество. К последней иерархии – орудие, машину, прибор, ЭВМ, комплекс.

Эмпирически установлено, как отмечает Б. С. Флейшман, что классы систем указанных иерархий с повышением их уровня обнаруживают следующие закономерности.

1. Разнообразие, т. е. число различных типов систем данного класса, *возрастает*. Например, различных типов атомов всего около  $10^2$ , различных типов неорганических молекул, образуемых из атомов, значительно больше – около  $10^4$ , число различных видов животных составляет уже около  $10^6$ . Число биоценозов, т. е. сообществ популяций организмов, можно приближенно оценить числом порядка  $10^8$ .

2. Распространенность, т. е. число систем данного типа (вида) в заданном пространстве (например, на Земле или в известной нам части Вселенной), *убывает*, что связано с возрастанием их размеров. В предельном случае некоторые типы систем могут быть представлены единичными экземплярами. Такие системы уникальны. Пример, который у всех на слуху, – Интернет.

3. Сложность структуры системы определяется числом элементов и числом связей между ними, а сложность поведения системы определяется характером и разнообразием реакций на внешние воздействия. Общая тенденция состоит в том, что при некотором возрастании средней сложности структуры классов внутри них еще в большей степени возрастает ее вариабельность по отдельным типам систем, составляющим класс. Так, например, биоценозы имеют от двух до тысяч популяций. Замечено возрастание сложности поведения у классов систем физико-биологической иерархии. При этом наблюдается и рост сложности поведения систем.

4. Устойчивость – это способность системы противостоять внешним возмущающим воздействиям с целью самосохранения. От нее зависит продолжительность жизни систем данного типа и, следовательно, их распространенность. Средняя устойчивость систем в рассмотренных иерархиях имеет явную тенденцию к понижению при переходе от физико-биологической иерархии к социальной и далее к технической. Устойчивость физических систем уменьшается, а биологических возрастает с ростом их сложности. Это объясняется большой степенью неаддитивности свойств частей биологической системы.

5. Эмерджентность – это степень несводимости свойств системы к свойствам отдельных элементов, из которых она состоит. Эмерджентность возрастает в физико-биологической иерархии.

6. Неидентичность, т. е. степень отличия систем одного и того же типа (вида) друг от друга, возрастает. Так, однотипные атомы или молекулы более идентичны, чем одновидовые клетки. Последние, в свою очередь, идентичнее особей одного вида. Неидентичность однотипных популяций и биоценозов также возрастает [9].

В качестве примера сложной технической системы можно привести современные операционные системы. Например, исходный код операционной системы Windows 2000 насчитывает около 29 млн. строк на языке программирования С.

### **3. Синергетика – теория самоорганизации систем**

Синергетика – это междисциплинарное (или даже «наддисциплинарное») научное направление. Родоначальником синергетики является немецкий физик Г. Хакен. Свое рождение эта отрасль знаний о системах отсчитывает с 1973 г. Она занимается изучением систем, состоящих из большого числа частей, компонент или подсистем, взаимодействующих между собой. Слово «синергетика» означает «совместное действие». Тем самым подчеркивается согласованность функционирования частей, отражающаяся в поведении системы как целого. Предметом изучения синергетика могут быть системы различной природы, поскольку им присущи общие закономерности эволюции. Поэтому подчас совершенно различные системы, принадлежащие различным областям, описываются одной и той же моделью. Инструментарий синергетики включает в себя теорию колебаний, теорию бифуркаций и катастроф, теорию диссипативных структур и динамического хаоса и т. д.

Синергетику часто называют наукой о самоорганизации в сложных системах. Рассмотрение систем в рамках принятого в синергетике подхода часто проводится на таком уровне абстракции, с которого процессы и структуры в системе видятся возникающими как бы «сами собой», вследствие самоорганизации, без некоей силы, действующей извне.

Как пишет Г. Хакен: «Синергетика занимается изучением систем, состоящих из многих подсистем самой различной природы, таких как электроны, атомы, молекулы, клетки, нейроны, механические элементы, фотоны, органы, животные и даже люди». Синергетика рассматривает, «каким образом взаимодействие подсистем приводит к возникновению пространственных, временных или пространственно-временных структур в макроскопических системах».

Особенностью математического моделирования, свойственной синергетике, является выделение так называемых *параметров порядка*, от которых зависят величины, характеризующие состояние системы, и которые, в свою очередь, могут влиять на параметры порядка. Параметры порядка, как правило, немногочисленны.

Приведем пример самоорганизации в природе. При беспорядочном движении большой совокупности молекул воды в атмосфере мерой этого движения является температура, которая играет роль параметра порядка. При понижении температуры до некоторого критического уровня однородное состояние этой совокупности молекул становится неустойчивым и заменяется новым, в котором молекулы распределены в пространстве уже неоднородно. В результате образуются структуры. При этом в зависимости от условий (наличие пыли, скорость охлаждения) могут образоваться или капли воды, или снежинки, или даже кусочки льда.

Примером явлений самоорганизации в социальных системах может служить расслоение ранее однородного общества по мере развития средств производства, организация политических партий и движений.

В настоящее время синергетика претендует на роль общенаучной парадигмы, философии современной науки, или метанауки, которая выявляет и изучает общие закономерности различных систем, относящихся к различным частным наукам. Некоторое время назад на подобную роль метанауки претендовала кибернетика. Г. Хакен считает, что коренное отличие синергетики и кибернетики заключается в том, что «...кибернетика занимается регулированием и управлением, синергетика же – самоорганизацией».

В России синергетика развивается усилиями многих исследователей, в частности, Г. Г. Малинецкого, С. П. Капицы, Е. Н. Князевой и др. Основателем синергетического направления в нашей стране по праву считается член-корреспондент РАН С. П. Курдюмов. Хорошее введение в синергетику представляет собой книга [2].

#### **4. Технология решения системных задач (проведения системных исследований)**

Исследование сложных систем на практике, как правило, проводится с целью приведения системы в некоторое желаемое состояние или с целью решения проблемы. Поэтому первым этапом исследования является оценка текущего состояния сложной системы, получение как можно более точного и полного его описания. Следующим вопросом, наверное, будет вопрос о том, почему состояние системы именно такое. Значит, исследователь должен попытаться дать объяснение наблюдаемому состоянию системы. Поскольку состояние системы может в будущем измениться под воздействием внешних и внутренних факторов, то может оказаться весьма желательным сформировать прогноз будущего состояния системы. Существует такое понятие, как горизонт прогноза, т. е. срок, на который можно дать обоснованный прогноз. В рамках синергетики показано, что существуют определенные ограничения на горизонты прогноза для различных типов сложных систем. Имея информацию о текущем состоянии системы и прогноз ее развития, можно попытаться сформировать рекомендации по управлению сложной системой, с тем, чтобы она достигла желаемого состояния.

Таким образом, сложная проблема решается методами системного анализа. «На деле системный анализ представляет собой сложный, бесструктурный, приблизительный и индивидуализированный подход к рассмотрению новой системы, будь то новое оружие или массовая кампания против недоедания, в котором используются различные аналитические методы – от математики до интуиции. Это не формальный способ анализа, опирающийся на застывшие догмы, а скорее концептуальный подход, требующий использования максимального диапазона дисциплин и исследовательских приемов для рассмотрения какой-либо одной проблемы» [6, с. 100].

Как видно из этой характеристики, при решении системных задач применяются как формализованные, так и неформализованные методы. Поскольку в сложных ситуациях не всегда возможна полная формализация задачи, то в таких случаях на помощь привлекаются эксперты. Сложные междисциплинарные задачи решаются с привлечением групп экспертов, которые являются специалистами в самых различных областях. Разумеется, эксперты могут применять и формализованные методы в своей деятельности.

Когда мы говорим об экспертных оценках, экспертных группах, то сразу вспоминается в первую очередь корпорация РЭНД. Эта корпорация была создана в 1946 г. в США. Сокращение РЭНД означает по-английски Research and Development. В свидетельстве о регистрации было сказано, что она создавалась для того, «чтобы содействовать достижению целей в области науки, образования и благотворительности, в интересах общественного благополучия и безопасности Соединенных Штатов Америки» [6, с. 39]. Корпорация РЭНД является так называемой «фабрикой мысли». Она занимается широким спектром проблем от перспективных систем оружия до политики борьбы с бедностью. В этой корпорации широко применяется так называемый метод сценариев, когда предпринимается попытка описать искусственный сценарий будущих событий. История возникновения и принципы организации работы подобных учреждений описываются в увлекательной форме в книге П. Диксона «Фабрики мысли» [6].

Главная функция организаций такого типа – это не проведение традиционных фундаментальных исследований, т. е. создание новых знаний, а скорее их распространение. «Фабрика мысли» ориентирована на научную методологию, в частности, на использование исследования операций. Однако ее деятельность не ограничивается научной тематикой, неизменно имеет междисциплинарный характер, почти всегда используется группа экспертов из различных областей для разработки крупных перспективных проектов.

«Фабрики мысли» порой принимаются за решение самых трудных проблем. Например, фирма «Систем девелопмент» участвовала в разработке курса обучения слепых для работы в качестве программистов ЭВМ. При подготовке курса исходили из того, что слепые обладают компенсирующими способностями, которые и позволяют им заниматься даже такой профессией. Обучение слепых в этой фирме проходило несколько этапов – от получения элементарных знаний ЭВМ до участия в сложных научно-исследовательских программах. Данная корпорация обладала большим опытом разработки компьютерных программ. На заре деятельности этой корпорации в ней работало около 90 % всех имеющихся в США программистов.

Всем «фабрикам мысли» присуща одна общая черта – каждое такое учреждение имеет доверительные отношения с каким-либо государственным ведомством, например, с министерством обороны.

На развитие синергетики и системного анализа сильное влияние оказало бурное развитие вычислительной техники. Без ее применения было бы невозможно провести многие виды исследований, когда требуется обработать огромные массивы данных, когда в математических моделях используются тысячи переменных. В качестве примеров можно привести задачи моделирования атмосферных явлений.

Проведение системного анализа подразумевает и наличие соответствующих специалистов, которых называют системными аналитиками. Эти люди должны иметь широкий кругозор и глубокие знания в различных областях науки и техники. Еще одним важным качеством такого специалиста является умение мыслить нестандартно, принимать подчас парадоксальные решения, поскольку стандартные, предсказуемые решения могут не давать желаемого результата. В книге Р. Акоффа «Искусство решения проблем» приводится много поучительных примеров и ситуаций, в которых смог проявиться талант парадоксального мышления системного аналитика. В качестве примера приведем одну такую историю, которая называется «Взлеты и падения».



«Смотритель большого административного здания стал получать все больше жалоб на работу лифтов, особенно в часы пик. Когда же несколько арендаторов заявили, что переедут в другое здание, если обслуживание не улучшится, смотритель пригласил группу инженеров-консультантов, специализировавшихся на проектировании лифтов. Изучив ситуацию, они определили три возможные линии поведения: увеличить число лифтов; заменить все или некоторые лифты; ввести центральную систему управления лифтами с помощью ЭВМ, обеспечивающую более быстрое обслуживание.

Затем инженеры провели анализ окупаемости затрат по каждому из трех вариантов. Было установлено, что только увеличение числа лифтов или их замена может привести к существенному улучшению обслуживания, однако затраты, необходимые для осуществления этих планов, невозможно возместить за счет доходов от аренды здания. По существу, ни один из предложенных вариантов не был приемлем. Тогда смотритель здания сделал то, что руководители делают крайне редко (если только они не попали в безвыходное положение): он решил посоветоваться со своими подчиненными. Он созвал совещание своих сотрудников и предложил им решить эту проблему методом «мозговой атаки». Были внесены различные предложения, однако все они были отклонены. Казалось, что обсуждение зашло в тупик, как вдруг неожиданно для всех слово попросил молодой сотрудник отдела кадров. Смущаясь и робея, он представил на суд собравшихся свое предложение, которое сразу же было принято. Несколько недель спустя при сравнительно небольших затратах проблема «лифта» была решена: на каждом этаже на тех стенах, где были расположены двери лифтов, были повешены большие зеркала.

Молодой сотрудник из отдела кадров оказался хорошим психологом. Он рассудил, что жалобы вызваны скукой во время ожидания лифта. Фактически время ожидания было совсем небольшим, но оно казалось продолжительным, так как при ожидании лифта людям нечем было заняться. Наличие зеркала означало возможность чем-то себя занять (можно было незаметно посмотреть на себя и на других, особенно на лиц противоположного пола), и это занятие доставляло удовольствие» [1, с. 57–58].

## **5. Примеры применения системного подхода при решении сложных задач**

История системного анализа, кибернетики и синергетики знает немало примеров решения сложных практических задач. Мы ограничимся несколькими из них. И в качестве первого примера рассмотрим создание С. Биром системы управления экономикой Чили в начале 70-х гг. XX века. Эту эпопею он описал в своей книге «Мозг фирмы» [4].

В 1971 г. в Чили к власти пришло правительство Народного единства, возглавляемое президентом страны Сальвадором Альенде. Перед страной стояла задача подъема экономики, которая находилась в тяжелом положении. Одной из причин этого положения было внешнее воздействие других стран, в первую очередь – США. В этих условиях необходимо было повышать эффективность управления экономикой. Так случилось, что С. Бир заинтересовался реформами, проводящимися в Чили, и согласился принять участие в создании кибернетической системы управления экономикой. В ноябре 1971 г. он прибыл в Чили. Там под его руководством был начат проект Киберсин (кибернетический синергизм). Управление экономикой целой страны в реальном времени невозможно без применения компьютеров. Но в то время в стране не было современной (конечно, по тем временам) компьютерной техники. Лишь в столице – Сантьяго – была вычислительная машина фирмы IBM серии 360, а также машина Burroughs 3500. Тем не менее, была организована сеть (ее назвали Кибернет) для сбора данных от предприятий Чили, которые были национализированы государством. В качестве технических средств для передачи этих данных в столицу на центральный компьютер была использована система телексной связи. Создание сети Кибернет осложнялось тем обстоятельством, что Чили в географическом плане является очень специфической страной –

она представляет собой узкую полосу земли, протянувшуюся вдоль западного побережья Южной Америки на 4500 км. Для обработки полученных данных был разработан пакет специальных программ и разработаны математические и имитационные модели чилийской экономики. При этом собирались лишь самые необходимые данные, которые были представлены в виде так называемых индексов. Эти индексы отражали ключевые показатели деятельности предприятий: производительность труда, неиспользуемую установленную мощность производства, объем выпуска продукции. Практически оказалось, что 10–12 индексов достаточно для наблюдения за деятельностью любого предприятия.

Практическое использование кибернетической системы управления экономикой показало свою эффективность. В частности, во время общенациональной забастовки водителей грузовых автомобилей выходили на линии лишь от 10 до 30 процентов от их общего числа. Несмотря на это, все же удалось сохранить объем перевозок грузов на прежнем уровне. Это удалось сделать благодаря тому, что разработанная система управления позволила использовать те резервы, которые всегда существуют из-за чрезмерного дублирования ресурсов. Удалось избежать простоев грузовиков и их нерациональных перемещений по стране.

Одним из важнейших факторов, сыгравших положительную роль в успехе проекта Киберсин, было наличие поддержки группы разработчиков со стороны руководства страны, в том числе и самого президента Альенде. К сожалению, в экономике в силу внешнеполитических причин нарастали разрушительные тенденции, в итоге завершившиеся свержением правительства Народного единства.

В качестве второго примера системного подхода приведем работу, которую проделал в конце 1960-х – начале 1970-х гг. Джей Форрестер, один из крупнейших специалистов в области теории управления, профессор Массачусетского технологического института (МТИ). Результатом этой работы явилось создание в МТИ методологии междисциплинарных исследований сложных динамических систем, получившей название системной динамики [10]. Был разработан целый комплекс моделей. Они включали десятки уравнений со многими переменными.

В своих моделях Дж. Форрестер рассматривает мир как единое целое, как единую систему различных взаимодействующих процессов: демографических, промышленных, в том числе и процессов исчерпания природных ресурсов и загрязнения окружающей среды, процесса производства продуктов питания. Его расчеты показали, что при сохранении современных тенденций развития общества неизбежен серьезный кризис во взаимодействии человека и окружающей среды. Этот кризис объясняется противоречием между ограниченностью земных ресурсов, конечностью пригодных для сельскохозяйственной обработки площадей и все растущими темпами потребления увеличивающегося населения.

В настоящее время этот подход подвергается критике по ряду позиций. В частности, подход является «микроскопическим», т. е. делается попытка от изучения микротенденций и моделирования отдельных аспектов мировой системы перейти к глобальным выводам и прогнозам. В таком случае система не рассматривается как целое изначально.

Другой подход, основанный на синергетической парадигме, использовал С. П. Капица при создании общей теории роста человечества [7].

В настоящее время в мире имеет место явление, которое называется демографическим переходом. Это глобальное явление затрагивает все страны и многие стороны жизни, а потому требует междисциплинарного подхода и новых количественных методов изучения исторического процесса [7, с. 6]. Суть демографического перехода заключается в резком возрастании скорости роста популяции, который сменяется столь же стремительным ее падением, после чего численность населения стабилизируется. Развитые страны этот переход уже прошли. Теперь описанный процесс происходит в раз-

визующихся странах [7, с. 18]. А начался демографический переход во Франции с середины XVIII в. [7, с. 78].

С. П. Капица пишет: «Обсуждение последствий быстрого роста населения и его ограничивающих факторов привлекало многих исследователей, и начало подобных работ восходит еще к Мальтусу. Мальтус, быть может, впервые обратился к математическому моделированию для объяснения основных факторов, управляющих ростом населения. Им был сформулирован *популяционный принцип*, по которому рост человечества, следующий геометрической прогрессии, будет опережать линейно растущее производство пищи. В результате рождаемость ограничивается отсутствием питания, и рост соответственно лимитируется ресурсами и голодом. Идеи Мальтуса оказали существенное влияние на общественную мысль и привлекли внимание к выяснению причин, ограничивающих рост населения» [7, с. 6].

Интересно, что хотя Мальтус и готовился принять сан, это не мешало ему хорошо владеть математикой XVIII в. Он занял девятое место в традиционном экзамене по математике выпускников Кембриджского университета [7, с. 7].

С. П. Капица предлагает системный подход к развитию человечества. В основе предлагаемого подхода лежит математическое моделирование роста численности людей на Земле. Существенным шагом стало понимание того, что взрывной рост населения есть режим с обострением, и это привело к последующему привлечению к исследованию методов нелинейной физики систем и синергетики [7, с. 6].

Важным отличием от подходов, применявшихся ранее является то, что человечество рассматривается как целое, без разделения его по странам и регионам, к чему традиционно прибегают в истории и экономике, социологии и демографии [7, с. 9]. Количественный подход оказалось возможным реализовать, обратившись к представлению об истории человечества, как о процессе развития *системы* [7, с. 15].

Оказывается, что до сих пор при описании развития человечества непосредственно к методам естественных и точных наук практически не обращались. Даже методы системного анализа не применялись, так как казалось, что при описании и объяснении исторических процессов надо отталкиваться от детального понимания того, что с нами конкретно происходит, и уже от частного переходить к общему. Но именно для человечества в целом такой, основанный на редукционизме, подход оказался мало продуктивным ввиду исключительной сложности системы [7, с. 10]. Однако именно сложность системы допускает статистический подход к ее анализу [7, с. 12].

С. П. Капица отмечает, что критики подобного статистического подхода приводили в качестве примера обезличенной оценки среднюю температуру больных в больнице. Действительно, для каждого отдельного пациента такие сведения совершенно не нужны. Но для главного врача повышение средней температуры может служить важным сигналом об эпидемии, постигшей вверенную ему больницу. Конечно, состояние конкретного больного определяется *его* температурой. Но ведь и температура на уровне организма также является интегральной характеристикой здоровья [7, с. 12–13].

Опыт физики показал, что существует и путь, когда отыскиваются законы, описывающие систему в целом. Это так называемый *феноменологический* подход. Он оказался плодотворным тогда, когда детальная, микроскопическая, картина явлений очень сложна, а механистический редукционизм оказывается бессильным, чтобы в реальном, макроскопическом, масштабе охватить всю совокупность явлений [7, с. 13].

Например, такие понятия, как рождаемость или смертность, имеют далеко не элементарный, а феноменологический уровень. В этих показателях обобщается множество факторов. Нельзя забывать и о том, что в сложной системе все связи и взаимодействия большей частью нелинейны и не допускают простого суммирования. Поэтому и причинно-следственные связи также нелинейны. Следовательно, непосредственный переход от частного к общему вряд ли возможен. Поэтому, по мнению С. П. Капицы, следует отказаться от описания частностей в поведении демографической системы и

необходимо перейти на следующий уровень агрегации. Для этого надо принципиально изменить точку зрения и методы исследования. В качестве альтернативы и предлагается последовательно системный метод, когда все население Земли рассматривается как эволюционирующая и самоорганизующаяся система, существенно нелинейная в своем поведении. Таким образом, следующая ступень обобщения связана с тем, что главным параметром, определяющим состояние человечества, становится полная численность его населения [7, с. 24].

Удивительно, но возможность рассмотрения населения мира как системы, как единого и целостного объекта, который достаточно характеризовать числом людей в данный момент, традиционно отрицалась в демографии. Демографы в народонаселении мира видели только сумму населения всех стран. Для них эта сумма не имела смысла объективной динамической характеристики [7, с. 28].

Решению поставленной задачи разработки модели роста населения Земли помогает то обстоятельство, что при большом числе степеней свободы и сложности системы возможен переход к усредненным статистическим данным. При этом возможно определить главную переменную. Для системы «человечество» ею становится численность населения мира. В синергетике показано, как благодаря принципу подчинения происходит выделение ведущей переменной и параметра порядка, определяющего масштаб явлений, происходящих в системе [7, с. 31].

Оказывается, что для системы народонаселения Земли распределение населения по Земле и концентрация людей в городах в среднем мало влияют на скорость роста. Это верно глобально, но для конкретного города и страны все может быть иначе [7, с. 39].

В отличие от распространенного мнения о влиянии ограниченности ресурсов на скорость роста численности населения, это ограничение скорости роста обязано именно пределу скорости роста, а не отсутствию ресурсов. Это утверждение будет справедливо до тех пор, пока наше воздействие на окружающую среду не приведет к глобальным по своим масштабам последствиям, которые уже в следующем приближении могут повлиять на развитие человечества.

В модель водится так называемое характерное время, которое определяется внутренней предельной способностью системы человечества и человека к росту. Эта постоянная, равная  $\tau = 45$  годам, определяется из анализа глобального демографического развития и дает масштаб времени, к которому следует относить процессы, происходящие в системе человечества.

Обосновывается и вводится в модель также константа  $K = 64000$ . Она занимает центральное место в теории роста, определяя все основные соотношения, возникающие при описании системной динамики человечества, являясь, в терминах синергетики, параметром порядка [7, с. 50].

Очень важным в развитии человечества является момент, когда прирост населения на протяжении поколения или характерного времени  $\tau$  становится сравнимым с самой численностью населения мира. В этот момент возникает критический переход к другому закону роста и как следствие – переход к стабилизированной численности населения Земли [7, с. 51].

Теперь приведем основные математические соотношения, выражающие процесс роста населения Земли [7, с. 56–57, 64].

В течение эпохи, предшествующей демографическому переходу, скорость роста численности людей пропорциональна квадрату общего числа людей  $N$ , населяющих Землю

$$\tau \frac{dN}{dT} = \frac{N^2}{K^2},$$

что приводит к гиперболическому росту

$$N = \frac{K^2 \tau}{T_1 - T} = \frac{186 \cdot 10^9}{2025 - T}.$$

Демографический переход занимает  $2\tau = 90$  лет и заканчивается соответственно в  $T_1 + \tau = 2050$  г. С демографического перехода начинается эпоха перехода к стабилизированному пределу численности людей на Земле, зависящему только от значения  $K$ . Таким пределом является

$$N_\infty = \pi K^2 = 13 \text{ млрд.}$$

В критическом 2005 г. (цитируемая книга была написана С. П. Капицей в 1999 г.) население мира достигнет половины предельной величины  $N_1 = \frac{\pi}{2} K^2 = 6,5$  млрд., а скорость роста населения достигнет максимума

$$\left( \frac{dN}{dT} \right)_{T_1} = \frac{K^2}{\tau} = 90 \text{ млн. в год.}$$

В течение всего времени роста от  $T_0 = 4,5$  млн. лет (со времени начала антропогенеза) тому назад до  $T_1 = 2005$  г., на Земле прожило около

$$P_{0,1} = 2K^2 \ln K = 90 \text{ млрд. чел.}$$

В результате моделирования С. П. Капица приходит к существенному выводу об отсутствии прямого влияния внешних факторов – окружающей среды и ресурсов – на пределы роста. Управление ростом населения определяется внутренними, системными факторами развития [7, с. 124]. Более того, автор отмечает, что модель парадоксально указывает на глобальную независимость от внешних ресурсов в течение всей истории развития. Темп роста зависит от внутренних свойств системы, а не от внешних условий и ресурсов. Это обстоятельство позволяет сформулировать принцип демографического императива, в отличие от популяционного принципа Мальтуса, утверждавшего, что именно ресурсы определяют скорость роста населения и его предел [7, с. 157].

В заключение приведем описание ситуации, когда решающее влияние на основные свойства системы оказывают всего две переменных. Как правило, сложные системы описываются многими переменными. Но бывают случаи, когда оказывается возможным выбрать несколько этих переменных в качестве, как принято называть их в синергетике, параметров порядка. Существует такая наука, как геополитика. Геополитика, по образному определению петербургского исследователя С. Б. Переслегина, – это «теория позиционной игры на мировой шахматной доске» [8]. Как и любая другая наука, геополитика имеет свои теории, законы и даже теоремы. В качестве одной из теорем в книге [8] приведена так называемая «транспортная теорема». Она позволяет оценивать политическую стабильность государственных образований на основе открытой информации. «Транспортная теорема» позволяет оценить пределы пространственного развития государств. Для этого используются всего два параметра. Первый из них,  $v$ , означает характерную скорость перемещения информации внутри государства. Вторым параметром,  $t$ , отражает характерную длительность процессов, подлежащих управлению из центра. Теорема утверждает, что «приведенные к кругу» размеры государства

не могут превышать  $vt$ . Выражение «приведенные к кругу размеры» имеет следующее значение: это не что иное, как радиус круга, площадь которого равна площади государства, т. е.  $S = \pi r^2 = \pi (vt)^2$ . Для государств доиндустриальной эпохи значение параметра  $v$  оценивается в диапазоне от 50 до 100 километров в сутки, а значение параметра  $t$ , зависящее от исторической эпохи и ряда других обстоятельств, находится в диапазоне от 4 до 10 дней. Проведя несложные вычисления, получим, что приведенный радиус империй древнего мира и средних веков мог бы составлять от 200 до 1000 километров. Очевидно, что, при одной и той же протяженности страны, чем выше скорость протекания процессов на окраинах государства (чем меньше  $t$ ), тем выше должна быть скорость перемещения информации (тем больше  $v$ ), иначе произойдет запаздывание управляющих сигналов. На этом основании С. Б. Переслегин утверждает, что, например, расширение Европейского Союза имеет свои пределы. Он считает, что Франция и Германия поступают совершенно правильно, стараясь не допустить вступление Турции в ЕС.

## 6. Заключение

Небольшой объем текста популярной лекции не позволяет включить в нее целый ряд других интересных и поучительных примеров из истории развития системного анализа, кибернетики и синергетики. Тем не менее, хочется выразить надежду на то, что для человека, впервые познакомящегося со сферой сложных систем, эта лекция послужит отправной точкой для перехода к углубленному изучению науки о системах. Приведенный ниже небольшой список литературы может в этом помочь.

### Литература (с комментариями)

1. Акофф, Р. Искусство решения проблем [Текст] : пер. с англ. / Р. Акофф. – М. : Мир, 1982. – 224 с.

Очень интересная книга, содержащая множество неформализованных описаний проблемных ситуаций, возникающих на производстве, и оригинальных способов их решения. Хотя автором является математик, в книге совсем нет формул.

2. Безручко, Б. П. Путь в синергетику. Экскурс в десяти лекциях [Текст] / Б. П. Безручко, А. А. Короновский, Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов. – М. : КомКнига, 2005. – 304 с.

Вводный курс по синергетике. Написан в расчете на гуманитариев, поэтому математический аппарат, используемый по ходу изложения материала, максимально упрощен. Книга содержит много примеров и иллюстраций.

3. Бир, С. Кибернетика и менеджмент [Текст] : пер. с англ. / Стаффорд Бир. – Изд. 2-е. – М. : КомКнига, 2006. – 274, [6] с.

Одна из нестареющих классических книг по кибернетике и управлению. Именно в ней описан знаменитый принцип «внешнего дополнения».

4. Бир, С. Мозг фирмы [Текст] : пер. с англ. / Стаффорд Бир. – М. : Радио и связь, 1993. – 416 с.

Аналогичная книга, содержащая не только теоретический материал, но также и описание решения реальной сложной проблемы – создание кибернетической системы управления экономикой Чили.

5. Волкова, В. Н. Из истории теории систем и системного анализа [Текст] / В. Н. Волкова. – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2001. – 260 с.

Подробнейшее описание истории развития системных представлений как на Западе, так и в Советском Союзе и в России. Автор приводит интересные биографические сведения об ученых, многих из которых она знала лично.

6. Диксон, П. Фабрики мысли [Текст] : пер. с англ. / Пол Диксон. – М. : АСТ, 2004. – 505, [7] с. – (Philosophy).

Что такое «фабрика мысли»? Как она работает и что производит? Книга дает ответ на эти вопросы на основе описания истории создания и деятельности целого ряда подобных организаций.

7. Капица, С. П. Общая теория роста человечества: сколько людей жило, живет и будет жить на Земле [Текст] / С. П. Капица. – М. : Наука, 1999. – 190 с.

Пример применения синергетического подхода к решению сложной проблемы. Книга убеждает в том, что именно междисциплинарный подход к решению подобных проблем может оказаться наиболее продуктивным.

8. Переслегин, С. Б. Самоучитель игры на мировой шахматной доске [Текст] / Сергей Переслегин. – М. : АСТ ; СПб. : Terra Fantastica, 2005. – 619, [5] с.

Мировая система с точки зрения геополитики. В книге много примеров из военной истории. Приводятся вымышленные исторические сценарии событий, которых в реальности не было, но если бы они произошли, то их ход мог бы соответствовать приведенным сценариям.

9. Флейшман, Б. С. Основы системологии [Текст] / Б. С. Флейшман. – М. : Радио и связь, 1982. – 368 с.

Название данной книги отражает ее назначение и уровень сложности излагаемого материала.

10. Форрестер, Д. Мировая динамика [Текст] : пер. с англ. / Джей Форрестер. – М. : АСТ ; СПб. : Terra Fantastica, 2003. – 379, [5] с.

Переиздание книги, впервые вышедшей более тридцати лет назад, но не потерявшей своей актуальности, несмотря на сегодняшнее критическое отношение к методам, которые использовались тогда для построения моделей мировой системы.

11. Эшби, У. Р. Введение в кибернетику [Текст] : пер. с англ. / Уильям Росс Эшби. – Изд. 2-е, стереотип. – М. : КомКнига, 2005. – 432 с.

Еще одна не стареющая классическая книга по кибернетике. Содержит полезные упражнения, помогающие лучше усвоить излагаемые вопросы.