

Б.С.Флейшман

ОСНОВЫ СИСТЕМОЛОГИИ

Б.С.Флейшман

ОСНОВЫ СИСТЕМОЛОГИИ

МОСКВА "РАДИО И СВЯЗЬ" 1982

Флейшман Б. С. Основы системологии. — М.: «Радио и связь». 1982. — 368 с., ил.

Излагаются концептуальные и математические основы системологии (теории сложных систем). Приводится краткий критический обзор литературы в этой области. Демонстрируется (с помощью расчетных формул и графиков) использование системологии в актуальных областях экологии и охраны окружающей среды.

Теория сложных систем излагается как теория их потенциальной эффективности, устанавливающая пределы надежности, помехоустойчивости, управляемости, самоорганизации.

Используемый в книге комбинаторный аппарат является оригинальным.

Автор известен своими работами по теории информации и кибернетике.

Книга рассчитана на научных работников, инженеров-системотехников, экологов и математиков. Ее с интересом прочтут студенты старших курсов и аспиранты.

18 рис., 1 табл., библи. 136 назв.

Рецензенты: профессора В. Д. Зубаков, Ю. Н. Мельников

Редакция литературы по кибернетике и вычислительной технике

Бенцион Семенович Флейшман
Основы системологии

Редактор Н. Д. Иванушко
Художник Н. К. Кутилов

Художественный редактор Н. А. Игнатьев

Технические редакторы Г. З. Кузнецова, Л. К. Грачева

Корректор Н. М. Давыдова

ИБ № 146

Сдано в набор 02.11.81.	Подписано в печать 25.05.82.	T-10 043
Формат 84×108 ¹ / ₃₂	Бумага кн.-журн.	Гарнитура литературная Печать высокая
Усл. печ. л. 19,32	Усл. кр.-отт. 19,32	Уч.-изд. л. 19,84 Тираж 6000 экз.
Изд. № 19581	Зак. № 1350	Цена 2 р. 50 к.

Издательство «Радио и связь». 101000 Москва, Главпочтамт, а/я 693

Ф 270408330-113
046(01)-82 — 96-82

ПРЕДИСЛОВИЕ

Системное движение, системный подход, анализ систем, системный анализ, теория систем, теория сложных систем, системология — вот метаморфозы терминов, в которых чувствуется все большая претензия системологов на фундаментальность своего детища. Обоснована ли такая претензия? Ответ на этот вопрос возможен лишь при точном определении широты области системологии и рассмотрении достигнутых ею результатов. Претензия фундаментальности предъявляет к ним требования общности (широты) и конструктивности (глубины). Эти требования всегда противоречивы.

Целью этой книги является попытка обосновать претензии системологов при точном указании области, охватываемой системологией, рассматривающей лишь сложные вещественные (материальные) системы.

Очень удачный, как нам кажется, термин «системология» был впервые использован в 1971 г. В. Т. Куликом* для названия широкой области теории систем в духе Л. фон Берталанфи. Предлагаемое в данной книге сужение этой области ближе всего к кибернетике, какой она должна быть в широком понимании У. Р. Эшби. В нашей стране понимание кибернетики носит более широкий характер, чем на западе, где кибернетика часто отождествляется с теорией управления и связи в первоначальном понимании Н. Винера. Однако, включив в себя впоследствии теории надежности, информации, управления, самоорганизации и другие дисциплины, кибернетика оставалась конгломератом нефизических направлений науки до тех пор, пока для всех них не была найдена единая концептуальная основа — понятие сложной системы. Это произошло, когда стало ясным, что отдельные направления кибернетики исследуют лишь различные качества одного и того же целостного объекта — сложной системы.

* В философской литературе термин «системология» впервые был введен И. Б. Новиком (1965 г.).

Став стержневым понятием кибернетики и придав ей тем самым недостающее концептуальное единство, понятие сложной системы оправдало отождествление современной кибернетики с системологией. При этом теорию простых материальных систем — физику — естественно называть процессологией. Знаковые, языковые, логические, математические и другие идеальные системы остаются вне рамок рассмотрения этих двух наук, являясь для них лишь модельным аппаратом для исследования материальных систем. Такое сужение диктуется требованием конструктивности для любой фундаментальной науки, т. е. необходимостью формулирования (желательно в математической форме) не только общих, но и достаточно глубоких законов для рассматриваемых объектов.

В указанных рамках системология действительно предстает перед нами как фундаментальная инженерная наука, устанавливающая общие законы потенциальной эффективности сложных материальных систем как технической, так и биологической природы. При такой трактовке системологии оказывается не случайным, что у истоков ее наиболее существенного начала — теории потенциальной помехоустойчивости — стояли выдающиеся инженеры современности: В. А. Котельников [1] и К. Шеннон [2]. Единая системная интерпретация их результатов вместе с теоретико-игровыми результатами Дж. фон Неймана [3], а также наших собственных результатов в форме предельных законов потенциальной эффективности сложных систем была дана в монографии [4]. Однако в ней уделялось мало внимания концептуальным основам системологии, ее математическому аппарату, а также наиболее актуальным сейчас экологическим приложениям. Следует отметить, что на важность концептуальных основ системологии обращено внимание широких инженерных кругов сравнительно недавно [5]. В предлагаемой вниманию читателей книге делается попытка восполнить пробелы по всем трем перечисленным вопросам — каждому из них посвящается по одной из трех глав книги.

В первой главе рассмотрены концептуальные основы системологии, в том числе и ее принципы, кардинально отличающиеся от принципов физикализма, во второй, начинающейся с теоретико-множественной формализации основных понятий системологии, — ее комбина-

торный математический аппарат. В третьей главе изложены применения системологии в экологии. Оригинальный материал книги в основном доводится до простых расчетных формул и графиков. Сложные выкладки вынесены в приложения.

Книга рассчитана на научных работников, инженеров-системотехников и экологов и может быть использована студентами и аспирантами, специализирующимися в новых областях приложений системологии: системотехники, экологии и рационального природопользования.

Книга построена так, что допускает различное чтение специалистами в указанных областях. Инженеры могут ограничиться чтением гл. 1 и § 3.6, экологи — гл. 1 и 3, а математики — гл. 1 и 2. Обращение к приложениям требуется лишь при узкопрофессиональном интересе к соответствующим вопросам, а также полезно студентам и аспирантам при решении практических и смежных задач, не затронутых в основном тексте.

В заключение выражаю благодарность профессорам В. Д. Зубакову и Ю. Н. Мельникову за ценные замечания, способствовавшие улучшению структуры книги, и проф. И. Б. Новику за полезные редакционные замечания, а также аспирантке С. А. Сильяновой за расчет графиков § 3.6.

В будущем наука будет концентрироваться больше вокруг проблем организации, структуры, языка, информации, программирования и управления и меньше — вокруг проблем силы, движения, вещества, реакции, работы и энергии.

Дж. фон Нейман

1. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ

1.1. ЭМПИРИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ

Лишь иерархическая упорядоченность мира позволяет обозреть его многообразие. В его части, известной нам, сосуществуют, взаимодействуя, три последовательно возникшие иерархии (рис. 1.1). Это естественно возникшие иерархии: физико-биологическая (А, Б) и социальная (В) — и искусственно возникшая техническая иерархия (Г). На рис. 1.1 приведены лишь бесспорно выделяемые классы систем, составляющие иерархии, а промежуточные классы опущены.

Объединение классов систем из разных иерархий или их частей приводит к «смешанным» классам. Например, объединение «неживых» классов систем из физической части иерархии А с «живыми» классами систем биологической части иерархии Б приводит к смешанному классу систем, называемому *экосистемами*. Объединения из классов систем, принадлежащих иерархиям Б, В и Г, приводят к промыслово-хозяйственным классам систем и т. д.

Эмпирически установлено, что классы систем указанных иерархий с повышением их уровня обнаруживают следующие закономерности (рис. 1.2).

1. *Разнообразие* (число a различных типов систем данного класса) *возрастает*. Так, различных типов атомов $a \approx 10^2$, различных типов неорганических молекул $a \approx 10^4$ [6], различных видов животных $a \approx 10^6$ [7]. Хотя классификация биоценозов (сообществ популяций организмов) еще не проведена, но априори можно экстраполировать их разнообразие числом порядка $a \approx 10^8$, учитывая лишь «комбинаторику» связей входящих в них популяций, но без учета принадлежности

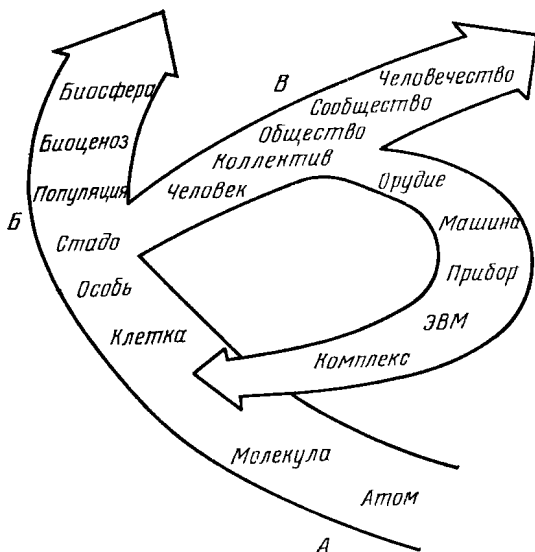


Рис. 1.1

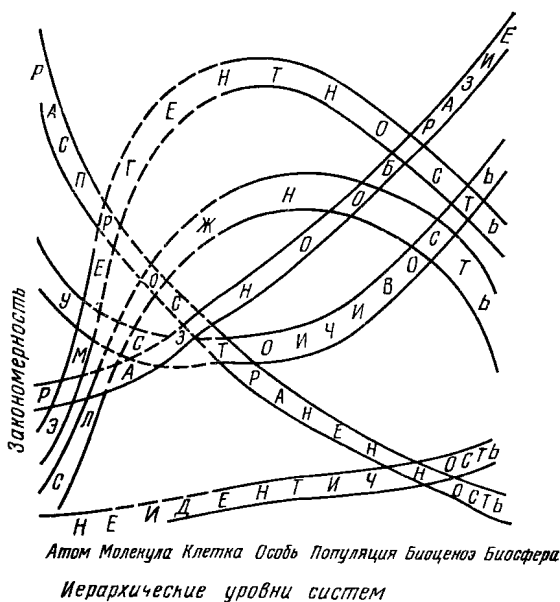


Рис. 1.2

популяций к конкретным видам. Учет же последнего фактора делает разнообразие a биоценозов при всех мыслимых ограничениях астрономическим числом. Разнообразие одновременно существующих на Земле биоценозов всегда может составить лишь весьма незначительную долю их потенциального разнообразия.

2. *Обилие или распространенность* (число N однотипных 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 — для высших уровней биологической и технической иерархий (некоторые биоценозы, биосфера, глобальные технические системы) — распространенность соответствующих систем вырождается в единичные экземпляры. Такие системы называют *уникальными*.

3. *Сложность* (для структуры системы определяется числом n ее элементов и числом m связей между ними, для поведения системы определяется характером и разнообразием реакций на внешние воздействия). Неоднозначность определения элементов системы и связей между ними не всегда позволяет однозначно определять n и m , а тем более характер реакций. Однако 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 (n). Замечено возрастание сложности поведения у классов систем физико-биологической иерархии, по крайней мере до уровня особи. При этом наблюдается невероятно большой скачок сложности поведения при переходе от иерархии А к иерархии Б. Только в настоящее время этот скачок постепенно заполняется классами искусственных технических систем иерархии Г.

4. *Устойчивость* (способность системы противостоять внешним возмущающим воздействиям для самосохранения). От нее зависит продолжительность жизни системы, а от последней и 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. Замечены две формы устойчивости систем. Для физических и простых технических систем это консервативная вещественно-энергетическая

устойчивость элементов внутри системы, связанная с прочностью и сбалансированностью. Для более сложных систем это динамическая структурная устойчивость, сохраняемая непрерывной заменой элементов этих систем. При учете этих двух качественно различных видов устойчивости известный феномен Фёрстера [8] (см. подробнее п. 3.2.5) не кажется неожиданным. Устойчивость физических систем уменьшается, а биологических возрастает с ростом их сложности. Фёрстер объясняет это неаддитивностью свойств частей и всей биологической системы, связанной с эмергентностью ее свойств.

5. *Эмергентность* (степень несводимости свойств системы к свойствам отдельных элементов, из которых она состоит) *возрастает* в физико-биологической иерархии по крайней мере до уровня особи [9]. Однако не ясна степень нивелирования этого свойства от уровня особи до уровня биосферы.

6. *Неидентичность* (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 идентичны особей одного вида. Неидентичность однотипных популяций и биоценозов также возрастает.

Приведенные иерархии, как уже упоминалось, возникали последовательно друг из друга. Точнее, каждая иерархия имела свой особый класс систем, который порождал следующую ветвь. Так, стадо породило человека, наделив его новым социальным качеством. И уже в новом качестве, образуя коллектив, человек породил новую иерархию — техническую, начиная с орудий труда и кончая современными глобальными техническими системами.

Может создаться впечатление, что технические системы лишь слепой придаток человечества, недостойный выделения в самостоятельную иерархию наряду с другими бесспорными иерархиями. Конечно, отдельные технические системы были и остаются продуктом деятельности человечества. Однако нельзя не заметить, что с ростом обилия и сложности отдельных технических систем вся техническая иерархия их как бы начинает ускользать из-под контроля человечества. Угрожающим признаком этого является неконтролируемое глобальное воздействие современной техники и технологии на естественные иерархии (нижняя стрелка на

рис. 1.1), в результате происходит нарастающее ухудшение окружающей человека естественной среды (экоцид), не компенсируемое иллюзорным индустриальным комфортом.

По-видимому, последние обстоятельства более чем какие-либо другие заставляют человечество, и притом безотлагательно, посмотреть на этот мир и свою деятельность в нем сверху вниз сквозь призму трех указанных иерархий, на наших глазах вступающих в экологический конфликт (экоцид).

1.2. ПОЛОЖЕНИЯ СИСТЕМОЛОГИИ

1.2.1. Три периода развития науки. Античный период науки характерен умозрительным подходом, оторванным от экспериментального подхода, а также использованием категории цели. Накопившийся к тому времени запас эмпирических знаний в земледелии, скотоводстве, примитивных ремеслах и астрономии регламентировался религией, а не наукой. Лишь землемерие и астрономия, породившие геометрию, сами в какой-то мере пользовались ею. Все же знания об элементах механики, не говоря уже об элементах химии, основывались на эмпиризме и умозрительных аналогиях, которые являлись основой научной аргументации того времени.

Нерасчленяемость тогдашних первичных элементов Вселенной, например земли, воды, воздуха и огня, т.е. их целостное рассмотрение, диктовалось просто недостаточностью химических знаний (см. рис. 1.3). Пожалуй, наиболее развитой областью приложений математики оказалась тогда теория музыки, индуцировавшая мистику чисел пифагорейцев (последователи школы древнегреческого мыслителя Пифагора).

Категория цели использовалась повсеместно [10]. Например, падение камня, поднятого над землей, объяснялось его желанием вернуться на старое место.

В основном умозрительные построения античной науки сменились в XVII в. современным естественнонаучным подходом, когда, завершая усилия гениев Возрождения, Ньютон соединил экспериментальные методы с новым математическим методом анализа бесконечно малых. Для продолжающегося ньютоновского периода с его методологией физикализма характерно соединение экспериментального и умозри-

тельного (математического) подходов, «изгнание» категории цели и сведение изучения целого к изучению его частей. Утвердившийся в образовании и науке физикализм оказался чрезвычайно плодотворным при изучении вещественно-энергетических свойств простых систем. Физикализм можно определить как методологию надежды построить здание науки не только простых, но и сложных систем на основе известных и еще не открытых законов физики. Несостоятельность физикализма в указанном его понимании полностью обнаружилась при попытке атаки сложных систем, для которых определяющими оказались не вещественно-энергетические, а структурно-поведенческие свойства.

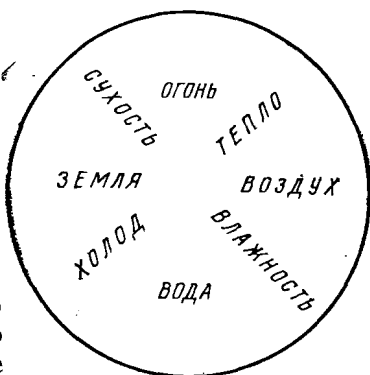


Рис. 1.3

Современный новейший системный подход знаменует начало нового, третьего периода развития науки. Он возник из потребности научной атаки сложных систем. Объект исследования потребовал целостного рассмотрения его частей, отказа от невозможного (например, для сложных уникальных систем) классического эксперимента над ним, а также восстановления в правах категории цели. Это означало отказ от физикализма во всех его трех пунктах (рис. 1.4) и возврат к античной методологии в форме методологии системологии. В связи с этим античную науку можно было бы назвать наивной системологией.

Поскольку для сложных систем определяющими оказались не вещественно-энергетические, а структурно-поведенческие качества, последние стали основным объектом исследования системологии, соединившей в себе, таким образом, более ранние методологии структурализма и бихевиоризма [11]*.

Вместе с тем основанная на системологии теория сложных систем явилась, как это уже упоминалось в предисловии, наследницей кибернетики в ее широком

* От английского слова behaviour — поведение.

понимании. В самом деле, стержневым понятием системологии является понятие сложной системы, в то время как кибернетика исследовала отдельные качества последней, сначала управления и гомеостазиса, а потом и информации. Только теперь наступает период зрелого понимания кибернетикой своего предмета исследования — сложной системы — и она сама может быть отождествлена с системологией — теорией сложных систем.

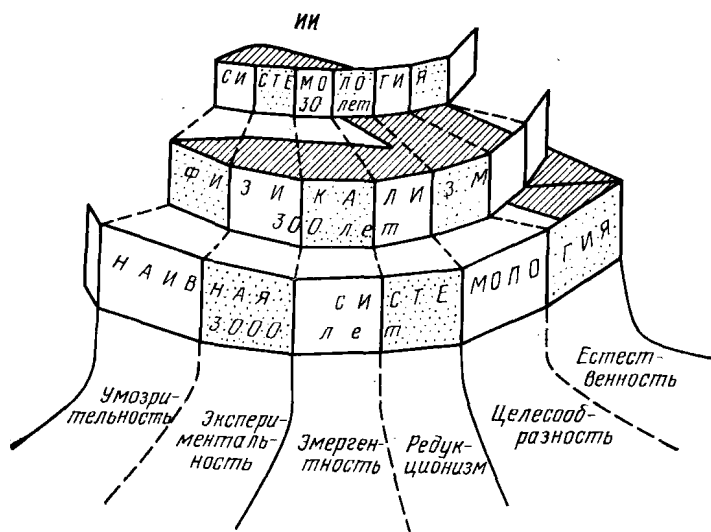


Рис. 1.4

Все это возродило интерес к общей теории систем Л. фон Берталанфи, не имевшей в довоенный период широкого резонанса из-за отсутствия содержательных результатов, лишь в послевоенный период накопленных теоретической кибернетикой (теории надежности, информации, управления и др.)

Мы уже упоминали, что для конструктивности системологии следует ограничиться рассмотрением лишь сложных материальных систем. Тогда наряду с современным делением естественных наук по конкретным видам исследуемых систем: физика (в узком смысле), химия, биология, социология и др. — возникает параллельное деление науки на две части по методам их исследования. Это теория *простых систем* — физика в широком смысле со своей методологией физикализма и

теория сложных систем — кибернетика в широком смысле со своей методологией системологии.

Таким образом, новый системный период развития науки в отличие от ньютоновского характеризуется не дифференциацией, а интеграцией науки, что также сближает его с единой античной наукой периода наивной системологии. При этом свое место под солнцем приобретает и наука об искусственном [12], в частности системотехника. Она вместе с биологией и социологией подпадает под методологическое влияние системологии и вместе с ними оказывается ареной проявления конкретных общесистемных законов.

И, наконец, еще одно обстоятельство, сближающее современную и наивную системологию. Речь идет об идейной близости основных методов исследования в обоих направлениях: аналогии и моделирования (в частности, на ЭВМ). Дело в том, что математические описания связей отдельных измеряемых характеристик простых систем были им столь адекватны, что могли рассматриваться как «исчерпывающие» законы природы. Сложные системы не допускают таких простых и вместе с тем столь адекватно исчерпывающих описаний. Вместо них для описания функционирования сложных систем строятся сложные математические модели, учитывающие, как правило, не все богатство существенных связей между элементами системы (имитационное моделирование). Таких моделей может быть много, и каждая в отдельности не является «исчерпывающей». Поэтому любые заключения по ним о действительном функционировании моделируемого оригинала напоминают заключения по аналогии, которые делались древними при сопоставлении двух объектов, подобных в их представлениях друг другу.

В настоящее время физикализм и системология используются как две различные методологии исследования простых и сложных систем соответственно. Рассмотрим подробнее, в чем состоит это отличие и, главное, чем оно оправдывается.

1.2.2. Умозрительность вместо экспериментальности. Новая системная методология не сводится лишь к новой классификации наук, она вкладывает новый смысл в традиционные для физикализма представления об эмпирическом (экспериментальном) и теоретическом (математическом) разделах традиционных естественных наук. Системология в корне меняет представления

об этих традиционных разделах. Еще Карл Маркс заметил, что при исследовании таких сложных уникальных систем, как социальные, «нельзя пользоваться ни микроскопом, ни химическими реактивами. То и другое должна заменить сила абстракции» [13].

Сейчас для анализа сложных систем повсеместно роль классического экспериментатора выполняет математик, моделирующий на ЭВМ эти объекты, а роль теоретика — интерпретирующий численные эксперименты на ЭВМ эмпирик, «хорошо знающий натуральный объект».

Поистине все стало в нашем современном мире с ног на голову! Потребность в такого рода умозрительном экспериментировании происходит не из-за несовершенства экспериментальных средств, как в античный период, а из-за специфики исследуемых объектов — сложных и особенно сложных уникальных систем. Классический эксперимент над ними в целом невозможен, в частности для уникальных систем из-за их масштабности. Эксперимент над их частями из-за их эмергентности не может заменить невозможного эксперимента над ними в целом.

1.2.3. Эмергентность вместо редукционизма. Итак, один из основных принципов физикализма — редукционизм — гласит, что целое можно изучать, расчленив его (редуцируя) на части, а затем, изучив их свойства, определить свойство целого. Важнейшим качеством сложных систем, отличающим их от простых, является эмергентность, отрицающая возможность применения редукционизма к сложным системам. Например, в наше время, несмотря на казалось бы обнадеживающие успехи молекулярной биологии (редукция клетки к молекулам), вряд ли кто-либо надеется на успехи редукционизма в попытках объяснить собственно биологические функции, не говоря уже о более высоких уровнях биологической иерархии.

1.2.4. Целесообразность вместо естественности. Физикализм основывается на естественных законах природы, обнаруживаемых в результате обобщения многочисленных экспериментов над простыми системами. Законы постулируются на основе этих экспериментов, как правило, в виде простых математических зависимостей. Это не имеет места для сложных систем. Простые объяснения свойств сложных систем (законы), изложенные в математической форме, могут быть получе-

пы, как будет показано далее, лишь при гипотезе о целесообразном поведении сложных систем.

1.2.5. Объяснение и предсказание. Привычные для традиционной науки, покоящейся на методологии физикализма, понятия объяснения и предсказания и их отношение к теории и эксперименту реформированы в системологии. Это связано со следующими обстоятельствами. Чем адекватнее сложной системе ее имитационная модель, тем выше ее предсказательные качества, но тем ниже ее объяснительные качества (модель по сложности приближается к оригиналу). Таким образом, в системологии в отличие от физикализма теория не является единственной носительницей и предсказательного и объяснительного элементов. Последний для системологии имеет другой смысл, чем для физикализма. В самом деле, физикализм, следуя редукционизму, имеет тенденцию объяснять явления на данном системном уровне явлениями на предельно низших системных уровнях вплоть до атомного.

В отличие от этого основным принципом объяснения системологии следует считать *рекуррентный одношаговый принцип*. Он состоит в принятии в качестве постулатов свойств и взаимодействий систем непосредственно нижестоящего уровня и вывода из них в виде теорем свойств систем данного уровня. Более подробно эти вопросы будут рассмотрены далее. Что касается предсказательного элемента, то физикализм придает ему привычный смысл, связанный с понятием физического закона, предопределяющего будущее поведение простой системы или его вероятность. Упомянутый «экспериментальный» метод предсказания с помощью имитационного моделирования в системологии состоит в «розыгрыше» различных ситуаций в ускоренном по сравнению с реальным течением «машинного» времени. Однако на пути этого метода стоит так называемое «проклятие размерности» пространства, в которое погружена модель. Этот эффект сопровождается быстрым переполнением памяти ЭВМ и чрезмерной нагрузкой выдачи ею результатов, как только делаются попытки разумной детализации модели. Поэтому сейчас наряду с имитационным моделированием для прогнозирования поведения сложных систем пользуются полунтуитивным экспертным методом, называемым дельфийским, воскрешая тем самым античную практику дельфийских оракулов.

1.2.6. Критический обзор различных оценок системологии. Как уже отмечалось, попытки физикализма исследовать своими методами интимные стороны поведения сложных систем оказались безрезультатными. С другой стороны, столь же несостоятельными оказались и попытки общей теории систем добавить что-либо нетривиальное к физическим представлениям о поведении простых систем. По-видимому, такие попытки связаны просто с нечетким пониманием возможностей этих наук. Кстати, и среди системологов нет четкого понимания места их науки среди других. Например, в работе [14] говорится: «Теория систем как теория математических отношений, безусловно, является отраслью прикладной математики». С другой стороны, теория систем, фигурируя в контексте цитированного автора в духе Берталанфи, должна охватывать и знаковые, в том числе и математические, системы. В результате получается порочный круг. Некоторые авторы не видят фундаментального значения системологии и в лучшем случае причисляют некоторые ее разделы, такие, например, как теория информации и теория игр, к новым направлениям математики. Но здесь их позиция по абсурдности не отличается от позиции предлагающего отнести теоретическую физику к разделу уравнений математической физики.

Многие высказывания как апологетов, так и оппонентов системологии и кибернетики страдают половинчатостью и эклектичностью. Как понять иначе такие высказывания? С одной стороны, «по своему составу живые объекты не отличаются от неживых. Отличие состоит в структуре, связях, взаимодействии и организации. Физические и химические законы не отражают этого взаимодействия» [5, с. 7]. И, с другой стороны, на следующей странице читаем: «Было бы заманчиво назвать системологию разделом физики, изучающим проблемы организации и развития. К сожалению, претендовать на столь высокий научный ранг при современном уровне развития системология не может». Другие высказывания о системологии уличают ее в том, что она не нова. Так, в предисловии к книге [11] читаем: «Системный подход, системные исследования не являются чем-то принципиально новым, возникшим в последние годы». Двусмысленность такого высказывания обнаруживается в зависимости от того, что понимается под системологией. Если это лишь методология, то это утверждение верно при учете наивной системологии древних. Если иметь в виду