

621.3
С 409

СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

ЕЖЕГОДНИК 1970

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД
В БИОЛОГИИ:
МАТЕРИАЛЫ ВСТРЕЧИ-ДИСКУССИИ

ТЕОРИЯ СТРУКТУР
И ЕЕ МЕСТО
В СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ
БИОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

ПРОБЛЕМА ВРЕМЕНИ
В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ
БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД
В ЭКОЛОГИИ

МНОГОУРОВНЕВЫЕ СИСТЕМЫ
И БИОЛОГИЯ

USSR ACADEMY OF SCIENCES
INSTITUTE FOR THE HISTORY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

**SYSTEMS
RESEARCH**

YEARBOOK

1970



«NAUKA» PUBLISHING HOUSE
MOSCOW 1970

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ ИСТОРИИ ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ

**СИСТЕМНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

ЕЖЕГОДНИК

1970



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1970

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**И. В. БЛАУБЕРГ, О. Я. ГЕЛЬМАН, В. П. ЗИНЧЕНКО,
Ю. А. ЛЕВАДА, А. А. ЛЯПУНОВ, А. А. МАЛИНОВСКИЙ,
С. Р. МИКУЛИНСКИЙ, А. М. МОЛЧАНОВ, Д. А. ПОСПЕЛОВ,
В. Н. САДОВСКИЙ, А. И. УЕЛОВ, К. М. ХАЙЛОВ,
Э. Г. ЮДИН**

ПРЕДИСЛОВИЕ

За год, прошедший после выхода в свет первого выпуска ежегодника «Системные исследования», в советской литературе опубликован еще ряд работ по различным проблемам системного подхода. Среди них «Проблемы методологии системного исследования», «Проблемы формального анализа систем», сборник переводов «Исследования по общей теории систем», а также ряд статей в периодических изданиях. Все это служит свидетельством возрастающего интереса к проблематике, связанной с исследованием системных объектов.

Теоретическое направление системных исследований, опираясь в той или иной мере на результаты конкретных системных разработок, ставит своими задачами выявление специфических логико-методологических принципов и проблем системного подхода, а также анализ и конструирование методов системного исследования. Естественно, что при решении этих задач возникают и некоторые проблемы философско-гносеологического характера. К их числу, в частности, относятся принципы построения синтетических моделей сложных объектов, например проблема синтеза различных представлений одного и того же объекта, анализ влияния исходной теоретической позиции исследователя на создаваемые им системные представления объекта, разработка категориального аппарата, специфического для системного исследования (особенно анализ таких категорий, как система, структура, организация, элемент, связь).

Советские исследователи разрабатывают эти проблемы с позиций марксистско-ленинской философии. Как показывает практика системных исследований, фундаментальные принципы научного познания, сформулированные в диалектическом материализме, составляют наиболее адекватную методологическую основу системного подхода. Вместе с тем результаты, получаемые в рамках разработки системного подхода, служат благодатным материалом для дальнейшей разработки проблем диалектического материализма.

Глубокая взаимосвязь диалектического материализма и современных системных исследований коренится уже в том факте, что именно марксизм положил начало разработке методологии ана-

лиза сложных объектов действительности. Как известно, эта методология была реализована классиками марксизма-ленинизма в исследовании ряда коренных проблем общественного развития (экономическая теория Маркса, ленинская теория империализма). Можно с полным правом сказать, что в этих работах были предвосхищены современные системные исследования.

Существенное значение имеет здесь и еще одно обстоятельство. Диалектический материализм показал методологическую несостоятельность механицизма и противопоставил ему принципы целостного подхода к исследованию развивающихся объектов, взаимосвязанного анализа их структурных и генетических закономерностей. Весьма характерно, что эту линию восприняли, осознанно или неосознанно, представители системного подхода за рубежом. Достаточно указать на то, что практически все современные общесистемные концепции начинаются с развернутой критики механицизма, воспроизводящей в своих основных аргументах известные положения материалистической диалектики.

Понятно, что конкретное развитие методов системного исследования осуществляется в настоящее время прежде всего в специальных научных дисциплинах. Именно они доставляют системному подходу основной материал для его дальнейшего развития. Предлагаемый вниманию читателя второй выпуск ежегодника «Системные исследования» целиком посвящен проблемам системного подхода в современной биологии. Выпуск состоит из двух частей. Первая представляет собою обработанную стенограмму встречи-дискуссии по системному подходу в биологии, проведенной в декабре 1968 г. в Москве группой системного исследования науки Института истории естествознания и техники АН СССР. Во второй части дается с некоторыми сокращениями перевод трех статей, которыми открывается книга «Systems Theory and Biology» (1968), представляющая собой изложение материалов симпозиума по аналогичной проблеме, проведенного в США, в Кейсовском Западном университете. Публикация переводных статей позволит читателю сопоставить взгляды советских ученых с соответствующими работами американских исследователей.

Обращение к такого рода проблематике легко объяснимо: именно в биологии предпринимаются наиболее широкие и разносторонние попытки разработать и применить принципы системного исследования. Развитие подобных исследований естественно приводит к выдвиганию общеметодологических проблем, касающихся системного подхода в целом — его существа, того, что он приносит нового в современные методы и подходы в науке, его специфических средств и понятий.

Пользуясь случаем, редколлегия хотела бы выразить признательность К. С. Байкову и С. И. Дорошенко, проделавшим большую работу по подготовке книги к изданию.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В СОВРЕМЕННОЙ БИОЛОГИИ (Материалы встречи-дискуссии)

Встреча-дискуссия «Системный подход в современной биологии» проводилась 11 и 12 декабря 1968 г. в Москве в Институте истории естествознания и техники АН СССР. В первый день заседание вел И. В. Блауберг, во второй — Э. Г. Юдин.

Учитывая, что опыт проведения различного рода симпозиумов показал нецелесообразность и сравнительно невысокую эффективность широких и многоядных собраний, и вместе с тем тот факт, что в последнее время «модность» системной проблематики нередко подрывает авторитет системных исследований и заслоняет их реальные задачи, организаторы встречи-дискуссии с самого начала намеренно проводили линию на предельное ограничение количества участников. Участвовать во встрече-дискуссии были приглашены те специалисты, которые интересуются и реально занимаются проблемами системного подхода в биологии.

К сожалению, не все они смогли присутствовать.

В предварительной разосланной участникам примерной программе предполагалось сосредоточить обсуждение вокруг двух основных проблем: общеметодологические проблемы системного подхода в современной биологии, методологические аспекты проблемы организации и функционирования живых систем. Как представлялось организаторам встречи, именно эти вопросы являются узловыми при определении ближайших перспектив развития системного подхода к биологии, а их обсуждение должно было бы способствовать уточнению методологической проблематики и основных понятий системного подхода. Вопросы программы в той или иной мере были предварительно согласованы с большинством участников встречи.

Все эти вопросы в определенной форме были затронуты в ходе обсуждения. Однако само оно пошло по несколько иному пути по сравнению с намеченной программой и выделило свои собственные узловые пункты. Такими пунктами стали два доклада. Первый из них был сделан А. А. Малиновским и составил основу обсуждения вопроса о соотношении теории структур и теории систем в биологии. Второй доклад, сделанный Н. В. Тимофеевым-Ресовским, поставил в центр внимания проблему структурных уровней биологических систем. Обсуждение этих проблем повлекло за собой постановку некоторых других вопросов. Из них наибольший интерес вызвали вопросы об определении понятия «система», о специфически системном времени и об особенностях системного подхода в экологии. Все это и определило реальную структуру первой части книги.

Следует сделать пояснения относительно принятой в этой части формы изложения. Хотя намечавшаяся программа и реальное обсуждение довольно заметно разошлись между собой, представляется небесполезным воспроизвести эту программу перед изложением материалов встречи-дискуссии. При подготовке к печати материалов встречи редколлегия стремилась сохранить и воспроизвести живой дух дискуссии, со всей ее полемичностью, фрагментарностью, неполнотой аргументации по отдельным вопросам. Конечно, в отдельных случаях это лишает изложение характерной для солидных сбор-

ников научных трудов основательности. Но современное состояние разработки системного подхода в биологии таково, что живой спор заинтересованных сторон здесь порой не менее важен, чем солидность и фундаментальность монографического изложения.

Такой характер дискуссии сделал нецелесообразным подробное оснащение каждого выступления ссылками на выраженные в литературе точки зрения. Поскольку книга все-таки отличается от непосредственного обсуждения, редколлегия сочла полезным дополнить некоторые из разделов небольшими комментариями, вводящими читателя в современное состояние вопроса. Комментарии подготовлены И. В. Блаубергом, К. М. Хайловым и Э. Г. Юдиным.

Примерная программа встречи-дискуссии

А. Принципиальные вопросы разработки системного подхода в биологии. Какие перспективы открывает системный подход в биологии и может ли он рассматриваться как особый подход к биологическим объектам? Насколько и в каком направлении изменились представления о системе живой природы как предмете теоретической биологии? В какой мере эти изменения связаны с изменениями в способах подхода и описания биологических объектов?

Теоретическая биология и общая теория систем. В какой мере теоретическая биология может рассматриваться как теория биологических систем? Каково взаимоотношение теории биосистем: а) с общей теорией систем как междисциплинарной концепцией; б) с теоретическими моделями различных уровней биологической организации?

Б. Организация и функционирование живых систем.

1. Исходные понятия. Каково современное содержание основных понятий, в которых описывается функционирование биологических систем: «система», «структура», «организация»; их взаимосвязь.

2. Система. Как Вы склонны определить систему? Можно ли временно обойтись без определения, опираясь на интуитивное понимание? Возможно ли различие объектов на системные и несистемные? Каковы критерии «систем» в отличие от «не-систем»? Каковы принципы выделения субсистем в системе? Как может быть изображено соподчинение субсистем в системе?

3. Организация системы. Как Вы определяете организацию системы? Отличается ли организация системы от ее структуры, строения? Существуют ли разные типы организации (в одной системе или в разных системах)? Каковы обобщенные критерии и параметры организации? Возможно ли количественное выражение организации? Какие количественные или другие объективные критерии могут быть использованы для сравнения систем по «высоте», «уровню», «совершенству» организации?

4. Система понятий. Как Вы представляете себе систему понятий для описания функционирования биосистем? Нужны ли для этого новые понятия?

5. Функционирование систем. Как Вы определяете понятие «функция системы» или «функция части системы»? Каково взаимоотношение понятий «функция» и «связь»? В чем специфика биологических связей? Возможные подходы к классификации биологических связей. Каково соотношение специально научных и логических подходов к изучению связей в биологических объектах?

6. Возможные подходы к синтезу представлений об организации и эволюции живых систем.

УЧАСТНИКИ ВСТРЕЧИ-ДИСКУССИИ

- БЛАУБЕРГ ИГОРЬ ВИКТОРОВИЧ** — кандидат философских наук, руководитель группы системного исследования науки Института истории естествознания и техники АН СССР
- БЛЮМЕНФЕЛЬД ЛЕВ АЛЕКСАНДРОВИЧ** — профессор, доктор химических наук, заведующий кафедрой биофизики физического факультета МГУ, заведующий лабораторией физхимии биополимеров Института химической физики АН СССР
- ВИКТОРОВ ГЕОРГИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ** — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии развития АН СССР
- ГЕОДАКЯН ВИГЕН АРТАВАЗДОВИЧ** — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института биологии развития АН СССР
- ГРОМОВ ГЕОРГИЙ НИКОЛАЕВИЧ** — кандидат технических наук (Ленинград)
- ЗАЙКА ВИКТОР ЕВГЕНЬЕВИЧ** — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии южных морей АН УССР (Севастополь)
- КРЕМЯНСКИЙ ВИКТОР ИЗРАИЛЕВИЧ** — кандидат философских наук, старший научный сотрудник Института философии АН СССР
- МАЛИНОВСКИЙ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ** — профессор, доктор биологических наук, кафедра медицинской генетики медико-биологического факультета 2-го Московского медицинского института
- МАМЗИН АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ** — кандидат философских наук, заведующий сектором Ленинградского отделения Института философии АН СССР
- МОЛЧАНОВ АЛЬБЕРТ МАКАРЬЕВИЧ** — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Института прикладной математики АН СССР, профессор Московского физико-технического института, заведующий математической лабораторией Института биофизики Пущинского центра биологических исследований АН СССР
- САДОВСКИЙ ВАДИМ НИКОЛАЕВИЧ** — кандидат философских наук, старший научный сотрудник Института истории естествознания и техники АН СССР
- СВИРЕЖЕВ ЮРИЙ МИХАЙЛОВИЧ** — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института медико-биологических проблем Министерства здравоохранения СССР
- СЕТРОВ МИХАИЛ ИВАНОВИЧ** — кандидат философских наук, доцент, заведующий кафедрой философии Северо-Западного политехнического института (Ленинград)
- СТАРОВОБОГАТОВ ЯРОСЛАВ ИГОРЕВИЧ** — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Зоологического института АН СССР
- ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ НИКОЛАЙ ВЛАДИМИРОВИЧ** — профессор, доктор биологических наук, старший научный сотрудник Института медико-биологических проблем Министерства здравоохранения СССР
- ХАЙЛОВ КИРИЛЛ МИХАЙЛОВИЧ** — доктор биологических наук, старший научный сотрудник Института биологии южных морей АН УССР (Севастополь)
- ЮДИН ЭРИК ГРИГОРЬЕВИЧ** — кандидат философских наук, старший научный сотрудник Института истории естествознания и техники АН СССР
- ЯБЛОКОВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ** — доктор биологических наук, заведующий лабораторией постнатального онтогенеза Института биологии развития АН СССР

ТЕОРИЯ СТРУКТУР И ЕЕ МЕСТО В СИСТЕМНОМ ПОДХОДЕ

А. А. МАЛИНОВСКИЙ

В рамках теории систем, как мне представляется, необходимо сначала определить специфику различных подходов к системному объекту. В этом смысле я исхожу из определения известного эмбриолога и биохимика Дж. Нидхема, который в тридцатых годах указывал, что внутреннее строение системы определяется тремя факторами: качеством элементов, количеством их и, наконец, тем, как они складываются в общую архитектонику системы, т. е. тем, что я бы назвал *структурой* системы.

Если говорить о каждом из этих аспектов, то можно отметить, что качественный подход к объекту изучения характерен для любой научной дисциплины; количественный подход широко разработан в математике; структурный же подход не нашел еще своего полного выражения ни в одной науке. Из существующих ныне наук наиболее близко к его разработке подошла кибернетика, но, на мой взгляд, и она не располагает теорией структур.

Можно ли изучать структуры в абстрактном разрезе? По-видимому, можно. Так мы можем изучать, например, централизованные и децентрализованные структуры, и все децентрализованные структуры будут иметь нечто общее, будь это планетная система или какие-то биологические образования, скажем, муравейник с центром в виде матки и т. д. или организм с центральной нервной системой, которой он управляется. Во всех этих случаях мы можем найти общие элементы, некоторые общие черты. Они и будут объектом изучения теории структуры.

В этом смысле учение о структурах является в некотором отношении сходным с математикой. Математика позволяет изучать количественные закономерности, не интересуясь качественной стороной. Два, умноженное на два, равняется четырем; это справедливо и для галактики, и для мысленных образов, и для любых других элементов, если мы берем их два раза по два. Точно так же и в учении о структурах возможна та же степень абстрактности, которая позволяет выделять то, что специфично для структур и

систем, и применять полученные результаты к различным системам, независимо от того, о какого типа системах идет речь.

Учение о структурах наиболее важно и наиболее перспективно для биологических систем. При этом, однако, надо иметь в виду, что мы не можем на данном этапе полностью изучить те или иные конкретные структурные закономерности в системах, не считаясь в какой-то мере с качеством элементов и с количественной стороной системы.

Чтобы пояснить эту взаимосвязь разных подходов, я обращусь к элементарному вопросу математики. Если взять арифметическую задачу, простую школьную задачу, то мы видим, что ее решение обычно опирается на применение какого-то из четырех правил арифметики: сложения, вычитания и т. д. Но, прежде чем производить определенное действие, решающий задачу должен каким-то образом определить взаимоотношение тех элементов, которые он будет взаимно сочетать. Скажем, он должен определить, надо ли умножить пять на восемь или их надо сложить. Решение этого вопроса зависит от того, в каком взаимоотношении находятся элементы рассматриваемых совокупностей. Это решение принимается обычно интуитивно, но оно является по существу установлением определенного взаимоотношения структур, структур той системы, которая является предметом вычисления со стороны ученика, решающего эту задачу.

Таким образом, математика в своих даже самых элементарных шагах, начиная с того, чтобы хотя бы интуитивно установить взаимоотношения определенных величин, а уже после этого производить с ними операции в зависимости от типа установленных отношений. Иначе говоря, количественный подход предполагает определенное изучение структуры. Более широко это значит, что указанные нами три подхода к системе — количественный, качественный и структурный не могут быть полностью изолированы друг от друга. Но для развития любого из этих подходов нам необходимо максимально абстрагироваться от остальных подходов. Желательно свести к минимуму те моменты, которые являются в данном случае необязательными, привносятся со стороны других подходов.

В развитии каждой науки наступает момент, когда в качестве специального направления исследований начинает выделяться построение теории. Это связано с тем, что фактологический материал науки становится достаточно объективным. Здесь уже перестает играть роль личный опыт, позволяющий интуитивно корректировать неточные выражения при описаниях. Наиболее общие факты науки начинают играть роль объективных источников, которые могут служить основанием для дальнейшей переработки информации, для создания теории. Это уже не податливая глина субъективного опыта, а твердые кирпичи четко сформулированных описаний фактов, из которых теоретик, как архитектор, может

строить теорию. Такое изменение организации науки наиболее ярко иллюстрируется физикой, но и не только физикой, а также такими науками, как астрономия, геофизика, и некоторыми гуманитарными науками, как этнография, где в настоящее время теоретическое направление исследований существует уже сравнительно независимо от полевой этнографии. Биология в этом отношении в какой-то степени отстала. Причина этого заключается, во-первых, в огромном материале, а во-вторых, здесь играют свою роль и необычайная изменчивость биологических параметров, и сложный характер изучаемых объектов, и некоторые исторические предпосылки. Если говорить точно, то, пожалуй, теоретическая биология как таковая начинает создаваться только в настоящее время. Но, конечно, задолго до этого создавались отдельные теоретические работы, притом самого фундаментального значения. Ч. Дарвин, из фигур крупного масштаба, был первым, кто, исходя из материалов, собранных в основной массе другими исследователями, создал стройную теорию, построенную с железной логикой, теорию, в которой он опирался на очень немногие, но зато хорошо аргументированные предпосылки. Что он сделал? Он взглянул на вопросы приспособления не антропоцентрически, а, если выразиться несколько вольно, организмоцентрически. Основным у него было установление взаимосвязи между наследственностью, изменчивостью и геометрической прогрессией размножения. Его решение вопроса было связано и с количественным подходом. Но его количественные меры были очень широки, имели почти качественный характер. Он говорил: *более жизнеспособен — менее жизнеспособен, большое потомство — небольшое потомство.*

После Ч. Дарвина на основе его теории был развит сложный и точный математический подход в работах С. С. Четверикова, С. Райта, Р. Фишера, Дж. Холдэна, А. Н. Колмогорова — с точки зрения генетики, а также в работах В. Вольтерра, А. Н. Колмогорова и др. — с точки зрения изучения борьбы за существование в природе. Но все эти математические работы были основаны на логически точном структурном подходе, который был создан Ч. Дарвином. Основной вывод Ч. Дарвина полностью подтвердился, и хотя мы получили много новых интересных результатов, они все же основаны целиком на дарвиновском подходе. Пожалуй, можно сказать, что по значимости основной вывод Дарвина далеко превосходил те выводы, которые делались позже с более точным подходом и сложным математическим аппаратом уже на основе его результатов. Последнее замечание не означает малой эффективности математического подхода вообще. Но на данном примере можно видеть, что к *настоящему* моменту и *специально в области эволюционной теории* структурный, качественный метод дал пока больше, чем дополняющие его математические (в традиционном смысле) исследования.

Подходы к теоретической биологии шли и по другой линии, в первую очередь, начиная с И. М. Сеченова, по линии физиологии. Целый ряд чисто теоретических структурных положений развил И. П. Павлов и такие его ученики, как академик П. К. Анохин и др. Еще в 1912 г. физиолог Н. А. Белов очень точно сформулировал представление об отрицательных обратных связях, которые он называл немного иначе, но структуру которых он описал совершенно точно. Эти отрицательные обратные связи он считал основой всех жизненных процессов, ибо такие связи обеспечивают равновесие в организме. Позже он с полным основанием стал доказывать, что те же формальные связи обуславливают равновесие в любых системах как живых, так и неживых.

Дальше это направление развивалось, частично уже основываясь на строгих экспериментах, в работах М. М. Завадовского. Позже этот вопрос пришлось несколько дополнить, в частности и сегодняшнему докладчику. Оказалось необходимым говорить не только об *отрицательных*, но и о *положительных* обратных связях, ибо отрицательные связи обеспечивают только *стабильность* организма, а в жизни организма имеются определенные периоды *развития*, когда на первый план выступает *нарушение стабильности*. Для этого нужны уже положительные обратные связи.

Наступила эра кибернетики, которая узаконила абстрактное изучение систем в биологии. С другой стороны, вторжение точных методов в биологию шло и по другой линии — по линии изучения пограничных областей, связанных с молекулярной биологией. Многим из присутствующих здесь знакомы работы в этой области, начало которым положено исследованиями Н. В. Тимофеева-Ресовского, К. Г. Циммера, М. Дельбрюкка и др.

Как видно, в теоретической биологии по аналогии с теоретической физикой надо разделить два направления: одно направление можно назвать изучением «микромира» в биологии; оно связано с молекулярной биологией и пролегает на грани между биологией и другими науками, там, где биологические закономерности переплетаются с физическими.

Другое направление — это изучение «макромира», где мы имеем дело с процессами специфически биологическими и где физические и химические процессы в лучшем случае выступают как элементы более сложной, интересующей нас системы. Это — вопросы эволюции, поведения, онтогенеза, вопросы экологии и т. д. Первое направление менее специфично для биологии и, кроме того, оно более известно. Поэтому я буду говорить о второй части, о «макромире». В теоретической биологии начало его исследования идет от Ч. Дарвина. Необычайно большой вклад внес сюда И. И. Шмальгаузен, создавший синтез самых различных областей, что нашло отражение в его книге «Организм как целое в индивидуальном и историческом развитии», а также в других

работах, показавших глубокие связи закономерностей онтогенеза, генетики и теории эволюционного развития.

Эта область теоретической биологии охватывает очень большие районы науки: от почти философских проблем (где возникают вопросы об отличии биологического уровня от косной материи и социального уровня) до чисто практических задач, где ставятся вопросы о приложении этих принципов к расчету наилучшего применения инсектицидов путем анализа эволюционных закономерностей, к изучению типов патологии, к проблемам физического развития или к проблемам продуктивности хозяйства (охотоведения, рыболовства и т. д.).

Эволюционно-генетическое и биоценотическое направления связаны по преимуществу с математическим и структурным подходами. Однако применение математики в биологии является чрезвычайно затруднительным. Почему? В первую очередь потому, что здесь необычайно велика изменчивость параметров. Млекопитающие — от мыши до кита — построены в принципе по одной и той же схеме. Однако все параметры этих двух видов резко различаются, и найти для них общие количественные выражения чрезвычайно трудно; вместе с тем их структурная общность бесспорна. И бесспорно, что именно она обеспечивает сходным образом такую высокую жизнеспособность этих двух столь несоизмеримых в остальных отношениях животных.

Может быть, это немного грубый пример, но он объясняет, как важно найти общий системный подход, а не чисто количественный. Количественный подход позволяет уточнить, развить системный подход, но количественный подход сам по себе не решает проблему.

Как уже говорилось, в рамках системного подхода наиболее важным и вместе с тем наименее разработанным является учение о структурах, то есть о таких особых образованиях, которые общи всем системам данного типа, независимо от качества элементов и области, в которой мы изучаем систему.

Если различать системы по типам их структур, то можно говорить о системах жестко построенных, в которых имеются жесткие (не в физическом, а в функциональном смысле) связи элементов, когда изменение одного элемента влечет за собой изменения в остальных частях системы. Таким системам можно противопоставить системы дискретные, корпускулярные, где отдельные элементы связаны между собой не прямо, а через посредство их отношения к среде. Иными словами, они являются независимыми единицами, образующими систему благодаря тому, что обладают рядом общих черт.

Та дискретность передачи наследственных признаков, которую противники генетики ставили в упрек этой науке, по современным представлениям является необходимым условием успешной эволюции, так как она обеспечивает наибольшую сво-

боду сочетания полезных признаков путем естественного отбора. Интересно, что аналогичное положение наблюдалось и в области изучения нервной деятельности. Ряд западных физиологов упрекали академика И. П. Павлова в том, что своим учением о рефlekсах безусловных и условных он создал корпускулярную теорию поведения вместо учения о целостной реакции организма. Так, Дж. Когхилл показал, что у личинок амфибий после выхода из икринки наблюдаются не отдельные рефlekсы, а единая, несколько более сложная реакция, которой они отвечают на любой раздражитель. Эта реакция захватывает всю личинку и приводит к продвижению ее вперед, увеличивая шансы на уход от опасностей и на пассивное улавливание пищи. Лишь позже выделяются отдельные элементарные реакции по типу рефлексов. Это казалось убедительным доказательством того, что в поведении основным являются не отдельные рефлекторные реакции, а какие-то более целостные формы. Однако нетрудно видеть логическую слабость такой постановки вопроса. То, что в эмбриональном развитии исходной является единая нерасчлененная реакция, несколько не мешает тому, что развившиеся формы поведения строятся все же на основе отдельных рефлексов. Это совершенно аналогично тому, как происхождение нашего организма из одной клетки — оплодотворенного яйца — не может служить основанием, чтобы отрицать многоклеточное строение взрослого животного или человека. В обоих случаях менее совершенная форма заменяется более дифференцированной и совершенной. Раздельность рефлексов обеспечивает возможность их комбинирования в различные приспособительные соединения как под влиянием внешней среды, так и под влиянием высших интегрирующих механизмов поведения. Проводя грубую аналогию, можно сказать, что из отдельных кирпичей можно построить и перестроить любую форму, в то время как из единой глыбы камня никакая постройка невозможна.

Аналогия между генетическими механизмами и рефлекторными формами проведена не случайно. И там и тут требуется свобода комбинирования элементов, которая позволяет легко создавать новые сочетания в зависимости от требований приспособления к внешней среде, в одном случае — в эволюции организмов, в другом случае — в их индивидуальном поведении.

Чем более дробны, чем более независимы друг от друга генетические элементы, определяющие развитие признаков организма, тем более адекватно они могут слагаться в определенные генотипы. С другой стороны, чем более независимы друг от друга отдельные рефлекторные реакции, тем более адекватно будет реагировать организм на отдельные компоненты внешних условий. Вместе с тем на более высоких уровнях развития и интеграция этих отдельных рефлекторных реакций оказывается более эффективной, если существует возможность свободно комбиниро-

вать отдельные реакции. Можно привести такой пример. Мы идем по улице. На нас падает то большее, то меньшее освещение. Наш зрачок реагирует на это освещение. В то же время мы беседуем или реагируем еще на какие-то внешние факторы. Все эти независимые реакции обеспечивают нам свободу действий и адекватность этих действий. Когда эта свобода нарушается, мы можем ожидать и нарушения приспособленности.

Охотники рассказывают, что убегающего зайца можно остановить свистком. Ориентировочная реакция зайца вызывает задержку его бега и, задерживаясь, он легко оказывается жертвой охотника. Следовательно, наличие связанности отдельных реакций может оказаться в одних случаях неблагоприятным, а в других — благоприятным.

Как уже говорилось, дискретные системы являются лишь одним из крайних возможных типов системы. Приспособление к постоянным условиям и повышение организаций достигается, как правило, путем жесткого сочетания взаимодополняющих элементов системы, как это мы видим в органе зрения (хрусталик и сетчатка), структуре сердца и т. д.

Каждый из этих типов структур обладает своими особыми преимуществами и недостатками. Дискретные структуры позволяют, как сказано, осуществлять комбинаторику и отбор. Жесткие структуры обеспечивают экономичность и в ряде случаев — большее повышение организации, но зато они труднее изменяются и легко дезорганизуются при выпадении даже одного звена. Как ни просты эти принципы, их недоучет неоднократно вел к ошибкам в решении биологических проблем. Так, В. Ру и А. Вейсман предполагали, что целесообразность организма может достигаться не только путем отбора *между* организмами, но и путем отбора элементов *внутри* организма. Нетрудно показать, что отбор внутри организма, как правило, ведет не к усовершенствованию, а к нарушениям и к гибели, так как устойчивость элементов далеко не всегда соответствует их ценности для организма. Простой пример — повышенная конкурентоспособность в организме раковой клетки по сравнению с нормальной или соединительнотканой — по сравнению с нервной. Эта ошибка не возникла бы, если бы Ру и Вейсман понимали, что отбор может вести к усовершенствованию только в тех случаях, где мы имеем дело с дискретными системами, каковыми организмы в целом не являются, и что усовершенствование путем отбора, за некоторыми редкими исключениями, касается именно самих элементов, подвергающихся отбору.

В биологических системах мы наблюдаем по мере перехода от более элементарных на более высокие уровни закономерное чередование этих двух типов систем: жестких и дискретных. Так, в гаплоидном организме выпадение даже одного гена может угрожать ему гибелью, подобно тому как разрыв цепи в одном зве-

не нарушает всю цепь. Однако гаплоидные организмы редки, и, как правило, в каждом ядре клетки имеется два гаплоидных набора хромосом, способных к взаимной замене и компенсации — случай простейшей дискретной или корпускулярной системы. Соотношение ядра и плазмы опять имеет характер жесткого взаимного дополнения с разделением функций и невозможностью, как правило, раздельного существования. Сходные клетки одной ткани представляют вновь систему дискретную с возможностью взаимной замены клеток, что часто имеет место при различных поражениях одних клеток и размножении замещающих их аналогичных. Разные ткани в одном органе жестко дополняют друг друга. Парные и множественные органы опять представляют случай статистической дискретной системы. Системы органов (нервная, кровеносная, выделительная и т. д.) вновь связаны между собой жестко в целостном организме. Такое чередование дискретных и жестких систем мы видим и далее.

Таким образом, изучение биологических систем должно несомненно включать в себя качественный и количественный подходы. Однако мне представляется, что центральным звеном здесь является создание учения о структурах, которое позволит, кроме всего прочего, более адекватно применять качественный и количественный подходы. Значимость такого учения подчеркивается тем фактом, что в очень большом числе случаев в биологических явлениях при изменчивости и неустойчивости параметров основные структуры и типы систем оказываются весьма стабильными. Мы проиллюстрировали это на несколько упрощенном примере сходства структуры у крайних по величине форм млекопитающих: мыши и кита. Но, разумеется, такая устойчивость основных типов систем отмечается и гораздо шире. Именно это позволило ставить в самой общей форме различные проблемы в области эволюции, одинаково решающиеся в принципе для многоклеточных и одноклеточных, для растений и животных.

Изучение типов систем и структур самих по себе чрезвычайно важно еще и потому, что позволяет четко решать некоторые вопросы, абстрагируясь при этом в известной мере от более детальных свойств объектов. Говоря образно, принципы архитектуры можно изучать и тогда, когда строительный материал известен лишь в самых общих чертах; нам не обязательно вдаваться в анализ химического и структурного состава кирпичей, но нужно лишь учитывать некоторые их свойства, знание которых необходимо при постройке здания. Поэтому понимание основных связей между строением системы и ее функцией позволяет решить сразу многие теоретические и практические вопросы.

Любопытно, что в свое время А. Н. Колмогоров, который развивал направление, заложенное В. Вольтерра по вопросу о соотношении хищника и жертвы, перешел на более широкие качественные методы и получил интересные результаты в своей работе,

опубликованной в 1935 г. на итальянском языке. Он с полным основанием высказывал затем мнение, что необходимо развитие качественных математических методов, и несомненно, что в ряде биологических вопросов это особенно нужно и может оказаться одним из основных направлений в развитии общей теории. Но как ни важны качественные математические методы, можно думать, что они будут давать наилучший результат в том случае, если будут основываться на тщательно разработанном структурном подходе к объектам.

Такой подход есть в математике и кибернетике, но биология имеет свои законы, изучаемые ею структуры по своим формам наиболее богаты и без их исследования и обобщения трудно понять явления жизни. Если бионика пока ищет и переносит в технику частные биологические механизмы, то еще более важной задачей является установление общих системных закономерностей, многие из которых могут оказаться применимыми в более широкой области, чем сама биология. Вероятно, прав Людвиг фон Берталанфи (хотя у него это было сформулировано в более общей форме и менее реализовано), что надо изучать в биологии системы любого типа. Кибернетика, изучающая управляющие системы, дала мощный стимул этому направлению в биологии, но потребности биологической теории шире по крайней мере по сравнению с тем, как это декларируется кибернетикой.

Для биологии важно изучение систем самых различных типов, а не только управляющих. Очень многие вопросы могут лежать в области изучения структур исполнительных систем, приспособленных к относительно пассивному функционированию под влиянием вышестоящих управляющих аппаратов, но в то же время очень специфичных по своей структуре, соответствующей их функции. Таковы, например, структуры, основанные на многоклеточности, на множественности различных органов, на приспособительном упрощении механизма, о котором мы говорили выше, и т. д.

Подходы к изучению структур, как мне представляется, могут быть различными. Возможен, в частности, теоремный подход, издавна широко используемый в математике, и подход аксиоматический. В этой связи можно заметить, что долгое время математика развивалась эмпирически и многие закономерности в ней еще 3—4 столетия тому назад были получены чисто эмпирическим путем. Лишь впоследствии они были «чисто» сформулированы и хорошо отработаны, были определены правила оперирования с аксиомами и развиты из них положениями.

Поэтому на сегодняшнем этапе мы должны не только пытаться формулировать структурные закономерности в абстрактной форме, но и отыскивать эти закономерности в живой природе. В частности, проводившееся мною различие жестких и дискретных систем в значительной степени вызвано тем, что в этом возникла опре-

доленная потребность. Сначала это была потребность скорее дискуссионная, но в дальнейшем появилась возможность обобщить выдвинутый принцип и сделать определенные выводы.

Большую роль в изучении структур играет установление аналогий между различными явлениями. Там, где мы видим аналогии, можно с большим основанием формулировать выводы, смысл которых состоит в том, что если в различных типах явлений имеются сходные закономерности, то эти закономерности можно рассматривать как общеструктурные, — как это делается применительно к количественным отношениям, формулируемым независимо от характера объектов.

Известно, что уже не раз предпринимались попытки создать общее учение об аналогиях. Многие присутствующие знают книгу М. Петровича, написанную в начале XX в., которая так и называется: «Учение об аналогиях». Петрович пытается здесь найти общие закономерности в разных явлениях и выразить их в абстрактной форме. Я не очень хорошо помню его конкретные выводы, но у меня создалось впечатление, что в целом его попытки были в принципе правильны. Однако недостаточно хорошо проведенные, а может быть — и слишком преждевременные, они не имели дальнейшего развития. Тем не менее сама такая установка является правильной.

Последний вопрос — что дает подход к биологическим системам с точки зрения структур и дает ли он что-нибудь вообще?

Он несомненно дает определенные познавательные результаты. Опираясь на него, мы можем понять, почему в одном случае развитие идет по одному пути, а в других случаях — по другому пути. Мы можем сказать, почему одни нервные реакции являются корпускулярными, а другие — жесткими, связанными с жестко запрограммированными формами поведения. В первом случае это объясняется приспособлением к неопределенной среде, а во втором случае, например в половом поведении, пищевых рефлексах и т. д., за жесткими структурами стоит специфическая форма, которая наблюдается в среде однотипно. То же самое относится к внутренним механизмам, которые определяют корреляцию между различными органами и звеньями. Здесь тоже можно говорить о жестких формах системы, которые дают организму определенные преимущества.

К таким же представлениям об абстрактных структурах относится представление о типах обратных связей. М. М. Завадовский, один из первых указавший на отрицательные обратные связи, определил их как «плюс — минус» взаимодействие. Если А с Б связаны в одну сторону положительно, а в другую — отрицательно, то это значит, что при стимуляции будет «плюс — минус», а при угнетении «минус — плюс». Эти связи были указаны в свое время Беловым, потом экспериментально разработаны Завадовским. Для биологии полезно дифференцировать эти связи,

выделив в особый класс положительные обратные связи. Такая дифференциация дает ряд интересных результатов. Например, болезни можно классифицировать по типу кривой их развития, которая имеет разный качественный характер. С известными оговорками можно сказать, что имеются болезни нарастающие, такие, как гипертония, некоторые формы шизофрении, глаукома и т. д. Другие болезни при благоприятных внешних условиях имеют тенденцию сохранять патологическое состояние на некотором относительно постоянном уровне. Таковы в ряде случаев язвы желудка и другие трофические язвы, психастения, экземы и т. д. Некоторые заболевания, например циркулярный психоз, могут давать определенные циклы, другие, как эпилепсия, под влиянием провоцирующего момента или без него на фоне относительного благополучия — давать неожиданные взрывы с временно благополучным окончанием (но с дальнейшими дегенеративными изменениями или без них). Нетрудно показать, что каждый из таких типов патологии связан со специфическим для него типом обратной связи. Так, большинство нарастающих заболеваний должно иметь в своей основе наличие *положительной* обратной связи, которая все более усиливает проявление болезни. Тяготеющие к равновесию заболевания, как правило, имеют в основе некоторую стабилизацию, обусловленную наличием *отрицательных* связей (но с *нарушенными параметрами*) и приводящую поэтому к отклонению от нормы. Циклические заболевания, по-видимому, основаны на такой же отрицательной обратной связи, но действующей с *запозданием*, подобно тому как, например, действует с запозданием отрицательная обратная связь между хищником и жертвой, что приводит к циклическим колебаниям численности тех и других. Наконец, взрывы типа эпилептических имеют наиболее вероятное объяснение в сочетании положительных и отрицательных обратных связей.

Такая классификация позволяет рациональнее подойти к анализу патогенеза заболеваний. Она не дает, разумеется, непосредственно детального решения о причинах и путях развития болезней, но зато позволяет сразу откинуть целый ряд гипотез, не включающих соответствующие типы обратных связей, поскольку такие гипотезы не могут играть здесь существенной роли.

Представление о корпускулярности механизма наследственности также имеет непосредственно практическое значение. Например, в борьбе с вредителями и инфекциями обычно применяются антибиотики или инсектициды. Часто, применяя определенный инсектицид, получают среди уничтожаемых насекомых расу, к нему устойчивую. Тогда приходится переходить к другому инсектициду и т. д. Таким образом, идет бесконечная борьба с перекосом, пожалуй, на стороне не человека, а его врага. Подобный подход к борьбе с вредными насекомыми неправилен, так как всегда существует достаточно большая вероятность приспособ-

собраться к одному инсектициду путем единичной соответствующей мутации. Когда же вид таким образом приспособится, то последующее размножение даст миллионы особей. На их фоне применение нового инсектицида также может быть нейтрализовано новой мутацией. Если эта мутация суммируется с прежней, то это может дать новую расу, устойчивую уже к обоим ядам. Напротив, одновременное применение хотя бы только двух инсектицидов требует для выживания насекомого и создания устойчивой расы возникновения у одной особи одновременно двух полезных специфических мутаций, да еще прочно сцепленных, ибо если они разойдутся в потомстве, то все потомки, с одной только защищающей их мутацией, погибнут от второго яда, защиты от которого они лишились, потеряв вторую мутацию. Но возникновение двух мутаций, каждая из которых одновременно защищает от одного из специфических ядов, да еще мутаций сцепленных, — явление практически невозможное. Поэтому, хотя это менее экономично на первое время, одновременное применение двух-трех разнотипных инсектицидов было бы более рентабельным, так как оно почти гарантирует от возникновения устойчивых к ним рас насекомых.

То же относится и к применению антибиотиков. Два антибиотика или антибиотик плюс какой-то другой бактерицидный препарат, применяемые одновременно, а не последовательно, дали бы возможность избежать возникновения устойчивых рас микроорганизмов или сделать такое возникновение гораздо более редким.

В заключение я хочу отметить, что на данном этапе наиболее эффективным и необходимым звеном в биологии для развития теории систем является развитие учения о структурах, хотя мы должны пользоваться еще и математическим методом и методами качественного описания. Изучение структур должно проводиться при максимально возможном отвлечении от других подходов. Эффективность структурного подхода особенно очевидна в биологии, где сплетается масса различных моментов, различных факторов, в результате чего количественные параметры оказываются очень многообразными, качественные характеристики очень изменчивыми, но структурные закономерности довольно устойчивыми. Например, типы строений млекопитающих или насекомых все же очень устойчивы при огромной вариабильности количественных показателей и их качественного приспособления.

Эффективность структурного подхода в биологии определяется тем, что здесь мы имеем дело с множеством неизвестных. В этом смысле можно провести аналогию с теорией вероятностей: применять ее для двух величин было бы неэффективно, но без нее не обойтись при изучении взаимодействия большого числа величин. Аналогично там, где имеется много неизвестных, мы мо-

жем выяснить общие черты структур, можем пользоваться теорией структур, чтобы определить особенности данных систем и их место среди других систем.

Ответы на вопросы

В. И. Кремьянский. Вероятно, выделяя крайние типы структур биологических систем, Вы не исключаете существование систем смешанного типа, переходных, а главное — обобщающих «жесткий» и дискретный подходы.

А. А. Малиновский. Совершенно верно. Во-первых, мы имеем тип промежуточный, во-вторых, имеются системы такого типа, который построен по принципу чередования двух типов структур, и, наконец, есть третий тип, где жесткость в какой-то мере синтетически соединяется с корпускулярностью. В этом отношении очень показательна, например, система эндокринных органов, будь то половые или щитовидные железы. Имеется жесткая связь этих органов через одно центральное звено и, с другой стороны, каждое из остальных звеньев является конечным в цепи, благодаря чему оно и может безболезненно удаляться и заменяться. Такой тип структуры в значительной мере регулирует развитие всего организма. Очень характерно при этом, что соответствующие гормоны являются очень устойчивыми, и гормоны, взятые у одного класса, можно применять к особям другого класса.

А. В. Яблоков. Не можете ли Вы подробнее сказать, в чем заключается структурный подход Дарвина? Ведь обычно в нашей литературе противопоставляются эволюционный подход Дарвина и структурный подход.

А. А. Малиновский. Говоря о структурном подходе Дарвина, я понимаю под структурой взаимоотношения таких основных факторов живой природы, как наследственность, изменчивость и геометрическая прогрессия размножения. Может быть, я употребляю понятие структуры немного не в том смысле, как обычно. Я говорю о структуре как о типе взаимоотношений между явлениями. Для меня это не структура организма, а структурная особенность живого — размножение, наследственность и изменчивость.

К. М. Хайлов. Какое определение Вы даете понятию системы?

А. А. Малиновский. Я не даю определения системы. В каждом конкретном случае, я полагаю, можно рассматривать любую изолированную группу единиц как систему, которую мы выделяем по тому или иному принципу. Важно лишь, чтобы был сформулирован и проведен единый принцип. Пока я не вижу достаточно универсального определения. В нашей совместной статье с А. И. Уемовым в книге «Організм як система» (Киев, 1966) мы пытались определить систему как объединение элементов, ос-

нованное на таком систематизирующем отношении, которое повторяется в этом объединении и распадается на меньшее число элементарных отношений, чем число отношений элементов, не образующих системы. Мы можем говорить о любом принципе, выделяемом в комплексе и превращающем его в систему, если такое выделение преследует какую-то практическую цель.

К. М. Хайлов. Вы ставите знак равенства между структурой и организацией?

А. А. Малиновский. Нет.

К. М. Хайлов. Тогда как Вы различаете эти понятия?

А. А. Малиновский. Структура — это тип взаимоотношения без учета того, является ли он высоко или низко организованным. Чтобы иметь определенный тип взаимоотношений, надо определенным образом упорядочить систему. Организованность же — иное понятие, отличное от упорядоченности и от структуры.

Если говорить об изменении качеств с биологической точки зрения, то можно рассматривать организованность как повышение жизнеспособности. Мне кажется, что неправы те, кто пытается поставить знак равенства между упорядоченностью и организованностью. В некоторых случаях высокая упорядоченность может мешать организованности, и наоборот. Есть, по-видимому, оптимум упорядоченности для данной организованности.

Система — это просто констатация факта существования определенного объединения. Упорядоченность — это степень вероятного сочетания элементов в том или ином типе взаимоотношений. Структура — самый тип этих взаимоотношений, а организованность — это степень приспособления данного типа структур, степень потенциальных возможностей данной системы.

К. М. Хайлов. Вы выражаете организованность через совершенство. Совершенство — понятие, которое само требует определения. Как определить совершенство? Ваша попытка, мне кажется, заключается в том, чтобы определить совершенство через интенсивность, то есть повышение функции. Так ли это?

А. А. Малиновский. Повышение функции — это один из показателей. Иногда может быть и понижение функции. Я думаю, что одноклеточные оказываются более приспособленными, чем те организмы, которые неспособны инцестироваться.

К. М. Хайлов. Возьмем зависимость между весом и любой физиологической или биохимической функцией. Если эта функция отнесена к выделенным затратам тепла, потреблению кислорода на одну особь, то зависимость от веса имеет экспоненциальный характер. Если Вы рассчитываете эту функцию как удельную, то есть на единицу веса тела, то тогда с увеличением веса интенсивность функции не повышается. Получается, что в эволюции имеет место не столько интенсификация функций, сколько, наоборот, их падение. Выходит, что эволюция идет вверх, а функция понижается.

А. А. Малиновский. Прежде всего я хотел бы заметить, что, например, насекомые прошли эволюцию более длительную, чем мы, поэтому они более совершенны в ряде отношений, в том числе и энергетически. Это связано с тем, что эволюцию мерить нужно не годами, а поколениями; поколений же у насекомых было больше. Но дело не только в этом. Вопрос главным образом заключается не в интенсивности энергетических функций, а в качестве ряда других функций, в первую очередь — в способности к получению и использованию информации. Здесь же положение иное. Получить информацию слону легче, и он, вероятно, ее более полно использует, чем какой-нибудь жук.

Поэтому я думаю, что здесь энергетические мерки не подходят, они очень важны и необходимы, но основная мерка — это потенциальная способность выживания, определяемая не только и не столько энергетическими показателями, сколько получением и переработкой информации.

Я это формулировал бы так. Всякая эволюция сводится к увеличению избирательности в отношении среды, а избирательность возрастает при повышении организации. Мамонты вымерли как раз благодаря понижению избирательности в определенном отношении. У них замедление эволюции усиливалось за счет увеличения особи и уменьшения интенсивности отбора, уменьшения возможностей мутационного процесса для отбора.

Конечно, во всех этих случаях количественные показатели играют необходимую роль: чем выше эти показатели, тем больше возможна комбинаторика элементов и, следовательно, возможно большее богатство структуры и большее совершенство организации.

Поэтому, хотя насекомые прошли эволюцию более длительную и в ряде отношений, несомненно, более совершенную, чем мы, один — и самый важный — аспект эволюции был у них ограничен — это способность к усвоению и переработке информации. Благодаря чисто количественным ограничениям размеров центральной нервной системы для них этот путь эволюции заперт.

В эволюции имеется много закрытых путей. Многие, в том числе и я, отмечали, что в эволюции не появились ни колесо, ни винт, ни другие подобные вещи, которые человек легко мог использовать даже на первых стадиях своего развития. Наша техника стоит еще очень низко по сравнению с биологическими системами в смысле отшлифованности, зато она менее ограничена качественно, потому что мы можем заранее прогнозировать возможности и идти на некоторую временную убыль, создавая благодаря этому структуры, которые живая природа не может создавать из-за близорукости естественного отбора: для него пригодно то, что может дать преимущество на ближайшем этапе.

Ю. М. Свирижев. Вы говорите о системном подходе, но мне не очень ясно, что это такое. Любой подход подразумевает опреде-

ленное чередование операций и определенный тип самих операций. Какую операцию Вы считаете характерной и необходимой для выделения какого-то множества в качестве системы? И, во-вторых, какую процедуру, по-Вашему, нужно производить с выделенным Вами множеством? Может быть, суть системного подхода можно показать на примере?

Вот, скажем, у нас есть объект. Например, мы выделили некое множество индивидов или молекул. Что мы должны дальше делать с этим множеством, чтобы можно было говорить о системном подходе? Например, физик может определить вес этого множества. Очевидно, это не будет системным подходом.

Г. Н. Громов. Я бы хотел дополнить вопрос Ю. М. Свирижева. Вы говорили, что теорию систем следует строить изолированно от других подходов, и вместе с тем сравнивали ее с математикой. Но ведь математика построена на ряде аксиом, и только на этой основе мы получаем стройное здание теорем. Например, эмпирически закономерности электромагнитного поля были получены задолго до теории Максвелла. Но теоретические закономерности дала лишь аксиоматически построенная теория Максвелла. Существует ли у Вас определенная система аксиом и определенная последовательность операций, при помощи которых можно получить ту или иную структуру?

А. А. Малиновский. Я начну с конца. Вряд ли имеет смысл ссылаться на четырехтысячелетнюю историю человечества. Как вы знаете, аксиома — это довольно позднее произведение математиков в развитии науки. Сейчас в изучении систем такой период, когда мы можем полуэмпирически формулировать некоторые положения, можем говорить о некоторых обобщениях как элементах учения о структурах. Грубо говоря, пока мы можем только сравнивать. В конечном счете система определяется и количественными параметрами, но ими можно оперировать лишь при наличии развитого учения о структурах. А пока, на мой взгляд, говорить об аксиомах было бы преждевременно.

Для меня есть некоторые бесспорные аксиомы. Например, для меня аксиома, что в дискретной системе принцип наименьших непригоден так же, как в жесткой системе непригоден принцип отбора. Я знаю нескольких авторов, занимавшихся теорией структур в том направлении, которое представляется мне правильным. Это М. Петрович, А. А. Богданов, в биологии — М. М. Завадовский, Н. А. Белов и некоторые другие.

Я хотел бы еще раз подчеркнуть, что и в математике возможен и необходим качественный подход, когда говорят «больше» и «меньше» и не говорят о количественных закономерностях в строгом смысле.

Именно такой подход развивал А. Н. Колмогоров в работе, о которой я уже говорил. Характеризуя взаимоотношение хищника и жертвы, Колмогоров указывает, что при переходе вверх *опре-*

деленного предела развития жертвы, хищник начинает размножаться, а при переходе этого предела вниз он начинает убывать, потому что редко встречается жертву.

Что касается процедур, то мне бы хотелось сказать вот что: имеется новое направление, которое представляет ценность, поскольку оно позволяет выделить некоторые типы систем, которые мы можем различать по их структурам. Выявляя определенные аналогии и доводя их до уровня структурных аналогий, мы можем сделать вывод: данная структура ведет к таким-то результатам.

В такой постановке вопрос ставится в зависимости от конкретной задачи. В абстрактном же разрезе нас интересует следующий момент: типы структур и определяемые этим особенности функционирования систем.

Здесь, конечно, еще нет той операциональной строгости и четкости, о которой говорят Ю. М. Свирежев и Г. Н. Громов. В изучении структур мы, образно говоря, находимся сейчас на том уровне, когда есть сложение и вычитание, но еще нет умножения и деления. Приходится поэтому начинать с азов.

Л. А. Блюменфельд. Что такое высоко и что такое низко организованная система, что является здесь критерием?

А. А. Малиновский. С моей точки зрения, потенциальная жизнеспособность. Самое трудное, как мне кажется, в том, чтобы понять следующую вещь: высокоорганизованная система должна обладать свойствами и жесткой, и корпускулярной систем; они взаимно дополняют друг друга, и наличие только одной из них еще не определяет достаточной жизнеспособности.

Наличие гибкости и пластичности в корпускулярной, дискретной системе и наличие высокой организации, которая только возможна при жесткой системе, являются, каждое в отдельности, необходимыми условиями, но, вероятно, недостаточными.

Л. А. Блюменфельд. Не получается ли здесь какого-то порочного круга? Ведь Вы говорили, что эволюция идет в сторону повышения организации.

А. А. Малиновский. Нет, это, может быть, одно и то же, но здесь порочный круг не получается. Я говорил, что повышение приспособления связано с увеличением получения и переработки информации. И мне кажется, что такое понимание пока что дает нам практически достаточно много. Другое дело, что оно, может быть, дает недостаточно структурных показателей. О некоторых из них я говорил, но здесь, конечно, могут быть разные точки зрения.

Поскольку мы делаем первые шаги, много сказать вряд ли здесь возможно, но все-таки кое-что сказать мы можем. Я думаю, что и на этом спасибо.

К. М. Хайлов. Я хотел бы несколько развернуть тот же вопрос. Возьмем абстрактную дихотомическую схему. Можно ли

сказать о двух системах, возникших в результате функциональной дивергенции, что их организация может быть оценена в категориях «выше» или «ниже», принимая во внимание, что их элементы выполняют разные функции?

А. А. Малиновский. Мне кажется, что на этот вопрос нельзя ответить в общем виде. Эволюция может быть в разных условиях различной. В Старом Свете эволюция шла скорее, чем в Австралии. Существовали какие-то условия, которые за тот же срок обеспечили там и здесь разную степень приспособления. Кролики могли в Австралии вытеснить других животных, хотя в наших условиях их приспособленность недостаточна для этого.

Здесь важно не столько конкретное звено или пройденный этап, сколько то, какая получена структура; а это зависит от конкретных условий эволюции, а не от количества звеньев, которые пройдены в данном эволюционном процессе. Поэтому вполне возможно, что более короткая эволюция дает больший эффект. Хотя человек прошел более короткую эволюцию, но она проходила при наличии высшей нервной деятельности; а один этот признак дает огромные преимущества перед другими видами.

Ю. М. Свирижев. Вы говорите, что эволюция ведет к некоторому повышению степени приспособленности. Но представим себе такую абстрактную схему. На каком-то отрезке довольно долго внешние условия не меняются, и некоторый тип систем достиг высокой степени приспособления. Вместе с тем параллельно развивающаяся система в силу каких-то причин достигла меньшей степени приспособления в той же среде. Но вот под влиянием определенных случайных изменений среда изменилась, и та система, которая была более приспособлена к прежним условиям среды, стала теперь менее приспособленной, чем другая система.

Из того, что Вы рассказывали, можно сделать в общем-то вряд ли справедливый для этого примера вывод, что по своей приспособленности и организованности эта вторая система в целом хуже, поскольку ее параметры ниже некоей средней промежуточной характеристики систем. У меня складывается впечатление, что когда Вы говорите о системах и их приспособленности, то Вы исходите из того, что мы должны непременно вводить некоторый телеологический критерий.

А. А. Малиновский. С этим я не могу согласиться. Дело в следующем. В биологии есть понятия идиоадаптации и ароморфоза. В конкретной устойчивой сфере может иметь место явление идиоадаптации, т. е. приспособления к данной среде; чем более специфичны явления идиоадаптации, тем менее приспособляем данный организм. В этом отношении Вы были бы правы, но есть и другой тип изменений. Переход от трехкамерного сердца к четырехкамерному — выгоден; повышение богатства реакций центральной нервной системы всегда выгодно, ибо при тех же энергетических затратах обеспечивается большее богатство реакций.

Это возможно за счет избирательного торможения, которое играет огромную роль в богатстве наших реакций и является, на мой взгляд, одной из общих тенденций развития жизни. По существу, избирательное торможение — это и есть умение получить максимальную информацию и переработать ее избирательно. Иначе говоря, максимальная защита и максимальный выбор защитных ресурсов из среды. Могу привести конкретные примеры, где это так и было.

В исследованиях Н. П. Дубинина по инверсиям было установлено, что инверсия занимает около 1% хромосом в сельской местности, а в городе она повышается до 50%, т. е. оказывается равноценной. Можно взять более простой случай. Меланистические формы бабочек оказались хорошо приспособленными в индустриальных странах. Они могли существовать, хотя были менее дифференцированными по сравнению с другими формами. Но это относится к идиоадаптации. А когда речь идет об ароморфозе (я его определяю как повышение избирательности реакций), то здесь положение такое: на одной и той же территории организм может быть способен и к приспособлению, и к изменению.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Мы слышали много крайне неопределенной терминологии. Поскольку это затрудняет дискуссию, я хотел бы попросить Вас показать, какая имеется разница между применением структурного принципа и системным подходом и какое между ними существует сходство. И заодно скажите, пожалуйста, как Вы определяете систему и структуру. Я хочу заметить: мне все равно, как Вы их определите. Но употребляя слово «система», нужно знать, что под этим подразумевается; употребляя слово «структура» — знать, что под этим подразумевается, употребляя слова «применение структурного принципа», скажем в биологии, — знать, что под этим подразумевается. И, наконец, употребляя заглавные слова «системный подход», — знать, что под этим подразумевается. Иначе дискуссия может стать очень неопределенной.

А. А. Малиновский. На первом этапе какие-то вещи бывают неизбежно лишь интуитивно определенными.

Из истории математики, с которой я немного знакомился, известно, что многие хорошие математики упрекали в свое время создателей математического анализа в том, что у них много неопределенных, неточных формулировок. Даже в эту дисциплину точность пришла значительно позже, и это, по-видимому, вполне закономерно. Трудно связывать себя жесткими формулировками, когда для этого нет достаточно выработанных основ.

☞ Под системой я подразумеваю просто любой комплекс элементов, независимо от их природы. Под структурой я разумею способ связи элементов; структура — это не сам по себе набор элементов, а скорее их связь между собой.

В первом случае мы имеем дело с конкретной реальностью,

е. с конкретным реальным набором элементов; во втором случае — только со способом их связи. Следовательно, система включает в себя и набор элементов, определенное их количество, структуру.

В системном подходе нас интересует то, что мы называем целостностью системы. А понятие структуры позволяет сказать, что данная система обладает такими-то особенностями, другая система — другими.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Мне кажется, что структура — это понятие жесткое, выражающее неизменяемость.

А. А. Малиновский. Да, система эволюционирует, а структура может оставаться одной и той же, но может и замениться.

В. И. Кремянский. Можно ли сказать, что структура — это мгновенный снимок системы?

А. А. Малиновский. Нет, это мгновенный снимок внутренних взаимоотношений в системе. Когда я говорю о структуре, в частности о централизованной структуре, то она реально может существовать одновременно в разных местах, например могут существовать две монархии, обладающие сходной структурой, но разными элементами. Благодаря этому это будут две разные системы.

Э. Г. Юдин. Значит, важно, чтобы система была в развитии, структура при этом может быть фиксированной?

А. А. Малиновский. Для классификации структур нам необходимо определить их различие. В процессе развития может меняться и структура системы. Например, в Англии в 1348 г. после чумы было 2,5 млн. чел., а сейчас там 50 млн. Очевидно, количественная характеристика системы изменилась, а система все-таки осталась в принципе та же, она лишь прошла эволюцию.

Э. Г. Юдин. Тогда непонятно, что включается в понятие системы. Если это субстрат, то он в Вашем примере полностью изменился. Если имеется в виду связь, то какова она в данном случае? Что именно мы можем выделить в этом реальном объекте в качестве инварианта? Или же мы просто утверждаем, что он акрирует, или сохраняется, или существует?

А. А. Малиновский. Любые выделенные нами множества элементов, на мой взгляд, могут представлять собой системы. В данном случае я говорю только об отождествлении системы во времени. Для такого отождествления единственным способом мне представляется установление преемственности.

Э. Г. Юдин. А что именно мы отождествляем?

А. А. Малиновский. Систему прошлую с тем, как она развивалась. Точка не имеет никакой метки, но тем не менее, когда мы определяем ее движение, то опираемся на понятие преемственности и говорим: точка проэволюционировала. Нам нужно отождествить систему саму с собой во времени, и мы говорим: структура изменилась, изменилось время, но это преемственная система,

поскольку здесь имеется инвариант, то, что в системе сохранилось. Например, в античной культуре мы видим, что центр перешел из Греции в Рим, а культура осталась.

К. М. Хайлов. Что же тогда перешло?

А. А. Малиновский. Здесь существовала преемственность. Точно так же, как в движении точки: фиксируя это движение, мы видим различное расположение точки, но вместе с тем не можем отличить одну точку от другой. Но так как она передвигалась преемственно, то мы говорим, что это одна и та же точка.

И. В. Блауберг. Позиция ясна, пора перейти к выступлениям. Я полагаю, что пожелание Николая Владимировича о необходимости определения употребляемых понятий относится ко всем присутствующим.

Теория систем и теория структур

В докладе А. А. Малиновского справедливо подчеркивается важность структурного подхода к исследованию системных объектов. По-видимому, тезис докладчика можно было бы даже усилить и сказать, что собственно системное исследование начинается лишь тогда, когда именно структура сложного объекта становится предметом анализа, то есть когда анализ выходит за пределы «качества» и «количества» элементов. Во-первых, именно выявление структуры позволяет зафиксировать объект как нечто целостное. Во-вторых, сравнивая различные системные объекты, мы обычно апеллируем к их инвариантным аспектам, которые и выражаются в понятии структуры. Инвариантность как важнейшая характеристика структуры естественно приводит к понятию связи: ведь структура в конечном счете и есть не что иное, как совокупность устойчивых связей объекта. В этом смысле теория структур по существу совпадает с теорией связей, точнее, теорией специфически системных связей. В подтверждение этого можно сослаться на текст доклада А. А. Малиновского, в котором типы структур различаются по типам связей — жестких и корпускулярных.

Такому исходному месту теории структур в рамках системного подхода вполне соответствует и по сути дела вся практика современных системных исследований. Уже в работах Л. Берталанфи в качестве одной из центральных задач общей теории систем был выдвинут поиск инвариантов в различных областях действительности¹. Структурные аспекты систем являются главным предметом исследования У. Росс Эшби, О. Ланге, М. Месаровича и ряда других ученых.

Следует специально отметить, что теория структур в понимании А. А. Малиновского отличается рядом специфических особенностей от тех версий структурализма, которые имеют распространение в гуманитарных науках. Главное отличие состоит здесь в том, что А. А. Малиновский структурный подход в биологии непосредственно связывает с эволюционным подходом, тогда как классический структурализм исходит из возможности независимого исследования процессов функционирования и развития, структуры и эволюции.

Вместе с тем само выдвижение задач структурного анализа так или иначе связано с осознанием недостаточности чисто эволюционного подхода к биологическим системам. Точнее говоря, эти задачи требуют совсем иных понятийных средств, чем те, которыми располагает эволюционная теория. Исходя

¹ См., например, *L. von Bertalanffy. General System Theory. Foundations, Development, Applications.* N.Y., 1968, p. 33—34.

именно из структурных соображений, А. А. Малиновский большое внимание уделяет тушковым ходам эволюции, ее неиспользованным возможностям, т. е. тем аспектам биологических систем, которые не попали в основное русло реального эволюционного процесса, но играют важную роль в построении структурной картины органического мира. Таким образом, здесь эволюционные аспекты оказываются подчиненными структурным. Следовательно, теория биологических структур не зачеркивает эволюционную теорию, а представляет собой вполне самостоятельную область исследования, которая оперирует наряду с другим и эволюционным материалом, но подчиняет его своим особым задачам.

Исчерпывает ли теория структур в таком ее понимании теорию биологических систем? На этот вопрос следует, по-видимому, ответить отрицательно, исходя по меньшей мере из двух соображений. Во-первых, теория структур в известном смысле шире, чем теория систем: структурные закономерности, т. е. определенного рода связи, могут устанавливаться на произвольно широких классах объектов, в том числе таких, которые не образуют реальной системы, по крайней мере в рамках данного исследования (такова рассматриваемая Эшби система, состоящая из температуры воздуха в данной комнате, его влажности и курса доллара в Сингапуре ²). Во-вторых, отнесенная к собственно системному объекту теория структур описывает лишь один определенный аспект этого объекта: некоторые его инвариантные характеристики. За пределами теории структур остаются механизмы функционирования и развития объекта, механизмы его «жизни», в том числе и механизмы жизни самой структуры. Иными словами, предметом теории структур не являются динамические аспекты систем. Эти аспекты, составляющие предмет теории элементов системы, теории уровней, теории управления в системе и т. п., также входят органической частью в теорию систем в широком понимании этого термина. Очевиден, например, системный характер «физиологии активности» Н. А. Бернштейна, однако эта концепция едва ли может быть зачислена по ведомству теории структур — по своему характеру она является теорией динамики систем определенного рода.

² У. Росс Эшби. Общая теория систем как новая научная дисциплина. — «Исследования по общей теории систем». М., 1969, стр. 129.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОНЯТИЯ СИСТЕМЫ И СИСТЕМНОГО ПОДХОДА

В. И. Кремьянский. Доклад А. А. Малиновского был очень интересен, в частности, тем, что он выделяет крайние типы структур, не исключая в то же время возможности объединения обоих типов и, более того, прогрессивности такого объединения для процесса эволюции. Как мне кажется, это относится к самой сути общего понятия системы. Для живой природы оказалось не просто прогрессивным, а жизненно необходимым объединение сильно выраженной упорядоченности системы как целого, жесткой, или функциональной структуры со структурой не жесткой, характеризуемой относительной независимостью элементов и подсистем.

Но для общего хода прогрессивной эволюции в целом, вероятно, наибольшее значение имеет преобладание системной организованности. Сама дискретность элементов, облегчая изменчивость связей и отношений между ними (эти связи не сводятся только к рекомбинации), служит развитию именно системности живого целого. В этой связи я хотел бы сказать несколько слов о понятии системы.

Если определять систему как «совокупность» множества элементов, то понятие системы не отличается от понятия множества в теории множеств. В литературе уже высказывалась мысль о том, что понятию системы больше соответствует понятие группы, «частично упорядоченного» множества. Понятие упорядоченности, действительно, очень существенно для понятия системы. Обратим внимание на то обстоятельство, что именно частичная упорядоченность указывает на определенную структуру; она предполагает определенную выделенность элементов. Поэтому многие авторы и, на наш взгляд, вполне оправданно считают, что понятие системы органически связано с понятием структуры, что эти два понятия коррелятивны.

Не собираясь давать здесь определения понятия «система», я хотел бы подчеркнуть эту его обязательную связь с понятием структуры, отображающим во всех его определениях непременно присущую системам упорядоченность отношений и связей между

элементами. Имеет смысл обратить внимание на корреляцию двух этих понятий еще с одним понятием: говоря о системе, мы имеем в виду целое и элементы. А это два уровня системы со своими соответствующими структурами, поскольку элементы не могут быть совершенно бесструктурными. Но в силу этого элементы сами представляют собой системы, и тогда мы сталкиваемся с опасностью смешать понятия «элемент» и «система».

Эти два понятия, следовательно, должны определяться как нечто относительное, и эта относительность связана с существованием различных структурных уровней. В статье «Материя» в «Философской энциклопедии» (т. 3, М., 1964) Н. Ф. Овчинников вводит понятие «относительно неделимый элемент». Мне кажется, что оно может помочь в ликвидации существующей неясности. Неделимость элементов существенна, но относительна: то, что на данном структурном уровне выступает как нечто неделимое по отношению к данной системе, на другом более глубоком уровне может само раскрываться как целая система.

Несколько слов о необходимости и значении исторического подхода к понятию системы. Там, где образовалась система, возникает внутренняя для нее преемственность. Но формы преемственности весьма различны. В неживой природе преемственность развита очень мало. Как преемственность самовоспроизведения (ауторепродукции) она развивается в живой природе. Но и там как процессы ауторепродукции, так и процессы эволюции тоже имеют различные уровни организации. В частности, процессы эволюции начинаются как таковые с того уровня, который, во всяком случае, не ниже уровня популяций. И Дарвин, значение теории которого характеризовать здесь не нужно, имел в виду как раз различные структурных уровней индивидуальной изменчивости и процесса эволюции. Верно то, что изменения возникают в организме, и даже в его молекулярных структурах, но это еще не эволюция. Это различие у Дарвина ясно выражено, и оно очень важно для понимания роли структурных уровней в биологии.

Система может быть такой динамичной, что про нее нельзя сказать, что она остается одной и той же. Иначе говоря, системы весьма разнообразны, и для абстрактного подхода вполне допустимо и даже очень важно отвлечься от их особенностей, в том числе и от тех, которые характеризуют разные этапы развития одной системы. Как говорил Уэллс, если представить серию фотографий человека, снятых в разные периоды его жизни, то получится змееподобное существо.

Если сравнивать объекты различной сложности и различных степеней развития, то при сравнении для выделения сходного приходится отбрасывать все отличия. А между тем отличия от исходного и составляют содержание развития. Во «Введении» к «К критике политической экономии» Маркс отмечал, что если

мы сравниваем последовательные ступени развития, то самое общее оказывается самым низшим и самым простым. Иными словами, при выделении общего (в смысле сходного) неминуемо выделяется только первичное и наиболее простое. Я думаю, что такого рода ограниченность обязательна, но она не подрывает значения общего. В этом смысле теория систем, будучи основана на наиболее абстрактном подходе, очень плодотворна, и это не вызывает сомнений. Но мне кажется, что она должна быть дополнена и теорией структурных уровней, которая позволит понять взаимоотношения систем разных уровней.

Что же касается понятия структуры, то я хотел бы обратить внимание на ценное дополнение, сделанное к этому понятию И. В. Кузнецовым: он указал, что структура — это не только определенная упорядоченность взаимосвязей между элементами, но и выделенность элементов. Это отчасти соответствует понятию корпускулярной системы у А. А. Малиновского, который, правда, доводит эту корпускулярность до крайней степени. Но важно подчеркнуть, что элементы и блоки должны быть обязательно выделены, иначе получатся неопределенные образования с мало выраженной структурой. Эшби указывает на необходимость «разделения» частей «хорошо организованной» системы: в принципе это и есть понятие выделенности частей, блоков, элементов.

Если учесть все это, то можно сказать, что понятие системы относится к образованиям, материальным и идеальным, включающим некое множество элементов, которые существуют в определенной взаимосвязи и которые как-то выделены. А структура — это определенные свойства таких образований. Я бы хотел подчеркнуть, что это не вещь, а именно свойство, поскольку понятие структуры применяется иногда и в вещном смысле. Например, геологи часто говорят о структурах, имея в виду не свойства упорядоченности и т. п., а сами геологические образования — группы пластов. Именно поэтому надо дифференцировать употребление слова «структура».

Понятие организации, которым также часто пользуются при рассмотрении систем, несколько шире, чем понятие структуры. Его можно трактовать как мгновенный снимок связей между элементами. А для структуры характерна, повторяю, устойчивость. Может быть, надо четко определить, что структура — это установившееся, это то, что стало устойчивым; такое понимание подчеркивается в определениях структуры рядом авторов. А организация может быть чем-то еще неустойчивым: это то, что постепенно превращается в структуру. Но структура — это не только статическая, а и динамическая устойчивость.

Оба понятия — структура и организация — очень близки, но в понятии структуры больше отображены моменты устойчивости, инвариантности отношений, тогда как организация может быть

и неустойчивой. А отсюда следует, что организация может оказаться даже более динамичной, чем развернутая, как бы уже выкристаллизованная структура.

Я. И. Старобогатов. Прежде всего я хочу сказать несколько слов о критерии для выделения системы, который должен быть положен в основу определения этого понятия.

А. А. Малиновский был весьма последователен. Если система — это любой комплекс элементов, то определить принадлежность к одной системе двух одновременных объектов, двух одновременных снимков системы можно только благодаря преемственности, и ничего больше у нас не остается для решения такой задачи. Но представим себе такой парадокс. У нас биологические системы состоят в основном из самовоспроизводящихся элементов, благодаря чему в них происходит дивергенция: в течение определенного времени из одной системы мы в конце концов получаем две системы, каждая из которых, будучи связана преемственной связью с одной и той же исходной системой, оказывается тождественной самой себе. Таким образом, это и одна система, и две системы в одно и то же время. От этого парадокса не спасает, между прочим, и требование наличия определенной структурности в системе: легко видеть, что дивергенция все равно приводит к тому же результату.

• По-видимому, при определении системы надо сформулировать еще одно требование — требование упорядоченности во времени. Речь идет о наличии у системы следующего свойства: через некоторое время она повторяет себя по структуре и составу элементов. При наличии этого свойства мы в результате дивергенции строго получаем из одной системы две разных. А пока дивергенция не происходит, система остается сама собой, поскольку она через некоторые промежутки времени, может быть даже и не строго фиксированные, неопределимые, повторяет саму себя.

Это, по-видимому, важно при самых различных аспектах изучения биологических систем. Поясню это на примере одного довольно незатейливого вопроса. Представим себе, что гарь в лесу оказалась засеянной какими-то случайно попавшими туда семенами растений. Так вот, заросли на гари, это что — определенная система или, выражаясь экологически, экологическая система, или же это случайное собрание организмов, которое только со временем превратится в некую систему, после того как гарь превратится в такой же самый лес, который сторел? Если говорить, что это система, поскольку более или менее закономерен набор тех организмов, которые мы найдем в первое лето на этой гари, то возникает следующий вопрос: а если мы эту закономерность нарушим и не будем предоставлять гарь самой себе, засеяв ее набором семян из Ботанического сада? В этом случае на гари примутся растения из разных климатических зон, а затем все, что выросло, потихоньку будет отмирать в меру возможности или

невозможности существования в данном месте; в конце концов все придет опять-таки к тому же лесу, который сгорел.

Из этого примера видно, что требование устойчивости во времени создает ту определенность, без которой нельзя, по-видимому, определить понятие системы. Таким образом, получается, что в определение понятия системы должны включаться: во-первых, наличие элементов; во-вторых, наличие определенной структуры, т. е. взаимосвязи между элементами; в-третьих, наличие упорядоченности во времени, то есть повторяемость через какие-то интервалы времени.

Г. А. Викторов. Мне кажется, что под системой можно понимать какое-то множество предметов или явлений, определенным образом взаимосвязанных друг с другом. При таком определении характерной чертой системы будет именно организованность или, что то же, наличие структуры. Из предшествующих выступлений я не мог уяснить, в чем разница между понятиями структуры и организованности. По-моему, термин «организованность» лучше, чем термин «структура», и к тому же он более распространен применительно к биологическим системам.

Структура, насколько я понимаю, предполагает пространственное распределение различных элементов, а в определении системы, по-моему, важен функциональный подход, при котором взаимодействие элементов рассматривается вне зависимости от того, как они пространственно расположены.

Другим важным критерием системы должно быть наличие у нее единства, целостности. Систему, как специфическое явление, отличает способность выступать в качестве единого целого при взаимодействии с другими явлениями. Биоценоз будет определенным образом как целое реагировать с другими биоценозами или определенным образом меняться под влиянием тех или иных факторов среды.

Еще один критерий — устойчивость системы, определяющая приспособленность к каким-то регуляторным реакциям внутри системы, а также способность ее сохранять свою организацию при изменениях внешних параметров.

При таком понимании системы более ясной становится суть системного подхода, а вместе с тем и таящиеся в нем возможности, которые не всегда имеются при обычном описании изолированных единиц. Прежде всего системный подход позволяет определить иерархию уровней организации в природе как единой и целостной системе. С другой стороны, системный подход очень важен при анализе частных явлений, при рассмотрении того, как определенная система входит уже в качестве элемента в более широкую систему явлений.

Скажем, при изучении отбора важно учитывать не только уровень организма как системы, но и уровень популяции, так как отдельные особенности воздействия отбора на организмы как

элементы популяционной системы можно понять только с учетом их функциональной роли в этой системе. Яркий пример этого дает изученная Н. А. Северцовым конгруэнция взаимного приспособления особей. Анализируя турнирное оружие оленей, он показал, что особенности строения рогов оленей таковы, что противники не могут нанести друг другу смертельное увечье. Особенности эти могут быть поняты именно на основе рассмотрения не организма как такового, а популяции в целом. И таких примеров можно найти много. Однако часто ограниченность некоторых эволюционных представлений связана с тем, что рассматривается эволюция организма как такового в какой-то абстрактной среде без учета того, что он в свою очередь входит как элемент в систему более высокого уровня и подвержен отбору не только как самодовлеющая система, но и как функциональный элемент, входящий в системы более высокого порядка.

Л. А. Блюменфельд. Я хотел бы предложить определение системы, причем, поскольку я не философ, то не боюсь ошибиться.

Системой называется совокупность любым способом выделенных из остального мира реальных или воображаемых элементов. Эта совокупность является системой, если: 1) заданы связи, существующие между этими элементами; 2) каждый из элементов внутри системы считается неделимым; 3) с миром вне системы система взаимодействует как целое; 4) при эволюции во времени совокупность будет считаться одной системой, если между ее элементами в разные моменты времени можно провести однозначное соответствие. Соответствие должно быть именно однозначным, а не взаимнооднозначным. Я думаю, что упорядоченность во времени не является обязательным признаком: если есть дивергенция, можно считать все одной системой, а можно выделить в системе подсистемы.

А. С. Мамзин. Понятие системы имеет не только объективную, но и определенную гносеологическую сторону, а разобраться в ней помогает история науки. Было время, когда к объектам подходили как к чему-то точечному. Этот атомизм отразился и в эволюционной теории. Затем обнаружилось, что объект нельзя рассматривать только как совокупность элементов. Его нужно рассматривать как целое, а разные типы целостности определяют различные типы систем. Далее понятие целостности сближается с понятием организации, к анализу привлекаются структурные и функциональные связи и элементы.

На современном уровне, говоря о системе, нужно, кроме всего прочего, различать системы мысленные и системы, которые существуют как объективное образование, хотя резкую грань здесь не всегда можно провести.

В. Н. Садовский. Мне представляется, что важнейшим свойством любого определения понятия «система», имеющегося в литературе или предлагаемого здесь, должны быть его конструктив-

ность, оперативность, то есть, проще говоря, должны быть указаны операции, позволяющие работать с таким определением. В определении Л. А. Блюменфельда легко усматриваются четыре узловых пункта: выделенность множества элементов, взаимосвязь между элементами, целостность системы в ее взаимоотношениях со средой и, наконец, время как фактор существования системы. С точки зрения свойства оперативности кажется более или менее ясным, что выделение множества элементов, указание связей между ними и фактора времени могут быть представлены через соответствующие операции. Но возникает вопрос, какова должна быть система операций, позволяющая фиксировать целостный характер системы в ее взаимоотношениях с внешней средой?

Л. А. Блюменфельд. Изучая систему в ее взаимоотношениях с окружающим миром, мы будем рассматривать только такие реакции системы, в которых она реагирует со всем остальным миром как целое, а не как отдельный элемент. Конкретный выбор операции зависит от того, с какой системой мы имеем дело. Если с биологической, то у нас система будет эволюционировать благодаря взаимодействию с остальным миром, благодаря изменению окружающих условий и т. д. То, что мы можем считать ее одной системой, подчеркивается в четвертом пункте предложенного мною определения. Если система будет изменяться таким образом, что мы можем провести однозначное соответствие между элементами системы в данный момент времени и в любой другой момент времени безотносительно к тому, что из одного элемента может получиться два, три, четыре, то тогда эта система будет оставаться одной системой. А конкретный выбор операций, при помощи которых я могу определить целостность системы, зависит от конкретной системы.

В. Н. Садовский. Ваше определение является абстрактным. Поэтому логично предположить, что наряду с достаточно общими и в целом более или менее разработанными методами задания элементов и связей системы должны существовать абстрактные методы описания целостного поведения системы. Вопрос этот возникает еще и потому, что с аналогичной трудностью столкнулись практически все сформулированные в литературе определения понятия «система». Если первоначально Берталанди и другие подчеркивали важность целостности как условия для понимания системы, то позднее оказалось, что найти оперативные способы задания целостности системы (во всяком случае на уровне абстрактного анализа) не удалось. Поэтому в определениях системы, предлагаемых, например, О. Ланге, М. Месаровичем, И. Климом и др., момент целостности в явном виде отсутствует.

Л. А. Блюменфельд. Я думаю, что нельзя дать в одном определении способа, который был бы пригоден для описания всех систем.

В. Н. Садовский. Этого, по-видимому, и не требуется. Достаточно

но сформулировать условия, пригодные для определенных классов систем, причем делать это не в самом определении.

Я. И. Старобогатов. Как с точки зрения требования целостности системы можно оценить такие ситуации, когда один и тот же объект при одном и том же воздействии, строго в одних условиях, строго одновременно реагирует и как целое, и как совокупность не связанных между собой частей? Такие объекты составляют около половины всего органического мира, в том числе к ним относятся почти все высшие организмы.

Л. А. Блюменфельд. Если Вы рассматриваете этот биологический объект как часть системы, то Вам его поведение неважно. А когда он сам выступает как система, то к нему применимо все то, что я говорил: каждый объект может быть или частью системы, или всей системой.

Я. И. Старобогатов. Но я имею в виду тот случай, когда мы берем объект в отрыве от всего, и он при одних и тех же условиях проявляет свойства системы и не-системы. И нас в этом случае интересует вопрос, является ли этот объект системой или случайным набором элементов.

И. В. Блауберг. Это зависит от нашего подхода к данному объекту.

В. А. Геодакян. Я не понимаю, почему мы так много говорим об определении, хотим обязательно все уточнить. Неужели, товарищи, мы не знаем, что такое система? Все знаем (*смех*). В докладе А. А. Малиновского фактически есть определение системы, и я удивляюсь, почему он не захотел выразить его кратко, в одной формуле. Как определяет систему физика? Для нее система — это часть, выделенная из пространства. Как определяет систему Берталанфи? Для него система — это совокупность элементов, объединенных взаимодействием.

Но так как в принципе все элементы Вселенной взаимодействуют друг с другом, то с этой точки зрения только Вселенная в целом является системой. Это неудобно для исследования. Чтобы избавиться от возникающего в этой связи неудобства, нужно к определению Берталанфи добавить еще одно условие: система есть совокупность выделенных из среды элементов, объединенных взаимодействием.

Чем не устраивает такое определение? Возможно, что определение Л. А. Блюменфельда более уязвимо, а в таком кратком виде определение системы достаточно широко, и пока большего от него не требуется. Ведь мы же не составляем статью «система» для толкового словаря, а сами хотим что-то уяснить. И если при таком определении своей цели мы обнаружим, что система и структура одно и то же, то в этом не будет ничего страшного. Я предлагаю пока остановиться на таком достаточно широком определении и двигаться дальше.

Я считаю, что наша задача сейчас не детализировать, а, наоборот, по возможности сознательно не видеть деталей, абстраги-

роваться от них, чтобы видеть целое. В этом случае можно провести аналогию с картиной абстрактного художника: если присматриваться к такой картине и требовать деталей, вся картина исчезнет. Нам нужно исходить из четырех главных задач науки: описать, затем объяснить системы и их поведение, затем предсказать это поведение и, наконец, управлять системами.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Для этого и нужно прежде всего определить, что такое системный подход, иначе мы ничего не выделим и не опишем.

В. А. Геодакян. Если мы не можем однозначно определить системный подход, то это отчасти оттого что у нас не хватает на сегодня соответствующих обобщенных понятий. Мне кажется, что такими понятиями являются понятия упорядоченности и организации. А они в свою очередь требуют анализа понятия информации как меры организации и понятия цели организации. Тогда мы сумеем подойти к задаче выделения элементарных функций живого и на этой основе построить теорию.

А. М. Молчанов. У меня два замечания.

Обсуждение, которое сейчас происходит, производит на математика (а я математик) двойственное впечатление.

Казалось бы, нужно радоваться, что биологи идут навстречу математике, предлагая аксиоматизировать весьма существенную часть своей науки. Но эта радость омрачена сознанием, что даже внутри самой математики вера во всемогущество аксиоматического подхода сильно подорвана. Среди математиков идет довольно острый спор, притом не всегда явный. Я отношусь к числу людей, считающих, что математика больше нуждается в приливе свежей крови новых, естественнонаучных задач, нежели в продолжении расковыривания старых болячек полноты и непротиворечивости систем аксиом.

Здесь высказывалось предложение учитывать историю науки. Мне кажется, что история математики довольно определенно показывает невозможность давать определения основным понятиям. Нельзя давать определение точке, прямой, плоскости. Если мы их через что-то определим, то потом придется определять это что-то. Поскольку где-то остановиться придется, то лучше остановиться в самом начале.

Другое дело, что в приложениях (или, как говорят математики, в реализациях) нужно четко указывать, какие именно реальные объекты мы собираемся сопоставлять с идеальными, и подробно обсуждать меру точности такого соответствия. Если мы прямую отождествим с геодезической линией (кратчайшим путем), то возникает вопрос об искривлении луча света. Это уже вопрос физический, вопрос о правильности модели Эвклида, вернее, о ее применимости к реальному пространству.

Аксиоматизации же подлежат не объекты, а связи, отношения между ними. Аксиома эвклидовой геометрии — через каждые

две точки проходит только одна прямая — невыполнима, например, на сфере, где через полюсы проходят все меридианы.

Второе замечание ближе к существу дела. Мне очень понравились соображения Александра Александровича о жестких и дискретных системах. Это очень в духе математических подходов, выделяющих всегда крайние, идеализированные ситуации.

Нужно, однако, как мне кажется, уточнить, что речь идет не о предельных системах, а скорее о предельных, асимптотических свойствах систем.

Приведу простой пример. Металлическую цепочку растянуть вдоль нее самой невозможно, но очень легко поворачивать ее звенья поперек ее длины. Таким образом, цепочка оказывается одновременно кристаллом «вдоль себя» и газом «поперек себя». Следовательно, по одним свойствам эта протенная система является жесткой, а по другим — дискретной. Эта двойственность свойств является источником богатства поведения системы. Если такую длинную цепочку ударять в поперечном направлении множеством палочек, то в продольном направлении цепочка приобретает свойство упругости.

Почти несомненно, что резина устроена именно так, причем перпендикулярные удары обеспечиваются тепловым движением.

Можно также высказать догадку, что жидкость — это газ из микрокристаллов.

Еще раз подчеркиваю, что, на мой взгляд, правильнее говорить именно о выделении и классификации крайних предельных свойств или типов поведения, а не систем, хотя несомненно, что существуют системы, реализующие то или иное свойство в «чистом», так сказать, виде. Однако при этом мы рискуем проглядеть самое, на мой взгляд, интересное — взаимодействие этих крайних видов свойств.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Все-таки, несмотря на то что Вы, Альберт Макарьевич, рассказали нам об исторической судьбе математики, нам нужно как-то договориться об употребляемых нами словах-понятиях. Когда мы говорим о системе, мы должны хотя бы примерно знать, что под этим подразумевается. Понятно, речь не идет о строгом математическом определении, но какое-то рабочее определение необходимо, и мне кажется, что то определение, которое дано Львом Александровичем, является достаточно и вполне рабочим. Только таким путем можно построить некую иерархию слов-понятий. Скажем, договорившись об определении понятия «система», можно найти способ разумного и уместного употребления такого выражения, как структура; тогда структуру мы будем подчинять понятию системы и сможем даже говорить об организации, предварительно договорившись, что организация — это определенное свойство, присущее или, наоборот, не присущее системе. На такой основе можно договориться и о пока, по-видимому, довольно телеологическом понятии «цель», поскольку

из организации цель выбросить трудно (конечно, при этом телеология толкуется не в высоком философском смысле, а в смысле формулировки слов-понятий).

Когда я задавал вопрос о разнице между структурой и системой, мне хотелось услышать примерно то, что сформулировал Лев Александрович. Эта формулировка представляется мне очень важной для биологии, учитывая разнокачественность материала, с которым имеет дело эта наука. В подтверждение я позволю себе сослаться на самый общий пример.

Мы можем говорить о биосфере как о системе. Тогда целостное взаимоотношение этой системы с другими системами или с внешним миром будет голое понятие — *terminus nusus*, потому что другого биогеоценоза мы пока не знаем и можем говорить лишь в общем виде о взаимодействии биосферы с планетами и их энергетикой, с окружающим пространством и т. д. Руководствуясь определением Льва Александровича, в качестве неделимого элемента биосферы резонно выделить биогеоценозы, каждый из которых, в свою очередь, представляет собой систему, состоящую из совсем иных элементарных составляющих.

Можно говорить о популяциях, которые представляют собой системы, состоящие из своих особых элементарных единиц — индивидуумов одного и того же вида, занимающих территорию, которая примерно соответствует территории, занимаемой биоценозом, в который они входят. Но, конечно, популяции не будут состоять из элементарных единиц, подобных атомам, молекулам и т. д.

Мы можем говорить о генетической динамике популяций. В этом смысле в качестве элементарных единиц мы будем рассматривать генотипы, которые в известной мере и при известных формулировках будут соответствовать тем же индивидуумам того же вида, которые составляют популяцию. Двигаясь таким образом, мы можем при желании дойти до молекулярно-генетического уровня, на котором набор хромосом представляет собой определенную систему, состоящую из совсем особых элементарных единиц, разумно неделимых, поскольку они входят в данную систему.

Конечно, биогеоценозы состоят из бесчисленного количества генов, генотипов и т. д., но в пределах биогеоценоза все эти низшие единицы нельзя рассматривать как разумно выделенные, а разумно неделимыми являются здесь другие единицы, хотя они состоят из деревьев, насекомых, птиц и т. д.

Я согласен с теми, кто говорил, что в биологии пока еще не наработан достаточный материал для того, чтобы можно было заниматься построением строгих определений. Но вместе с тем, если не ограничить каким-то образом с самого начала словоупотреблений, то пройдет слишком много времени, пока из хаоса накопленного материала мы сможем создать известный порядок, эмпирически построить более строгие понятия. Многим биологам это хорошо понятно.

Сошлюсь на такой пример. Я не фитоценолог, но мне много приходится иметь дело с фитоценологическим материалом. Это каторжная работа. Чтобы понять короткую статью, нужно сначала разобраться в словоупотреблениях. Представитель одной школы употребляет слово в одном значении, другой ученый, употребляя это же слово, описывает, оказывается, совершенно другие процессы. Практически почти во всех биохорологических дисциплинах терминология совершенно произвольна, и это делает огромный накопленный материал почти несравнимым. Количество, так сказать, не переходит в качество. Материала много, а с ним ничего не сделаешь, невозможно даже перевести все это на какой-то один язык.

Именно поэтому в своих вопросах я позволил себе немного придрататься к словоупотреблениям. Мне кажется, в этом смысле Л. А. Блюменфельд говорил очень интересные вещи. Из данного им определения я хотел бы особенно подчеркнуть значение элементарных составляющих, неделимых в данной системе. Только таким путем можно, по-моему, подойти к проблеме различных уровней структуры и уровней организации жизни на Земле. А определение А. А. Малиновского, как мне кажется, отличается от определения Л. А. Блюменфельда в отрицательную сторону своей чрезмерной краткостью. Л. А. Блюменфельд дал достаточно краткое определение.

А. А. Малиновский. Все, очевидно, согласны, что жесткое определение невыгодно. Я согласен с Л. А. Блюменфельдом относительно неделимости элементов с точки зрения системы. Меня немного смущает в его определении пункт о реакции системы как целого. Мне кажется, можно говорить о системах очень целостных и менее целостных. Кроме того, в совокупной реакции системы едва ли можно отделить реакцию ее как целого и реакцию отдельных элементов. Эта последняя существует, хотя и входит в целое. Поэтому мне кажется, что это не особенно желательное дополнение. Сама целостность возникает тогда, когда возникает более высокая организация, и является одним из признаков организации.

Разделяя понятия системы и структуры, я исхожу из того, что система — это нечто реальное, а структура — это тот разрез, в котором мы ее рассматриваем. Когда мы определяем понятие системы, нужно учитывать, что изучение объекта с точки зрения системности и структурности — это метод, и именно таким образом мы должны подходить к этому понятию. В частности, отсюда следует, что когда мы рассматриваем какое-то явление, то нужно учитывать возможность рассмотрения его с разных точек зрения. Поэтому, говоря, что система — это любая группа элементов, выделенных нами, надо иметь в виду, что мы не можем выделить их произвольно: должен существовать какой-то принцип, объединяющий элементы в систему.

И. В. Блауберг. Мы были свидетелями очень полезного обсуждения понятия «система». Поскольку эта проблема более или менее прояснилась, мне кажется, имело бы смысл перейти к обсуждению более широкой проблемы — какова суть системного подхода в биологии. В этой связи возникают такие вопросы: можно ли считать, что изучение биологической системы — это и есть уже системный подход, или системный подход предполагает нечто существенно новое, отличное от того, что было до сих пор? Если это новый подход, то в чем его характерные черты? Есть ли различие между системным и структурным подходом? Если есть такое различие, то в чем оно состоит?

Г. Н. Громов. Здесь выступали математики, биологи, философы. Мне бы хотелось выразить точку зрения техники на системный подход в биологии. Прежде всего мне кажется важным, что в биологии сегодня каким-то образом различают несколько уровней, о которых, в частности, говорил Н. В. Тимофеев-Ресовский. Каждый из уровней представляет собой соответствующую систему.

По-видимому, опираясь на аксиоматику, можно было бы выделить некоторые принципы, и затем на их основе определить на каждом из уровней те элементы, из которых составляются системы. Тогда для каждого уровня мы имели бы соответствующую совокупность аксиом; с помощью аксиом мы получаем элементы системы. Кроме того, у нас есть связи, которые можно истолковать как операторы, применяемые к этим аксиомам. В таком случае можно было бы двигаться более или менее строго: есть аксиомы, есть связи — значит должны быть системы. При этом аксиомы одного уровня организации для следующего уровня теряют силу, хотя некоторые из них могут действовать на всех уровнях.

Именно таким образом мы рассуждаем с инженерной точки зрения, опираясь на математику и создавая неживые системы. Если бы аналогичный подход был в биологии, мы могли бы брать используемые там принципы и переносить их в технику.

В. Н. Садовский. Вы считаете, что тот идеальный план, который Вы сейчас нарисовали, действительно используется в математике? Иначе говоря, считаете ли Вы, что существует одна аксиоматика для одного уровня, другая — для другого?

Г. Н. Громов. Мы уже некоторое время работаем с биологами и пытаемся сформулировать принципы, которым подчиняются процессы функционирования в живой природе в разной среде. При проектировании технических систем мы каждый раз выдвигаем аксиоматику, удобную нам. Например, разрабатывая усилитель, мы сразу в самом начале разработки задаем центр усиления, диапазон входных и диапазон выходных сигналов и т. д. А дальше, чтобы получить эффект, т. е. нужный коэффициент усиления, мы применяем существующие законы, скажем закон Ома и т. д., и начинаем строить свою систему. Переходя на следующую

щий уровень — систему автоматик, мы знаем, что есть законы, выработанные в автоматике, и используем соответствующую часть этих законов. Иначе говоря, для каждого уровня систем у нас есть соответствующие единицы и свои особые закономерности.

В. Н. Садовский. Ваши исследования по созданию технических систем носят эмпирический характер или являются дедуктивными?

Г. Н. Громов. Если Вы говорите о разработке системы, то она носит совершенно конкретный дедуктивный характер. Если же Вы имеете в виду принципы, о которых я говорил, то они носят чисто эмпирический характер.

В. Н. Садовский. Мне кажется, что нам следует договориться о значении некоторых терминов, которые здесь употреблялись. Вы описали хорошо известный способ создания технических систем, которые выполняют те или иные биологические функции. Этот процесс является чисто эмпирическим. И в нем никакой аксиоматикой в том смысле, как этот термин употребляется в математике, мы не пользуемся. Мы просто-напросто используем в этом эмпирическом исследовании те или иные закономерности, сформулированные на физическом, математическом и других языках.

Ваше требование к биологии, чтобы она использовала более строгий язык, чем это делается сегодня, совершенно справедливо, но оно не имеет никакого отношения к построению аксиоматических теорий тех или иных областей действительности. Процесс создания аксиоматик требует метаматематического аппарата, а это совершенно иной уровень исследования.

Я полностью согласен с другими основными мыслями Вашего выступления. Действительно, было бы чрезвычайно важно сопоставить закономерности, которые реализуются на этих разных технических уровнях, с закономерностями, которые биология выявила для соответствующих уровней своих систем. В такой постановке вопроса эта задача вполне разумна и реальна.

А. С. Мамзин. Говоря о системах, мы не имеем какой-то строго сформулированной системы понятий, хотя определенная совокупность категорий, главным образом полярных, при этом употребляется. Мне представляется, что было бы важно выявить эти категории, прежде всего системы и элемента. Где-то близко от них стоят категории целого и части, а также структуры и функции. Видимо, к ним примыкают единое и множественное. Противоположностью организации является дезорганизация.

Важным аспектом теории систем является изучение развития. Это правильно подчеркивал, в частности, Бергаланфи, который говорил, что теория систем должна исследовать не только строение и функционирование систем, но и проблему их генезиса, которая не рассматривается кибернетикой, теорией информации или теорией игр.

А. А. Малиновский. Для различных уровней биологических систем можно выделить разные закономерности. Скажем, с точки зрения внутренней связанности наиболее высокие формы организации мы видим на уровне индивидуума, которого можно считать наиболее сложной и наиболее организованной системой.

Но в то же время с точки зрения положения организма в системе видов у него имеется определенный дополнительный момент — ограниченность срока жизни, которая является необходимым условием развития видов. Иначе говоря, связь между разными уровнями определяет не только положение элемента в системе более высокого уровня. Чтобы элементы могли совершенствоваться под влиянием системы, они обязательно должны обладать запрограммированной ограниченностью срока жизни.

Другая важная задача теории систем состоит в том, чтобы по возможности найти некоторые общие закономерности, пригодные для всего живого в целом. Мне лично представляется, что основным для живого является способность ауторепродукции. Эта же способность переходит потом на социальный уровень, но она наиболее типична для всего живого. Это та основа, которая лежит и в основе наследственности, изменчивости, прогрессии размножения. Опираясь на такого рода основания, мы можем найти и вывести общие положения, которые пригодны на разных уровнях.

Конечно, формулируя такие положения, надо опираться на известные эмпирические факторы. Но главная задача теории систем состоит в том, чтобы свести к минимуму предпосылки, выделив из них наиболее существенные. Пользуясь такими предпосылками, мы сможем решать те вопросы, для изучения которых мы часто привлекаем огромное количество факторов, часто вовсе не необходимых, или необходимых только при условии, что у нас нет общих закономерностей.

В. Н. Садовский. Вы считаете, что теория, которая должна быть построена, это теория биологических систем или Вы имеете в виду концепцию типа общей теории систем?

А. А. Малиновский. Я считаю, что ее нужно строить как часть общей теории систем, но в биологии есть своя специфика. Ауторепродукция может быть использована в сфере автоматике, которая, вероятно, скоро научится этому; она может использоваться во многих социальных системах. Но все-таки прежде всего она представляет собой необходимое условие, без которого невозможна биологическая система. Не принимая в расчет этого условия, мы не сможем построить теории биологических систем, поскольку тем самым исключается сама возможность жизни.

И. В. Блауберг. Значит, теория систем в Вашем понимании будет распадаться на теории, специфические для биологии и для любой другой науки, а единого варианта теории систем не будет?

А. А. Малиновский. Нет, почему же. Такая теория обязательно будет.

А. М. Молчанов. Видно, что-то нужно добавить, потому что одной ауторепродукции недостаточно. Может быть, цепной характер реакций?

А. А. Малиновский. Цепные реакции играют определенную роль в жизненных процессах, но их роль — ускорительная, так сказать. Для жизни характерна ауторепродукция, чрезвычайно варьирующаяся. Кристаллы тоже могут репродуцироваться, но для этого нужна очень строго соблюденная концентрация раствора. Для процессов горения это выглядит менее строго, но все же и здесь нужны жесткие условия среды. В то же время для жизни условия среды становятся все менее жесткими, т. е. жизнь научается ауторепродуцироваться во все более разнообразной среде. Различие, может быть, только количественное, но мне оно кажется существенным.

А. М. Молчанов. Конкретно каждый раз понятно, что цепная реакция — это не жизнь. Но я не совсем понимаю, как это можно сформулировать в общих терминах, чтобы мы четко могли отличать воспроизведение вида от воспроизведения свободных радикалов.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. В свое время мы с группой физиков-теоретиков ввели понятие «конвариантная редупликация». Это то, что действительно типично и характерно для жизни, если отвлечься от очень распространенных в биологии различных исключений, связанных с вегетативной ауторепродукцией и другими эволюционно объяснимыми, но нетипичными формами размножения. А коинвариантная редупликация — это понятие, включающее конвариантность, то есть возникшую вариативность. Для жизни характерно не просто идентичное самовоспроизведение, а редупликация, восходящая к самым низам. Конвариантная она в том смысле, что включает в себя ранее возникшие изменения структур, причем это, по-видимому, происходит на основе матричного принципа: имеется некая матрица, она способна строить рядом с собой себе подобную; если эта матрица изменилась (например, мутационно), то она и редуплицируется в измененном виде.

Я сейчас не берусь говорить, существуют ли какие-нибудь случаи вне живой природы, которые могли бы запутать это определение. Но во всяком случае мне такое определение основного свойства жизни представляется вполне аккуратным, потому что оно исключает конфликты с кристаллами, всякими цепными реакциями и прочими биологически неинтересными вещами.

А. М. Молчанов. С кристаллами мне не все ясно. Разве рост кристаллов — это не редупликация?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Рост кристаллов — это не редупликация. А насколько он конвариантен, не знаю, я не кристаллограф.

С места. Эта аналогия приводится иногда в литературе.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. В учебниках общей биологии бывает иногда всякая ерунда, но обычно определение жизни, свя-

занное с конвариантной редупликацией, не приводится. В свое время мы пытались с довольно умными людьми обдумать этот вопрос насчет определения жизни и умнее ничего не придумали.

А. М. Молчанов. Значит, по-вашему, самое главное — это сохранение предшествующих модификаций? Существенно ли здесь, что это может иметь место в скрытом, т. е. не обнаруживаемом явно, виде?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Если имеется некая структура, которая с помощью матричного принципа редуплицируется, строит рядом с собой себе подобную, то это рядом строимое себе подобное включает в себя те мутации, т. е. структурные изменения, которые претерпела до редупликации данная матрица. А скрытый вид — это понятие антропоморфическое. От кого скрытый? От нас, что ли?

А. М. Молчанов. Мы как будто бы договорились, что точка может быть элементом системы и в то же время иметь определенное строение. Тогда эта скрытая конвариантность «сидит» в элементе, который мы полагаем точкой, или в наше определение системы эти варианты войдут в чистом виде?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Если представить себе эту матрицу в качестве некоего нуклеопротеида, то в отдельных частях этого нуклеопротеида могут произойти изменения самого различного рода: он может разорваться пополам или в нем может замениться какое-то основание и т. д. При работе этой матричной системы далее, при редупликации эти изменения передаются строимой рядом с матрицей новой структуре.

Э. Г. Юдин. Насколько я понимаю, вопрос был несколько иной. Если говорить о редупликации с точки зрения определения системы, данного Л. А. Блюменфельдом и принятого Вами, то относится ли эта редупликация к системе или к элементам системы, далее неразложимым?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. По Льву Александровичу, система избирается в зависимости от надобности. Скажем, нуклеопротеидная матрица может быть выбрана нами для чего-то в качестве системы. Тогда элементами в ней будут нуклеотиды или что-то в этом роде. А что может быть здесь скрытым? Я не понимаю: скрытое может быть от кого-нибудь или чего-нибудь, изменение же либо произошло, либо не произошло.

А. Я. Яблоков. Николай Владимирович говорит о редупликации на всех уровнях.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. С точки зрения системы, в системном рассуждении эта нуклеопротеидная матрица и будет рассматриваемой нами системой.

А. М. Молчанов. Тогда вопрос снят. Но мыслима другая система, в которую эта матрица войдет как единый неразложимый элемент. В таком случае может оказаться, что, хотя мы будем считать этот элемент неизменным, на самом деле он изменился.

Организация систем — живых и неживых

В. А. Геодакян

Окружающий нас мир состоит из разных систем: наша галактика — система, отдельный атом — система, организм — система, автомобиль — система. Каждый класс систем изучается определенной наукой, но все науки при исследовании систем решают в принципе один и тот же последовательный ряд задач возрастающей трудности, связанных с поведением систем. Первая задача — *описание* поведения систем. Вторая — *объяснение* поведения. Третья — *предсказание* поведения. Четвертая — *управление* поведением. Наконец, последняя — *создание* систем с определенным поведением.

Прежде всего возникают вопросы определения и рациональной классификации систем.

В физике обычно систему определяют как совокупность тел, выделенных из окружающего пространства. В общей теории систем под системой имеется в виду совокупность взаимодействующих элементов. Поскольку взаимодействующие элементы не обязательно должны быть материальными телами, последнее определение включает более обширный круг систем, чем первое: система идей, понятий, символов и пр.

Если говорить о классе материальных систем, то в принципе взаимодействие существует между любыми элементами Вселенной. Следовательно, согласно второму определению, строго говоря, системой является вся Вселенная в целом. Поэтому удобнее определить систему как совокупность *взаимодействующих* элементов, выделенных из среды.

Тем самым рассматриваемые взаимодействия делятся на две категории: *внутренние* (взаимодействия между выделенными из среды элементами системы) и *внешние* (взаимодействия между системой или ее элементами и средой). В зависимости от того, какие взаимодействия мы кладем в основу выделения системы, внутренние или внешние, получится тот или иной тип системы.

Если во взаимодействиях, которые мы кладем в основу выделения системы, доминирующую роль играют внешние взаимодействия, то мы имеем дело с системами *популяционного* типа — *эктосистемами*. Такие системы детерминированы статистически. Они существуют в основном благодаря одинаковому взаимодействию элементов со средой: именно оно и объединяет элементы в систему.

Следовательно, система популяционного типа должна состоять, как правило, из однотипных элементов. Для однотипных же элементов характерны их взаимозаменяемость, конкурентные взаимоотношения между ними и, как следствие этого, *отбор*.

Примерами эктосистем могут служить: макроколичества газа, песчаные дюны, популяции клеток, организмов или звезд, серийная продукция завода или фабрики и т. д.

Наоборот, если мы выделили систему таким образом, что в ее организации доминирующую роль играют внутренние взаимодействия (между элементами), то мы имеем дело с системами *организменного* типа — *эндосистемами*, с сильными связями между элементами и со слабыми — между элементами и средой. Системы организменного типа, как правило, состоят из определенного числа разнотипных элементов, объединенных сильными взаимодействиями. Такие системы жестко детерминированы. Они характеризуются прежде всего не взаимозаменяемостью элементов, а их дополнителестью, поэтому вместо конкурентных взаимоотношений, господствующих между однотипными элементами популяционных систем, здесь доминируют коалиционные взаимоотношения между разнотипными элементами и, как следствие этого, в системах организменного типа действует правило *слабого звена*, а не отбора. Примерами эндосистем могут служить: отдельный атом, молекула, организм, солнечная система, машина и т. д.

Эти два крайних типа систем в основном совпадают с типами, выделенными А. А. Малиновским. По терминологии А. А. Малиновского, первый тип называется дискретным, или корпускулярным, а второй — жестким. Мне представляется, что главной отличительной чертой выделенных типов являются внешние или внутренние взаимодействия, создающие систему, а не сила или жесткость связей. Кроме того, эти названия неточно передают основную суть выделенных систем: множественность связанных внешними взаимодействиями однотипных элементов (эктосистема) и определенное число разнотипных элементов, объединенных внутренними взаимодействиями (эндосистема).

Выделение крайних типов имеет большое методологическое значение, так как крайние типы более просты и легче поддаются описанию и объяснению. И в более сложных промежуточных типах можно выделить простые элементарные структуры крайних типов. Здесь можно провести аналогию с агрегатными состояниями вещества. Твердый кристалл и газ являются простыми и легче поддающимися теоретическому описанию крайними типами по сравнению с жидкостью. В этом случае кристалл соответствует организменной системе (сильные внутренние связи), а газ — популяционной системе (слабые внутренние взаимодействия).

Одна и та же система в зависимости от того, какие взаимоотношения, внутренние или внешние, мы кладем в основу, может выступать как организменная или как популяционная система. Например, если мы рассматриваем вид животных как совокупность отдельных особей, то имеем дело с системой популяционного типа, образуемой внешними взаимоотношениями однотипных элементов со средой (одна и та же пища, одни и те же опасности

и т. д.). Если же рассматривать вид как совокупность двух полов, то это уже организменная система, построенная на внутренних коалиционных взаимоотношениях двух разнотипных элементов.

Помимо классификации систем по эндо- или экто- взаимодействиям, их удобно классифицировать также по характеру, физической природе взаимодействий (сил), образующих систему. Если в основу такой классификации положить формы движения материи, то можно говорить о механических, тепловых, электрических, химических, биологических, социальных, технических или экономических системах. Например, если какой-то шарик интересует нас с точки зрения того, что мы его бросаем, катаем и т. п., то мы имеем дело с механической системой; если мы интересуемся его теплоемкостью или электропроводностью, то он выступает как физическая система; если мы исследуем его химический состав, то это — химическая система; наконец, если из этого шарика вылупляется птенец, то это уже биологическая система. Следовательно, здесь можно говорить о разных уровнях систем, и уровень системы определяется характером взаимодействия между ее элементами. При этом системы высших уровней состоят из систем более низких уровней. Так, любая социальная система в конечном счете тем или иным образом опирается на биологическую систему, любая биологическая система включает химические системы и т. д. Классификация систем по уровням в основном совпадает с распределением их по изучающим их наукам.

Системы можно классифицировать и по другим принципам: по числу элементов — на простые и сложные, по степени или характеру связи со средой — на изолированные, закрытые или открытые системы, по типу процессов, проходящих в системе, — на равновесные, стационарные, нестационарные, по типу организации — на упорядоченные, регулируемые, управляемые, адаптирующиеся, самоорганизующиеся, самовоспроизводящиеся и т. д.

Оставив эти задачи другим исследователям, обсудим теперь *понятия*, характеризующие системы, но исторически возникшие в разных науках и потому требующие специального рассмотрения. К числу таких понятий относятся *внешние и внутренние степени свободы*.

В физике числом степеней свободы называется количество независимых переменных, которое должно быть задано для определения положения тела (системы). У одного атома (рассматриваемого как точка) три степени свободы, поскольку любое движение точки в трехмерном пространстве можно описать как изменение трех ее координат. Если точку заставить двигаться только по фиксированной поверхности (наложить один внешний запрет), то у нее останутся две степени свободы; а если ее заставить двигаться только по какой-то фиксированной линии (два внешних

запрета), то у нее останется одна степень свободы. Добавив еще один запрет, мы лишим систему последней степени свободы.

Если два атома соединяются в молекулу (налагается один внутренний запрет), то для описания такой системы (жесткая гантелька) необходимо уже пять независимых параметров: три — для описания движения центра тяжести и два — для описания вращения вокруг этого центра (вращение вокруг оси молекулы из-за ничтожности момента количества движения выроджено).

О внутренних и внешних степенях свободы системы или о соответствующих запретах можно говорить и на уровне макроколичеств газа, жидкости или твердого тела. Например, то, что жидкость или твердое тело не может расширяться и занять весь объем сосуда, как это делает газ, или то, что твердое тело не может принимать форму сосуда, как это делает жидкость, целиком определяется внутренними степенями свободы, т. е. отсутствием у них соответствующих внутренних степеней свободы. А то, что одно и то же количество газа в разных сосудах имеет разные объемы и форму, определяется уже внешними степенями свободы (в данном примере сосудом), или внешними запретами, обуславливающими объем и форму.

Следовательно, можно сказать, что система реализует *все* с учетом внутренних и внешних степеней свободы, т. е. из того, что она в состоянии делать как таковая, делает только то, что позволяют ей условия среды. Иными словами, для реализации того или иного взаимодействия со средой необходимо наличие соответствующей *пары* степеней свободы.

Рассматривая системы более высоких уровней (тепловые, электрические и т. д.), мы должны ввести соответствующие этим формам движения степени свободы и запреты. Так, газ в цилиндре под поршнем не только расширяется или сжимается (если поршень не закреплен), но и охлаждается или нагревается, если нет тепловой изоляции, принимает или отдает электричество, если нет электроизоляции, и т. д. Картина, таким образом, слишком усложняется. Чтобы несколько облегчить ее понимание, введем три новых понятия — пространство способностей, пространство возможностей и пространство реализаций.

Под *пространством способностей* будем понимать совокупность внутренних степеней свободы системы, образующих некое многомерное пространство. Это — перечень того, что система в состоянии делать, перечень внутренних потенциальных программ системы.

Под *пространством возможностей* будем понимать совокупность внешних степеней свободы, также образующих некое многомерное пространство. Это перечень того, что системе позволяют реализовать условия среды.

Точки, принадлежащие одновременно пространству возмож-

ностей (1) и пространству способностей (2), образуют третье многомерное пространство — пространство реализаций (3), которое характеризует поведение системы (рис. 1).

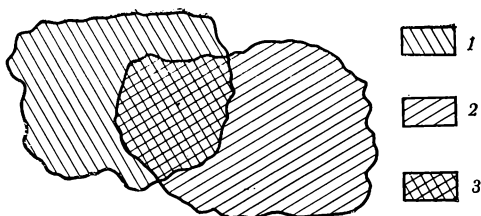


Рис. 1

Пространство способностей (внутренняя программа) системы образует некоторую матрицу, которая

будет заполнена, если позволят условия среды. Например, пустая таблица Менделеева (без вписанных атомов) представляет изображение пространства способностей (матрицы) системы атомов. В зависимости от конкретных условий среды — пространства возможностей — эта матрица будет в той или иной степени заполнена. Для нашей планеты матрица заполнена на 92 клетки, а скажем, на Сириусе — всего на 30 клеток. Вместе с тем не исключена возможность, что во Вселенной существуют места с такими условиями, где матрица заполнена еще больше, чем у нас, и устойчивы трансурановые элементы.

Понятия пространства способностей, возможностей и реализаций можно применять как к системе в целом, так и к ее подсистемам и элементам. Можно говорить о *программе элементов* и *программе системы в целом*.

При объединении элементов в систему претерпевает изменения и их программа: на какие-то ее пункты налагаются запреты, и одновременно появляется новая программа системы в целом, отсутствовавшая у элементов. Например, при объединении двух атомов в молекулу из шести степеней свободы (по три у каждого атома) остается только пять. Но при этом появляется новая программа — вращательное движение. Здесь исчезнувшую степень свободы можно рассматривать как плату за новую программу. Аналогичную картину можно проследить при образовании из элементов более сложных систем.

При слабых взаимодействиях между элементами (популяционный тип систем) программы элементов складываются аддитивно, и система в целом представляет простую сумму свободных элементов. Эффект организации при этом минимален. По мере перехода к организменному типу систем число и ассортимент программ элементов уменьшается из-за потери элементами своих степеней свободы. Усиление взаимодействия между элементами сопровождается появлением новых программ — программ системы в целом, число и ассортимент которых растет с усилением взаимодействия (эффект организации). И в этом случае исчезнувшие программы элементов можно рассматривать как плату за новую организацию, за новые программы системы.

Вероятно, для каждой системы должна существовать некая оптимальная сила взаимодействия между элементами, при которой *интегральный эффект организации*, учитывающий программы как элементов, так и системы, будет *максимален*. Если взаимодействие слабее оптимального, то интегральный эффект организации не достигает максимума из-за чрезмерной свободы элементов.

Если же взаимодействие сильнее оптимального, то интегральный эффект организации опять меньше максимума, но уже из-за чрезмерной утраты свободы элементов.

Понятия пространства способностей, возможностей и реализаций можно связать с широко применяемыми в кибернетике понятиями черного ящика (система), входа (пространство возможностей), внутреннего механизма ящика (пространство способностей), выхода (пространство реализаций, поведение системы).

Вместе с тем понятие пространства реализаций близко биологическому понятию *экологической ниши*. Экологическую нишу, понимая под ней совокупность диапазонов условий существования системы, можно характеризовать, во-первых, по числу факторов среды, к которым система чувствительна (мерность ниши); во-вторых, по протяженности диапазона существования системы по данному фактору (ширина ниши). Для физико-химических систем факторами среды являются температура, давление и набор концентраций химических веществ. Для живых систем к этому надо добавить концентрации паразитов, хищников, жертв, особей своего и всех других видов и т. д.

В таком понимании физико-химические фазовые диаграммы — не что иное, как форма описания экологических ниш различных фаз. Например, экологическая ниша жидкой воды по температуре (при давлении в 1 атм) имеет ширину от 0 до 100°.

Чем выше уровень системы, тем многомернее, как правило, ее экологическая ниша, тем меньше ширина экологической ниши по различным факторам среды, тем чувствительнее и требовательнее система к условиям среды. Например, если взять человека как социальную систему, то экологическая ниша такой системы очень многомерна: помимо узких диапазонов температуры, давления, помимо пищи, воды, кислорода и пр., ему необходима масса других условий — то, что называется духовной пищей. При рассмотрении человека как биологической системы (уровнем ниже) мерность ниши уменьшается, ряд требований отпадает. Еще более упрощается экологическая ниша для человека, когда мы рассматриваем его как безжизненную химическую систему. Наконец, если рассматривать того же человека как физическую систему, то для нее экологическая ниша, наверное, только двухмерна — температура и давление в очень широких пределах. Следовательно, чем ниже уровень экологической ниши, тем фундаментальнее требования. Системы высших уровней не могут выйти за пределы экологических ниш всех нижележащих уровней.

Поведение системы определяется прежде всего ее программой, но из множества потенциально возможных программ реализуются только те, которые соответствуют данным конкретным условиям среды. В биологии часто спорят, что важнее — наследственность или среда. Развитые соображения позволяют уточнить представления о соотношении этих факторов.

Очевидно, поведение системы определяется или программой, или средой в зависимости от того, внутренние или внешние запреты действуют в данном случае. Если рассматривается граница пространства реализаций и пространства возможностей, то определяющую роль играет среда, а на границе пространства реализаций и пространства способностей эта роль переходит к наследственности. Сходные внутренние программы в разных пространствах возможностей приводят к сходным проявлениям, относимым в биологии к гомологиям. Таковы, например, руки человека, крылья птиц и ласты тюленя. Наоборот, разные программы в сходных пространствах возможностей имеют сходные проявления, называемые биологами аналогиями: аналогичное строение глаза у таких разных классов, как млекопитающие и головоногие моллюски, или плавники у кита и рыб и т. д.

Следующее важное понятие, которое следует обобщить и применять ко всем системам, — это *условное* понятие *цели*. Знание «цели» системы сильно облегчает объяснение и предсказание поведения системы. «Цель» четко выступает в поведении управляемых или регулируемых систем, но она может быть определена и для других систем. Разница в поведении систем, имеющих одинаковую «цель», сводится к разным способам достижения этой цели.

Это имеет важное значение при выявлении общих закономерностей. Пока мы ничего не знали о гравитации, трудно было видеть общее в поведении таких различных систем, как качающийся маятник, текущая река, вращающиеся вокруг Солнца планеты. Но как только удалось понять, что в основе их программ лежит одно и то же взаимодействие, найти для них общую «цель» — стремление к минимуму потенциала в гравитационном поле, поведение этих систем стало легко объяснимо как реализация одной программы разными путями.

Таким образом, если мы ищем черты сходства между непохожими системами, то необходимо искать и формулировать «общие цели» для возможно более широкого круга систем. В качестве такой обобщенной, единой «цели» для всех систем может, например, выступать сохранение системой своего существования во времени. Действительно, такую «цель» можно признать и за кристаллом алмаза, который «стремится» сохранить свое существование, противопоставляя разрушающим факторам среды свою твердость (кристаллическую структуру), и за живым организмом, который той же цели достигает размножением.

Факт исторического происхождения живых систем из неживых породил и порождает множество попыток найти общие принципы, лежащие в основе этих двух типов систем. Особенно широкую дискуссию вызвало отношение живых систем ко второму началу термодинамики. Начиная с А. Бергсона, говорившего об усилении жизни подняться по склону, по которому спускается вещество, наметилась тенденция рассматривать энтропию и жизнь как взаимно противоположные понятия.

Между тем можно показать, что по отношению к энтропии живые системы делают то же, что и некоторые машины, скажем холодильник: и животное и холодильник за счет поглощаемой энергии производят энтропию и неэнтропию одновременно, т. е. расщепляют некоторый средний уровень энтропии на более высокий и более низкий. Живые системы, потребляя энергию Солнца, производят потомство (более низкоэнтропийное состояние вещества) и выделения (богатые энтропией вещества). Аналогично и холодильник на основе потребления электрической энергии может производить, с одной стороны, лед (низкоэнтропийное состояние), а с другой — пар (высокоэнтропийное).

Поэтому отношение к энтропии вряд ли может служить критерием отнесения системы к живым или неживым. Негэнтропия действительно является мерой упорядоченности, но тогда максимумом упорядоченности (минимумом энтропии) обладает правильный кристалл простого вещества при абсолютном нуле, а минимумом упорядоченности — газ при высокой температуре. Значит, в энтропийной шкале живые системы не занимают исключительного положения, не являются «чемпионами», чего можно было бы ожидать, если бы энтропия действительно являлась определяющим фактором жизни. Негэнтропия — лишь мера упорядоченности, т. е. удаления от беспорядка, хаоса, а от хаоса можно удаляться в разных направлениях, причем не все они приводят к жизни. Упорядоченность, измеряемая негэнтропией, не учитывает направления, т. е. «цели» системы. Только с учетом такой цели можно определить отношение различных систем к понятиям энтропии, упорядоченности, информации и организации.

С точки зрения термодинамики живые системы являются *открытыми рабочими системами*: они обмениваются со средой веществом, энергией, информацией. Сопоставим различные формы контакта со средой известных рабочих систем.

Для количественного описания состояния системы и происходящих в ней процессов в термодинамике применяются специальные физические параметры, называемые *обобщенными зарядами*, или *факторами экстенсивности* (E): масса, объем, энтропия, электрический заряд и др. Внутренняя энергия системы, как известно, определяется совокупностью этих обобщенных зарядов. Перенос соответствующих зарядов, т. е. реализация того или иного процесса, обеспечивается *обобщенными потенциалами*, или *факторами*

интенсивности (P). Каждому виду заряда соответствует свой сопряженный с ним потенциал: приращение объемного заряда приводит к повышению давления, теплового заряда — к повышению температуры и т. д.

Для совершения работы необходимо наличие контакта системы со средой в виде соответствующего канала связи. Причем каждой форме контакта соответствует определенный вид работы и вместе с тем отвечает сопряженная пара факторов экстенсивности и интенсивности. Произведение обобщенного потенциала на изменение обобщенного заряда называется *обобщенной работой* (A):

$$P \cdot dE = dA.$$

Каждой паре сопряженных зарядов и потенциалов соответствует особого рода работа.

Классическая термодинамика имеет дело с процессами, в которых работа системы определяется передачей массы или энергии. Существует, однако, много систем, в которых определяющим является передача *информации*: различные виды связи, обучения и т. п. В таких системах рабочим субстратом можно считать информацию.

Классическая теория информации определяет количество информации как меру неопределенности данной ситуации, т. е. чем меньше вероятность того факта, о котором сообщается, тем большую информацию несет данное сообщение. При этом игнорируется смысл информации и ее ценность для получателя. В последние годы предпринимались попытки определить понятия ценности и смысла информации. Однако до сих пор отсутствуют четкие представления о понятиях количества и качества информации, об отношениях этих понятий к понятиям энтропии, упорядоченности и организации. Попытаемся уточнить эти представления.

К системам, в которых рабочим субстратом является информация, можно отнести, видимо, все живые системы (в частности, мозг) а также вычислительные машины. В этих случаях можно говорить об объеме информации (память в широком смысле), о каналах передачи информации, о накоплении или утрате информации и т. д. Вероятно, информацию (знания) следует рассматривать как еще один вид обобщенного заряда — *информационный заряд*.

Возникает вопрос о сопряженном с информационным зарядом факторе интенсивности, который по аналогии с другими потенциалами обуславливает поток информации и произведение которого на изменение количества информации имеет размерность работы. Этот фактор интенсивности можно назвать *ценностью информации*, или *организованностью* системы, или *информационным* (организационным) *потенциалом*, а работу, совершаемую организацией системы при передаче информационного заряда, *работой организации*.

До 1865 г. (до введения Клаузиусом понятия энтропии) в термодинамике существовало аналогичное положение: было понятие температуры, а сопряженного с ним понятия не было. Не должно смущать нас и то обстоятельство, что новые количественные понятия — информационный заряд, организованность и работу организации — мы пока не умеем мерить. Было время, когда не умели мерить также энтропию.

Поскольку реальные машины очень сложны, для изучения совершаемых ими различных форм работы построены относительно простые модели машин. Так, для изучения механической или тепловой работы используется модель газа, заключенного в цилиндр с поршнем, для исследования химической работы применяются ящик Вант-Гоффа, полупроницаемые мембраны, гальванический элемент и т. д. Такого рода простую модель нужно построить и для изучения работы информации.

Примером простой машины, в которой «работает» информация, может служить автоматическая камера хранения на вокзале, для отпирания которой необходимо набрать определенную комбинацию цифр. Очевидно, надежность камеры зависит от того объема информации, который вложен в механизм замка. Если вложен всего 1 бит информации, т. е. надо набрать для открытия замка 0 или 1, то замок «работает» плохо. Если же для отпирания двери надо набрать четырехзначное число (т. е. емкость информации равна 10^4 , примерно 13 бит), то придется потратить несколько часов, если пятизначное число (16,5 бит) — то около 100 час., а десятизначное — 1000 лет.

Таким образом, существует четкая связь между количеством информации и «работой», которую нужно совершить, чтобы свести на нет «работу» замка. Чем больше вложено информации (заряд), тем выше организованность, надежность (потенциал) камеры хранения.

Теперь представим себе камеру с двумя дверьми, открывающимися независимо, на каждой из которых пятипозиционный замок. Если на каждой двери набрано пятизначное число, то организованность камеры равна организованности камеры с одной дверью, закрытой пятизначным числом. Этот случай аналогичен соединению двух сосудов с газом одинакового объема и давления (в результате объединения заряды складываются, а потенциал не меняется). Если же в механизм одной двери вложить 13 бит информации (набрать четырехзначное число), а незаполненный пятый разряд оставить в положении «открыто», тогда как вторую дверь запереть пятизначным числом (16,5 бит), то вероятное время, необходимое для открытия такой камеры, будет промежуточным между 100 и 10 час.: потребуется примерно 20 час. «работы». При этом предполагается, что числа набираются поочередно на разных дверях (это самая разумная тактика для «вора», не знающего, сколько информации вложено в каждую дверь).

Таким образом, при объединении двух систем их информационные заряды складываются ($13 \text{ бит} + 16,5 \text{ бит} = 29,5 \text{ бит}$), т. е. ведут себя как любые обобщенные заряды, а надежность (организованность) камеры при этом усредняется, т. е. ведет себя как любой обобщенный потенциал.

В рассматриваемой нами схеме понятие информации связано с понятием цели системы: только та упорядоченность, которая направлена к достижению «цели» системы (в нашем примере — к надежному хранению чемодана), повышает организованность системы. И только тот заряд, приток которого в систему повышает ее организованность (тем самым способствуя достижению «цели»), дает системе полезную информацию.

Можно сказать, что упорядоченность и энтропия — это то, что существует «вообще», абсолютно (как бы скаляры), а организованность и информация — это то, что существует «для» (векторы, направленные к цели). Поэтому энтропию и упорядоченность можно сопоставлять у разных систем, а организацию и информацию — только у систем с одинаковой «целью», причем более высокой является та организация, которая дает большую вероятность достижения «цели». Аналогичная мысль о направленности организации в отличие от упорядоченности высказывалась в ряде работ А. А. Малиновского.

Как связана информация с энтропией? Являясь фактором экстенсивности тепла — самого малоэффективного вида энергии, энтропия представляет собой как бы всеобщий эквивалент, сопровождающий любой вид передачи зарядов. Если мы посылаем по почте посылку, та за пересылку с нас берут, при одинаковом весе посылки, одну и ту же сумму, независимо от того, посылаем ли мы кирпичи (массу), уголь (энергию) или книги (информацию). Иначе говоря, любые процессы передачи зарядов сопровождаются возникновением энтропии «обесценения» (плата за пересылку).

Поэтому на основании того факта, что передача информации сопровождается возрастанием энтропии, а формулы Больцмана и Шеннона имеют одинаковый вид, нельзя делать вывод, согласно которому информация — это энтропия с обратным знаком, лишь выраженная в других единицах. Такое отождествление информации с неэнтропией ничего не добавляет к понятию энтропии и приводит к девальвации понятия информации. Столь же мало обосновано и деление информации на связанную и свободную или на структурную и функциональную.

Отсюда становится ясно, что живые системы безусловно подчиняются второму закону термодинамики. Но это не значит, что он может объяснить специфическое поведение, подобно тому как живые системы подчиняются закону гравитации, который также не может объяснить их специфического поведения. В целом при иерархическом строении систем законы низших уровней действуют для систем высших уровней, хотя и не определяют их специфиче-

ское поведение. Чем выше *ранг* закона, тем фундаментальнее и универсальнее сам этот закон; чем ниже уровень системы, тем выше ранг ее законов, и наоборот.

Для уяснения общего и различий между живыми и неживыми системами попытаемся нарисовать общую картину эволюции материальных систем.

Некогда существовала «популяция» элементарных частиц. Между ними осуществлялись процессы комбинаторики, а комбинации подвергались «отбору». Комбинаторика подчинялась степеням свободы и запретам, действующим для мира элементарных частиц. «Выживали» только такие комбинации, которые допускались средой. Это были процессы *физической эволюции* материи, результат ее — система атомов таблицы Менделеева. Ее длительность порядка нескольких десятков миллиардов лет.

Процессы комбинаторики атомов дают начало *химической эволюции*, результат которой — мир молекул. Какие-то комбинации атомов оказываются бесперспективными, а другие дают начало ветвящимся рядам. Так, атомы инертных газов не образуют молекул, многие другие атомы образуют двухатомные молекулы, кислороду удается образовать трехатомную молекулу, а углерод способен давать длинные цепи (алифатический ряд), кольца (ароматический ряд) и другие конфигурации, создающие большое разнообразие органических молекул. Длительность химической эволюции — около 10 миллиардов лет.

Для определения границы жизни, если опираться на развитые здесь представления, необходимо найти ту существенную программу, которая имеется уже у самой простой из всех живых систем, но отсутствует еще у самой высокоорганизованной неживой системы. Иначе говоря, надо установить, появление какой программы сделало кристалл живым.

Если сравнить элементарную живую структуру — молекулу ДНК или хромосому, — по выражению Шредингера, одномерный, аperiодический или живой кристалл, — с кристаллом неживым, то мы обнаружим много общих программ. Оба они обладают дальним (кристаллическим) порядком, способны хранить и умножать присущую им организацию (информацию). Следовательно, даже способность создавать вещество с той же специфической организацией не является монополией «живых» кристаллов. Так, опустив в сосуд с расплавленной серой маленький кристалл (затравку) моноклинической серы, мы получим большое количество моноклинической серы, а если взять ромбическую серу, то и ее количество вырастет. В принципе это не отличается от «наследственной» передачи генетической информации у живых систем. Очевидно также, что ни «одномерность», ни «аperiодичность» не имеют принципиального значения и не являются свойствами, присущими только «живым» системам.

Таким свойством является способность «живого кристалла»

«отторгать» от себя вновь образованную структуру. Появление кристаллов с таким свойством явилось первым необходимым шагом для появления новой ветви химической эволюции, приведшей к возникновению жизни. Другими словами, поворотным пунктом здесь явилось появление структур, обладающих свойством *дискретного самовоспроизводства*.

Становясь на такую точку зрения, мы должны считать вирусы и фаги живыми. Более того, мы должны считать родоначальниками жизни на Земле те молекулы, которые обладали *автокаталитическими свойствами*, т. е. уже могли размножаться. Это было первым необходимым, но недостаточным шагом к появлению жизни, так как эти молекулы были все одинаковы и при изменении условий среды все погибали.

Следующим необходимым шагом было появление разнообразия — *дисперсии свойств*. Возможность появления разнообразия связана со сложностью структуры: чем сложнее структура, тем большее разнообразие можно получить на ее основе. Поэтому на путь биологической эволюции могли стать лишь достаточно сложные структуры. В отличие от простых молекул у сложных возможны изомеры (молекулы с одинаковым составом, но разной структурой), число которых растет с ростом размеров молекулы. Физико-химические свойства изомеров заметно отличаются друг от друга. Если чистый изомер имеет вполне определенную температуру замерзания, то смесь изомеров замерзает в интервале температур. Совокупность таких молекул — это уже «популяция» молекул, обладающая дисперсией свойств. К дисперсии свойств может привести не только разная химическая структура (первичная структура), но и разные конфигурации молекул с одинаковой химической структурой, называемые вторичной структурой (например, молекула может свернуться в клубок или в спираль).

Теперь представим, что среди самовоспроизводящихся молекул есть такие, которые способны создавать не только свои точные копии, но и копии, структурно отличающиеся от исходной молекулы. Такую программу можно назвать *поливариантной редупликацией*, в отличие от конвариантной редупликации с идентичными молекулами. Популяция молекул, обладающая такой программой, вступила на путь эволюции жизни. Она уже могла получать информацию об изменениях среды и сама меняться в нужном направлении.

Например, если такая популяция «жила» в жидкой среде, то при понижении температуры среды некоторые молекулы кристаллизовались и выпадали в осадок («умирали»). Оставшиеся, более легкоплавкие, продолжали редуплицироваться. Так как редупликация была поливариантной, то у самых легкоплавких молекул могли получаться еще более легкоплавкие «потомки». Таким образом, благодаря естественному отбору популяция уходила от вредного изменения среды, адаптировалась.

На стадии однотипных элементов, объединенных в экосистему внешними взаимодействиями, конкурентные взаимоотношения толкают их на путь дифференциации, расширяющей экологическую нишу элементов. При наличии достаточной степени дифференциации возникают предпосылки коалиционных взаимоотношений (интеграции) между элементами. Укрепление последних приводит к дальнейшему углублению дифференциации и интеграции и постепенно превращает экосистему в эндосистему (организм) с минимальными программами элементов и максимальными — системы. Далее накапливаются одинаковые организмы (полимеризация новых элементов), а процессы дифференциации приводят к превращению полученной таким образом «чистой линии» в «популяцию организмов». Процессы интеграции в популяции превращают эту популяцию в организменную систему более высокого порядка, и т. д. Так были пройдены отрезки эволюции от популяции поливариантно редулицирующих молекул до популяции поливариантно редулицирующих одноклеточных организмов, затем к многоклеточному организму и к многоорганизменным сообществам (типа улья).

Следовательно, наблюдаемое нами богатство форм живых систем — это различные стадии эволюции, в которых и сейчас идут процессы усиления взаимодействия между элементами систем. Происходит всеобщее укрепление связей, утрата степеней свободы элементов и появление новых программ в системах. Поэтому системы популяционного типа постепенно превращаются в системы организменного типа. В свою очередь однотипные организменные системы образуют популяционные системы на новом уровне организации.

Существуют ли какие-нибудь общие закономерности для эволюции систем разных классов? Можно предполагать, что существуют.

К определению понятия «система»

Обсуждая вопрос об определении понятия «система», большинство участников встречи-дискуссии исходило из необходимости учесть в этом определении специфику биологических систем. Именно этим, в частности, следует объяснить включение в определение системы, данное Л. А. Блюменфельдом, параметра времени (очевидно, что, например, в технических системах этот параметр не играет такой роли, как в системах биологических). Вместе с тем класс биологических систем необычайно широк, вследствие чего определение биологической системы не может не носить общего характера, в какой-то степени сближаясь с самыми абстрактными определениями, даваемыми понятию системы.

В этой связи представляется небезынтересным привести краткую сводку обсуждения определения понятия системы в его общенаучных аспектах. Уже первые попытки построить такое определение натолкнулись на серьезные трудности двоякого порядка. Во-первых, понятие системы широко используется в самых различных областях науки и практики, что порождает явное несовпадение значений этого понятия (например, формализованная

знаковая система, являющаяся предметом изучения в метаматематике и логике, и такая система, как живой организм, едва ли могут рассматриваться как виды одного и того же понятия системы — скорее речь здесь идет о разных понятиях).

Во-вторых, объяснительная ценность приписывания тем или иным объектам свойств систем далеко не всегда очевидна, поскольку при желании любой объект можно рассматривать как систему, выделив в ней соответствующие любому определению признаки и свойства.

Осознание этих трудностей показало невысокую эффективность определений, призванных характеризовать «все мыслимые» системы сразу. Поэтому в литературе последних лет акцент делается на построении определенных, которые бы достаточно адекватно описывали вполне определенные классы систем. Не входя в обсуждение каждого из множества предложенных определений, можно указать наиболее существенные признаки, атрибутируемые в такого рода определениях всем системам или некоторым их классам.

В основу всех определений системы как идеального объекта кладется представление о *множестве элементов*, причем в абстрактных определениях на природу элементов не накладывается никаких ограничений, а в определениях, относимых к относительно узкому классу объектов, могут быть указаны соответствующие ограничения. При этом обычно учитывается относительность понятия «элемент» и в этой связи самого понятия системы: то, что рассматривается как система в одном случае, может в другом выступить как элемент или подсистема в рамках более широкой системы.

Естественным развитием представления об относительности системы и элементов является представление об *иерархичности* строения системы, т. е. об определенной последовательности включения систем более низкого уровня в системы более высокого уровня (формальные аспекты анализа многоуровневых систем подробно рассматриваются в ряде работ М. Месаровича).

Во всех определениях систем обычно указывается (или принимается неявно), что элементы множества объединяются в систему через посредство *отношений и связей*. При этом, однако, понятие связи, как правило, не получает эксплицитной характеристики (следует отметить, что это понятие специально разрабатывалось лишь в работах советских логиков А. А. Зиновьева и Г. П. Щедровицкого).

Множество взаимосвязанных элементов, образующих систему, противостоит *среде*, с которой взаимодействует данная система, причем характер этого взаимодействия может быть самым различным (в общем случае различают строго каузальное и вероятностное воздействие среды на систему).

Среди самых общих характеристик взаимосвязи элементов на первое место нередко ставится *упорядоченность* элементов, отношений и связей системы, под которой в самом общем виде понимают ограничение многообразия и связанный с ним момент повторяемости. Развитием понятия упорядоченности являются понятия *структуры* и *организации* системы. Структуру чаще всего определяют как инвариантный аспект системы (см., например, Н. Ф. Овчинников. Принципы сохранения. М., 1966) или совокупность устойчивых связей и отношений системы (такое понимание развивал на встречедискуссии А. А. Малиновский, оно встречается также в работе О. Ланге «Целое и развитие в свете кибернетики», опубликованной на русском языке в книге «Исследования по общей теории систем». М., 1969). Что же касается организации, то через это понятие стремятся выразить количественную характеристику упорядоченности (А. А. Малиновский, кроме того, считает важнейшим признаком организации ее направленность; см., например, его статью «Организация» в «Философской энциклопедии», т. 4. М., 1967).

Для целого ряда систем в качестве важнейшей характеристики указывается наличие у них собственного *поведения*, в котором непосредственно реализуется взаимодействие системы со средой. Поведение рассматривается либо как реактивное, т. е. определяемое во всех существенных его моментах

воздействиями среды, либо как активное, т. е. определяемое не только средой, но и собственными *целями* системы, предполагающими преобразование среды, подчинение ее своим потребностям. В этой связи в системах с активным поведением важнейшее место занимают целевые характеристики самой системы и ее подсистем. Как коренное свойство биологических систем активность поведения рассматривается в концепции физиологии активности, созданной Н. А. Бернштейном. Целевое (телеологическое) описание систем нередко выступает лишь как средство анализа, особенно в тех случаях, когда речь идет о системах, лишенных собственных целей.

Различение синхронического и диахронического аспектов поведения и, более широко, жизнедеятельности системы приводит к различению процессов *функционирования* и *развития* систем.

В сложноорганизованных системах в качестве важнейшего специфического признака выделяются процессы *управления*, что, в частности, порождает необходимость информационного подхода к исследованию систем, наряду с подходами с точки зрения вещества и энергии. Именно управление обеспечивает автономность поведения системы и его целенаправленный характер.

Таковы важнейшие признаки, при помощи которых даются содержательные характеристики системам. Что касается формальных определений понятия «система», то они учитывают лишь некоторую часть этих признаков. Так, М. Месарович определяет систему как отношение, стремясь охватить своим определением максимально широкий класс объектов, интуитивно относимых к системам. Близко к этому и определение системы у А. Холла и Р. Фейджина: «система есть множество объектов вместе с взаимоотношениями между объектами и между их атрибутами» (A. D. Hall, R. E. Tegen. Definition of System.—«General Systems», 1956, v. 1. p. 18). Более узкое определение дает Л. Берталанфи: система есть комплекс элементов, находящихся во взаимодействии (L. von Bertalanffy. Allgemeine Systemtheorie.—«Deutsche Universitätszeitung», 1957, nr. 5—6, S. 9). Берталанфи различает открытые системы (в них возможен лишь обмен энергией) и открытые (в них происходит обмен энергией и веществом), причем стационарным состоянием открытой системы является, по Берталанфи, состояние подвижного равновесия, при котором все макроскопические величины системы неизменны, но непрерывно продолжают микроскопические процессы ввода и вывода вещества. В работах А. И. Умова система определяется на основе понятий вещи, свойства и отношения: система есть множество объектов, на котором реализуется заранее определенное отношение с фиксированными свойствами (см., например, А. И. Умов. Система и системные параметры.— В кн.: «Формальный анализ систем». М., 1968). Таким образом, формальные определения понятия системы оказываются более широкими, не отражающими по крайней мере некоторых существенных признаков систем, изучаемых в тех или иных специальных научных дисциплинах. Но этот их недостаток компенсируется достаточно высокой оперативностью, возможностью применить к исследованию систем мощные средства современного формального анализа. Такое применение, однако, как показывает практика, оказывается эффективным лишь тогда, когда само формальное определение строится применительно не ко всем возможным системам, а к их определенному классу. Впрочем, по мере дальнейшего развития системных исследований будет, вероятно, расти и общность эффективно работающих формальных определений.

Более подробно о различных аспектах определения понятия «система» см.: В. Садовский, Э. Юдин. Система.— «Философская энциклопедия», т. 5. М., 1970.

ПРОБЛЕМА ВРЕМЕНИ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А. В. Яблоков. Мне хотелось сделать небольшое замечание, касающееся тех публикаций в области теории систем, в которых, как мне кажется, системный подход противопоставляется классической эволюционной точке зрения. На мой взгляд, элементы такого противопоставления есть в некоторых работах К. М. Хайлова. Если это узаконить и возвести в принцип, то вряд ли от этого выиграет и сама теория систем.

Бесспорно, конечно, что вся проблематика системного подхода и соответствующие концепции возникли на материале современной биологии. Но вместе с тем очевидно и то, что современная биология неотделима от современного эволюционного учения, а оно в свою очередь неотделимо от концепции Дарвина. И с этой точки зрения противопоставлять теорию систем и теорию эволюции — значит дезориентировать людей, которые в этом деле как следует не разбираются. Правда, сам К. М. Хайлов говорит осторожно, но когда его точку зрения истолковывают, то нередко сводят все к прямому противопоставлению.

Все мы шагаем в одном и том же направлении, и системный подход хорошо ложится на современные эволюционные представления, в чем-то способствуя их развитию, а в чем-то опираясь на них. И это методологически очень важно учитывать при разработке идей системного подхода.

К. М. Хайлов. Мне кажется, что я ничего не противопоставляю, во всяком случае в мои намерения никогда не входило противопоставлять системный подход эволюционному.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Не может быть контраверсы между эволюционной теорией и теорией систем. Конечно, к биологической проблематике можно подходить с разных точек зрения, в том числе с подчеркнуто эволюционной или с подчеркнуто системной. Целый ряд эволюционных проблем можно сформулировать так, что для их решения потребуются системный подход, способ анализа определенной проблематики. Поэтому противопоставление системной и эволюционной точек зрения с общеметодологической точки зрения является некорректным.

К. М. Хайлов. Я хотел бы пояснить, откуда может вытекать впечатление, будто бы я, говоря о системном подходе, склонен игнорировать эволюционный подход.

С моей точки зрения, рассмотрение сформулированных в программе нашей дискуссии вопросов о структуре, организации биологических систем и о биологических системах как таковых не обязательно требует обращения к проблемам эволюции структур, развития организации и т. д., не обязательно связывать анализ с эволюционной идеей. Когда рассматривается генетический аспект биологических систем и в этой связи возникает проблема преемственности, вообще временных связей, возникают вопросы, которые не обязательно требуют применения системного подхода. Поэтому в принципе при анализе структур и организации можно обойтись без учета преемственности поколений, т. е. исторического плана.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Можно обойтись или должно обойтись? Если Вы утверждаете, что должно, то это требует спора. Сегодня было достаточно разговоров о том, что в любое определение, которое мы пытались сформулировать для понятия системы, обязательно должно входить время, история, преемственность; иначе все теряет смысл, и понятие системы без остатка идентифицируется с понятием структуры.

Конечно, Вы можете изучать структуру без всякой преемственности. Скажем, Вас интересует структура вот этой пепельницы, и при этом Вам все равно, кто ее сделал и что из нее в дальнейшем будет, какую роль сыграет она в развитии археологических изысканий человечества. Но причем здесь система?

К. М. Хайлов. Вероятно, мы по-разному понимаем систему. Мое понимание системы, по-видимому, более близко к понятию структуры, поэтому-то я и не ощущаю для себя обязательности рассмотрения системы во времени. Для меня система в определенных аспектах может рассматриваться вне времени.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Я не спору — рассматривайте вне времени. Но если Вы утверждаете, что только вне времени и надо рассматривать систему, то тут я возражаю.

К. М. Хайлов. Конечно, всякая система с какого-то момента обязательно должна рассматриваться во времени.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Я бы на Вашем месте в этой фразе сказал: «может» рассматриваться во времени. А если должна, то тем лучше для меня.

К. М. Хайлов. Должна, но не всегда. А в ряде случаев система может рассматриваться и вне времени. В частности, система может рассматриваться вне времени в том случае, когда мы абстрагируемся от ее эволюции.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Если Вы желаете рассматривать статику системы, то тем самым Вы, естественно, исключаете время. Но тогда о чем же говорить и спорить? Рассмотрение чего-то в статике априори исключает фактор времени и какую-либо эволю-

цию. Поставив перед собой такую задачу, Вы можете сказать: точка, леди и джентльмены! И если Вы спросите, имеете ли Вы право рассматривать систему статически, то я думаю, что мы все поднимем руку и скажем — рассматривайте, на доброе здоровье!

Ю. М. Свирижев. Можно, конечно, рассматривать систему и статически, но насколько такое рассмотрение опишет свойства системы? Я могу, например, поставить этот карандаш на острие и рассматривать его в тот небольшой промежуток времени, пока он удерживается на острие; тогда свойством этого карандаша будет свойство стоять на столе на острие. Но когда мы смотрим на этот карандаш с точки зрения эволюции, то его свойство будет иным — лежать. Вот и возникает вопрос: что же дает статическое рассмотрение, может ли оно дать какую-то информацию (прошу извинить за такое слово)?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. И едва ли тогда имеет смысл говорить о системе, о том, что Вы, например, изучаете систему «кошка». Работу в таком случае надо начинать ясно и просто: рассматриваем статическое состояние кошки Машки в разрезе... И дальше следуют соответствующие пункты.

А. С. Мамзин. Любая биологическая система включает фактор времени, если даже брать ее в устойчивом состоянии. Но надо отличать функционирование системы от ее развития. Когда речь идет о функционировании системы, то время можно принять равным нулю.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Даже если мы говорим о функционировании (я пользуюсь Вашими словами), то время никак нельзя исключать.

В. Н. Садовский. По-моему, спор возникает из-за того, что мы отождествляем время и историю системы. Структуру и систему обязательно надо рассматривать во времени, но не обязательно в истории.

Ю. М. Свирижев. А что такое история? Это описание систем во времени.

Я. И. Старобогатов. Это не совсем так. Одно дело описать историю происхождения видов, а другое дело — описать биологическую систему в состоянии функционирования, описать ее внутренние связи, строение. Во втором случае проблема истории, стоящая в эволюционной теории, может вовсе не возникать.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Мне кажется, что и во втором случае история учитывается, но весь вопрос в уровне и плане подхода. Как правильно говорит А. А. Малиновский, эволюционное время определяется не астрономическим временем, не часами, а поколениями, т. е. временем смены поколений. И в онтогенезе дело обстоит не просто. Можно рассматривать кошку Машку в пределах одной разумно выделенной фазы, но уже это предполагает, что мы разбили весь онтогенез на определенные фазы. Следовательно, сама смена этих фаз есть история определенного рода. Вот, на-

пример, развитие организма из зиготы — это история, хотя и не эволюционная, а онтогенетическая.

А. М. Молчанов. Представим себе, что перед нами река. Для нее можно рассматривать два радикально различных временных масштаба: сезон и тысячелетие. Если мы берем год, то река — это поток воды, а ее структура — это ее русло. Если же мы берем в качестве масштаба тысячелетие, то река — это осадочная порода, а ее структура — долина. Отсюда следует, что функционирование может рассматриваться по-разному, в зависимости от того, берем ли мы малое или большое время. Если же обратиться к сверхбольшому времени, то в его рамках образование долины реки можно рассматривать как выравнивание гор. Ограничиваясь одним масштабом, мы должны сказать, что более высоким из них является история, а малое время следует выкинуть.

В. Н. Садовский. История, действительно, малыми временами не интересуется, а системный анализ занимается в первую очередь именно этими временами и может не интересоваться большими временами.

И. В. Блауберг. Пожалуй, нет: системный анализ интересуется и большими временами, поскольку они связаны с малыми.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Я бы сказал, что большие времена — это онтогенетические фазы в моем примере, если речь идет об онтогенезе.

Э. Г. Юдин. Из этой дискуссии можно сделать вывод, что когда мы толкуем о биологических системах, то время, с одной стороны, оказывается очень существенным их параметром, а с другой стороны, оно не имеет никакого самостоятельного и тем более абсолютного значения. Более того, нельзя, по-видимому, говорить о времени «вообще»: всякое время должно быть отнесено к определенному типу системы, рассматриваемой нами. А это значит, что для разных типов систем разными оказываются и времена.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Может быть, Вашу мысль следовало бы сформулировать так: так же, как элементарные составные части данной системы являются звеньями именно этой системы и неделимы с точки зрения этой системы, так и время относится к числу этих неделимых элементарных составных частей.

Э. Г. Юдин. Т. е. Вы хотите сказать, что для каждой данной системы существует неделимая единица времени.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Это общее явление: современный микрофизик, специалист по элементарным частицам, мало интересуется нашим, человеческим временем — его мало занимают сутки, часы, минуты и даже секунды, так как изучаемые им процессы характеризуются временем 10^{-13} сек. И совершенно противоположен этому масштаб отрезков астрономического времени.

Э. Г. Юдин. После этой дискуссии выяснилось, что упреки в адрес К. М. Хайлова были не совсем корректны и обоснованны: он не противопоставлял эволюцию и организацию, а просто раз-

личал два типа систем, у каждого из которых своя особая единица времени.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Я не знаю литературы, о которой шла речь, поэтому мне трудно судить, было ли противопоставление. Но судя по тому, как препирались А. В. Яблоков и К. М. Хайлов, наверное, оба они выражались не совсем аккуратно.

Мне еще раз хотелось бы подчеркнуть совершенно неоспоримую вещь: нельзя противопоставлять эволюционный и системный подходы. Конечно, в свете определения Л. А. Блюменфельда надо обязательно учитывать, о каких системах идет речь: меня может интересовать происхождение кошки Машки, а кого-то другого — система ее фазового онтогенетического развития с соответствующими срезами, изучением статики и пр. Но в любом случае мы не вправе утверждать, что мы отбрасываем время, если только дело не ограничивается изучением пространственной конфигурации структуры, а затрагивает функцию чего бы то ни было.

К. М. Хайлов. Более общо можно сказать, что при рассмотрении статики системы не обязательно обращение к ее движению.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Это уже другой вопрос, это зависит от цели исследования. Я говорил о кошке Машке, а если Вас интересует кошка вообще, то Вы флуктуацию изменчивости не включаете в анализ: Вы тогда должны брать усредненную кошку, т. е. брать, скажем, 27 кошек и утверждать, что статика кошки в фазе № 17 такая-то.

А. А. Малиновский. Если попытаться подвести итог, то дело обстоит так: изучение системы вне исторического развития возможно, но для минимальной полноты исследования включение времени обязательно в том смысле, что мы всегда изучаем структуру в связи с функционированием. Что же касается специфики биологических систем, то она такова, что обязательно требует эволюционного подхода, поскольку целый ряд теоретически возможных систем не реализуется на практике только потому, что существуют эволюционные запреты. В этом смысле эволюционный подход оказывается необходимым условием всякого изучения биологических систем.

Обработывая стенограмму своего выступления на встрече-дискуссии, А. М. Молчанов в развернутой форме изложил соображения относительно проблемы времени в биологических системах. Ниже следует подготовленный им текст.

Время и эволюция

А. М. Молчанов

Введение. Кто-то (англичанин, судя по стилю) сказал: «Когда бог создавал время, он создал его достаточно». Другой умный англичанин, Чарлз Дарвин, тоже достаточно качественно, но весьма

эмоционально описывает ощущения, вызываемые у него геологическими масштабами времени: «... the mind is stupefied in thinking over the long, absolutely necessary, lapse of years». (Цитировано по изданию Collier, New York, 1909, p. 185). Не менее выразительно другое место: «...yet we must confess that it makes the head almost giddy to reflect on the years, century after century...» (Ioco cit., p. 196).

Поучительно представить себе количественно масштаб времени, вызвавший у Дарвина столь сильные душевные движения. Оба отрывка касаются сроков формирования долины реки Санта-Крус в Патагонии. Сам Дарвин пишет, что это случилось «значительно позже образования подстилающих слоев с третичными раковинами». По современной оценке речь идет, таким образом, о промежутке времени в несколько десятков миллионов лет. Срок довольно скромный по сравнению с возрастом Земли, который по крайней мере в сто раз больше.

Что же так взволновало Дарвина? И почему мы, по прошествии всего лишь одного из дарвиновской чреды веков, спокойно рассуждаем о значительно ббльших временах? И что лучше — волнение Дарвина или наше спокойствие?

Ввиду очевидной риторичности последнего вопроса отвечать на него не надо. А вот первые два стоит обсудить.

Катастрофы или эволюция? Во всей книге Дарвина пламенеет не остывший еще накал борьбы с катастрофизмом. С теорией катастроф в нынешних популярных (да и не только популярных) книгах разделяются очень легко, попросту объявляя ее антинаучной. Однако реальному Дарвину, а особенно его другу и предшественнику Ляйеллю приходилось намного трудней. И главная трудность состояла в том, что науке того времени возраст Земли был неизвестен.

Характерно, что Дарвин, точный, почти педантичный во всем, что касается размеров, количеств и даже цен (на одной только страничке 383 приведено более десятка разнообразных чисел), становится описательным, качественным и эмоциональным, как только речь заходит об оценке времени.

Едва ли не единственное количественное высказывание — «...like unto a geologist who had lived his ten thousand years...» (Ioco cit., p. 508) — является лишь метафорой, но метафорой, заставляющей призадуматься. Неужели даже для Дарвина количественным ориентиром были библейские семь тысяч лет?

Если это так, то многое становится понятным. Понятно, например, почему Ньютон, живший полутора столетиями ранее, вынужден был считать доказательством божественного творения Солнечной системы высокую симметрию ее строения. На естественное происхождение попросту не хватало времени. Именно отсюда возник ньютоновский «первотолчок», за который ему впоследствии так досталось от Энгельса.

Катастрофы Кювье проистекают, по-видимому, из того же источника. Не удавалось «уложиться» в сроки, которыми естествоиспытатели сознательно или бессознательно ограничивали естественную историю.

Логически равноправны были два выхода — или серия катастроф (которую к тому же подсказывала библейская штурмовщина шести дней творения), или радикальный пересмотр вопроса о времени. Историю Земли необходимо было, как мы теперь знаем, удлинить в миллион раз.

Деятельность Прокруста — жалкий дилетантизм по сравнению с тем, что предстояло науке. Вполне понятно поэтому, что Чарлз Ляйелль и Чарлз Дарвин — люди, больше других сделавшие для утверждения идеи эволюции — меньше всего рисковали количественными высказываниями. Собранные и осмысленные ими богатейшие данные, прежде всего геологические, прямо-таки вынуждали идею огромности прошедшего времени. Однако количественные методы могли возникнуть только после и в результате того психологического перелома, который они создавали.

Большие числа. «Почему атомы такие маленькие?» — спрашивает Эрвин Шредингер в книге «Что такое жизнь с точки зрения физики?» и отвечает — «Это потому, что мы такие большие».

Сложная система (человек) неминуемо содержит громадное число простых атомов — вот главный смысл высказывания Шредингера. Однако есть и вторая сторона сопоставления «человек — атом». Нельзя безотносительно говорить «много», «мало». Всякое количественное высказывание есть высказывание об однотипном. На математическом жаргоне — параметры должны быть безразмерными. Шредингер, следовательно, подчеркивает, что всякий малый параметр есть обратная сторона большого параметра (более точно — обратная величина). Однако психологически безразлична форма вопроса. Более того, она имеет немалое методологическое значение. Почему мы большие — более глубокий вопрос, так как сразу возникает другой. А не могли ли мы быть меньше? И насколько? И выясняется, что безобидная, казалось бы, перифраза кардинально меняет проблему. Из простого любопытства вырастает глубокая задача — каковы минимальные, критические значения объема, массы, энергии, времени и т. д., при которых может возникать жизнь.

Дарвин, в сущности, всего лишь элегичен, говоря о чреде веков. Это слегка завуалированный вздох о краткости жизни человеческой и почтительное удивление возрастом даже такой геологически обыденной вещи, как долина реки. Но при чем здесь человек с его веком? Грустно, конечно, что век такой маленький (по сравнению с чем?). Но ведь человек только стоит, смотрит и старается понять. Создавал же долину не он, а ежедневные приливы и отливы морского рукава, ставшего потом рекой Санта-Крус. Или, в нашей стороне, ежегодные «разливы рек ее, подоб-

ные морям». Человеческие масштабы здесь категория внешняя, да и астрономическое измерение времени существенно лишь в той мере, в какой оно связано с «единичным актом творения».

Поучительно оставить наедине главные действующие лица — базальтовый массив и приливную волну. Массиву этому добрый десяток миллионов лет, и каждый день каждого года из этих миллионов лет «о скалы грозные дробятся с ревом волны и белой пеною, крутятся, бегут назад». Итого миллиард раз.

Все-таки очень легко стали мы произносить «десять в девятой степени». Писать, конечно, проще, а вот удивляться и, для пользы дела, ужасаться — разучились. Дарвин еще умел, и у него это неплохо получалось.

«В одном мгновеньи видеть вечность». Самый большой отрезок времени, сколько-нибудь поддающийся сегодня количественной оценке — возраст нашей Галактики — составляет 10^{13} лет. Ошибка на пару порядков здесь и далее особого значения не имеет.

Самый малый «кусочек» времени, о котором имеет смысл говорить при современном уровне знаний, составляют 10^{-23} сек. Это время, за которое свет прошел бы «от одного края электрона до другого», если бы написанная фраза имела смысл. К счастью, для наших целей достаточно, чтобы была разумной оценка времени, получающаяся в результате деления классического радиуса электрона, составляющего 10^{-13} см, на скорость света — $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Какое именно истолкование этот «квант времени» получит в будущей теории элементарных частиц, в данный момент несущественно.

Единственная твердая опора посреди этих двух зыбких чисел, промежутков, соединяющий эти две пучины времени — число секунд в году. Да и то надежность его весьма сомнительна — весьма и весьма вероятно, что длина суток, да и года меняется. Все же, по данным на 1969 г., его можно вычислить по крайней мере с двумя знаками: $365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 0,32 \cdot 10^8$, а не с точностью до порядка, как «обрамляющие» числа.

Эти трудно сопоставимые величины следует сравнивать в логарифмической шкале. И дело не только в удобстве — такая шкала, как мы увидим имеет, по-видимому, глубокий структурный смысл.

Вся «Вечность» оказывается не очень большой — всего лишь сорок четыре порядка. Из них на долю космоса (от возраста Галактики до года) приходится тринадцать порядков, восемь порядков (от года до секунды) «отпущены» на человеческий, организменный, уровень, а остальные двадцать три порядка — больше половины — царство микромира.

Поэт W. Blake, цитата из которого (в переводе Маршака) вынесена в заголовок, призывает «to see Eternity in an hour». Но Час содержит львиную долю Вечности (28 порядков из 44), и поэтическая интуиция оказывается, следовательно, инструментом довольно грубым.

Естествоиспытатель Ч. Дарвин угадывает Вечность значительно раньше (уже в девяти порядках) и чувствует ее намного тоньше — не в простом течении, длительности, а в созидающей ритмике приливов. Если же кто-нибудь склонен видеть в приливах более разрушительное начало, нежели созидательное (созидание, впрочем, всегда происходит за счет разрушения), тому можно посоветовать прочитать дарвиновскую теорию происхождения атоллов — там уж созидательный характер микроритмики не подлежит сомнению.

Конечно, в приведенной форме «исчисление Вечности» имеет несколько юмористический характер, однако оно дает представление о современной шкале времени. Эта шкала может и будет, конечно, меняться, особенно на «краях» — на космологическом «верху» и квантовом «низу». Но вся биологическая эволюция должна заключаться «между» указанными границами. На всю сложность жизни «отведено» около сорока порядков — хватит ли их? Или опять потребуются катастрофы? Таков совсем не юмористический смысл этих выкладок.

Забавно, что вечность Маршака, и здесь перевод весьма удачно не сохраняет «рабской верности оригиналу», близка к половине Вечности. Мгновенье, то есть миг, миганье века (глаза), продолжается несколько сотых секунды. За время жизни нашей Галактики протекло столько человеческих «мгновений», сколько в одном мгновенье содержится элементарных «квантов» времени.

Человек — макрокосм, «мера всех вещей» — и количественно оказывается посредине между микромиром и космосом.

Математическое интермеццо. В математике, в нелинейной теории колебаний, есть задача, очень близкая по духу к разбираемой.

Предположим, что задана система уравнений

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y),$$

(1)

$$\frac{dy}{dt} = \varepsilon g(x, y),$$

содержащая малый параметр ε . Каков смысл этого параметра? Его можно интерпретировать (очень существенно, что эта интерпретация неединственная) как отношение масштабов времени системы «иксов» и системы «игреков».

В самом деле, изменение x можно приближенно записать в виде

$$\Delta x \approx f \Delta t.$$

(2)

Из этого соотношения можно получить оценку времени

$$\Delta t \approx \frac{|\Delta x|}{|f|},$$

(3)

необходимого для того, чтобы система x -в испытала изменение масштаба Δx . Следовательно, время существенных изменений, т. е. $\Delta x \sim 1$, имеет порядок единицы. Мы предполагаем, разумеется, что масштабы x , y и t выбраны разумно, т. е. так, чтобы величины $f(x, y)$ и $g(x, y)$ были порядка единицы. Аналогичная выкладка для y приводит к результату:

$$(4) \quad \Delta t \approx \frac{1}{\varepsilon} \frac{|\Delta y|}{|g|},$$

из которого вытекает, что для существенного изменения необходимо огромное время

$$(5) \quad T \sim \frac{1}{\varepsilon},$$

которое тем больше, чем меньше ε . Уже это обстоятельство наталкивает на мысль, что ε характеризует (и это еще одна интерпретация) малость взаимодействия между системами x и y .

Проведенный элементарный анализ выясняет главное. Система, описываемая вектором x , изменяется почти независимо от системы, описываемой вектором y . Обычно x называют «быстрыми», а y — «медленными» переменными.

Удобный формальный прием состоит в том, чтобы перейти к пределу, положив $\varepsilon = 0$.

Невозможно удержаться от замечания, что самая сущность математики состоит именно в изучении асимптотических, идеализированных, предельных, вырожденных, крайних ситуаций. Ситуаций достаточно простых, чтобы быть подвергнутыми логическому анализу, но достаточно сложных, чтобы сохранять главные черты явления, иначе анализ бессодержателен. Метод математики — графика, если угодно, карикатура на явление; гротеск, позволяющий заострить и выделить определяющее в явлении. Акварельные полутона противопоставлены математическому подходу, во всяком случае на стадии постановки вопроса.

Возвращаясь к нашей задаче, получаем систему:

$$(6) \quad \frac{dy}{dt} = 0,$$

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y),$$

откуда вытекает, что

$$(7) \quad y = y_0 = \text{const},$$

и остается только уравнение для x

$$(8) \quad \frac{dx}{dt} = f(x, y_0).$$

Система для x даже формально зависит только от нынешнего «уровня» y_0 и не зависит от динамики этого уровня. Движение быстрых переменных происходит на постоянном уровне медленных. Мы не задумываясь говорим о высоте горы над уровнем моря, даже если находим на ее вершине раковины, свидетельствующие о том, что она была (и, может быть, будет) когда-то морским дном.

Вряд ли кто-нибудь из читателей заметил (это нечасто замечают даже профессионалы-математики), что все рассмотрение совершенно неравноправно по отношению к медленным и быстрым переменным.

Мы были явно пристрастны. Это находит формальное выражение в том, что время измеряется масштабом, характерным именно для быстрых переменных. Собственное время быстрых переменных — период колебаний в случае периодических движений, время полураспада в случае движений релаксационных и т. д. — вот что выбрано за единицу измерения времени.

Попробуем восстановить справедливость. Перейдем к «медленному» времени:

$$(9) \quad \tau = \varepsilon t.$$

В этом новом времени система приобретает вид

$$(10) \quad \left. \begin{aligned} \varepsilon \frac{dx}{dt} &= f(x, y) \\ \frac{dy}{dt} &= g(x, y) \end{aligned} \right\},$$

и предельный переход (полный анализ которого представляет трудную, до сих пор до конца не решенную математическую задачу) приводит к выводу:

$$(11) \quad \left. \begin{aligned} 0 &= f(x, y) \\ \frac{dy}{dt} &= g(x, y) \end{aligned} \right\}$$

Снова выделяется одна только система, на этот раз, конечно, медленных переменных. Быстрые переменные, как раньше медленные, выпадают из системы.

Угадывается любопытный общий вывод. Фиксирование определенного масштаба времени как бы «выключает», «замораживает» иные масштабы. Интересно, что «замирают» не только более медленные процессы, что вполне понятно, но и более быстрые, что кажется на первый взгляд парадоксальным.

Однако это так, и наглядно можно пояснить это следующим примером. Допустим, что мы видим одновременно вращающийся винт самолета и обычные часы. Движение секундной стрелки на часах ясно видно — это основное переменное. Минутная и тем более часовая стрелки «стоят» на месте — это медленное движение. Но движения винта (быстрое переменное) мы тоже не видим.

Вместо винта виден сверкающий, но неподвижный круг. Математик в этом случае говорит об «осреднении по траектории быстрого движения».

И дело здесь вовсе не в оптических эффектах, не в психологии. Атом, например, «прозрачен» для быстрых α -частиц и непроницаем для других атомов. Хорошую классическую модель этого явления можно получить, хорошенько раскрутив велосипедное колесо. Палец в него совать не рекомендуется, но камешки, бросаемые раз за разом, почти все будут свободно пролетать сквозь «непрозрачное» для более медленных движений колесо.

Специфична ли квантованность для микромира? Конечно, «замирание» быстрых процессов, при всем сходстве этого явления с «замиранием» процессов медленных, часто имеет качественно иной характер.

Главное различие состоит вот в чем.

Медленные процессы мы можем «застать» в любой стадии их развития, а процессы быстрые всегда успевают проэволюционировать и стабилизироваться в устойчивом состоянии.

Формальное выражение это различие находит в том, что медленные переменные y_0 в системе (6) могут принимать произвольное значение, и мы субъективно воспринимаем это как непрерывность. Быстрые же переменные x должны удовлетворять первому из уравнений системы (11), т. е. выходить на квазиравновесный уровень быстрого движения. Словечко «квази» приписано для того, чтобы подчеркнуть зависимость этого уровня от медленного переменного y и особенно подчеркнуть возможность исчезновения устойчивости этого равновесия при дальнейшей эволюции y . Возникает дискретность возможных состояний быстрых переменных x .

С этой точки зрения закономерен тот исторический факт, что дискретность особенно отчетливо и принудительно была понята впервые именно в микромире в форме квантованности физических величин. Однако это всего лишь частное проявление значительно более общей закономерности¹.

«Финальные» состояния (квазиравновесные, метастабильные, устойчивые), очевидно, дискретны. Именно поэтому эволюционно зрелые системы обнаруживают всегда тенденцию к дискретному, иерархическому строению. Биологические системы не представляют собой исключения из этого правила. Им «кисельность» (по терминологии Н. В. Тимофеева-Ресовского) противопоставлена не в меньшей степени, чем квантовым объектам, и, в принципиальном отношении, по той же причине — по причине эволюционной зрелости.

¹ Некоторые соображения по этому поводу содержатся в статье автора «The Resonant Structure of the Solar System». — *Icarus*, 1968, v. 8, № 2. Развитие этих идей см. *Icarus*, 1969, v. 11, No. 1.

Роль диссипации. Когда Фауст спрашивает Мефистофеля, кто он такой, тот отвечает весьма уклончиво: Ein Teil von jener Kraft, die stets das Böse will, und stets das Gute schafft.

Лукавому верить нельзя, конечно, ни в одном слове. Он и совет, недорого возьмет, и обмануть честного христианина всегда рад. Однако на этот раз он сказал правду, хотя и не всю.

Современный научный вариант (и очередное перевоплощение Мефистофеля) — это диссипативные факторы: трение, неупругое столкновение, возрастная усталость материалов, убегание атмосферы, накопление мутаций и несть им числа. Все они заняты как будто самым дьявольским делом — повышают энтропию. И в самом деле, если эти факторы достаточно сильны, они сделают свое черное дело полной деградации системы. Если бы, например, Земля испытывала при движении по орбите достаточно сильное трение, то она упала бы в конце концов на Солнце и сгорела бы там вместе со всей своей биосферой.

Однако, если эти факторы держать в узде, вместо злобного дьявола возникает легион полезных озорных чертенят, делающих действительно полезное дело.

Можно показать — и весь предыдущий импрессионизм является попыткой заменить, хотя бы на эмоциональном уровне, несколькими строчками десятки утомительных страниц чисто математического текста, — что диссипативные факторы при определенных условиях (необходимо, в частности, их «израсходование», убывание в процессе эволюции) имеют тенденцию стабилизировать сложные резонансные колебательные структуры.

Если диссипация велика, дискретных резонансных уровней мало (тем меньше, чем больше диссипация), структура оказывается бедной и неинтересной. Это, конечно, верно. Однако совсем без диссипации обойтись тоже нельзя — возникает «кисельность», стабилизирующее начало исчезает и система воспринимается как чисто стохастическая, становясь эквивалентной ей в определенном (статистическом) смысле этого слова.

Иерархия времен. Ранее бегло было разобрано взаимодействие всего лишь двух систем с резко различными масштабами времени. В реальных ситуациях цепочка «вложенных» друг в друга масштабов времени намного длиннее.

Так, например, в качестве исходного масштаба времени при изучении биологической системы (скажем, млекопитающего) можно взять время единичного акта катализа. Для наиболее быстрых ферментов это величина порядка 10^{-4} и даже 10^{-6} сек. Результатом длинной последовательности таких актов может явиться, например, элементарный этап мышечного сокращения, продолжающийся около 10^{-2} сек. За следующий масштаб примем одно биение сердца — одна секунда. Достаточно сложный акт условнорефлекторной деятельности продолжается время, измеряемое минутами. Пищевой рефлекс характеризуется суточным

ритмом. Достаточно ясно, как продолжать эту цепочку или «вставлять» в нее пропущенные звенья.

Однако проведенный выше анализ показывает, что нет необходимости рассматривать (по крайней мере в первом приближении) сразу всю иерархию масштабов и соответствующих им систем. Факт «замирания», «выключения» и высших, и низших масштабов времени имеет первостепенное методологическое значение. Он позволяет сводить вопрос к изучению только одной ступеньки, содержащей два «соседних» масштаба времени. Это весьма принципиальный шаг — выделение «кванта» эволюции, ее структурного элемента.

Задача распадается тем самым на две совершенно разные по характеру и стилю задачи.

Изучение взаимодействия двух соседних по масштабам систем неминуемо предполагает полное и последовательное кинетическое рассмотрение и классификацию возможных типов поведения. Даже при беглом взгляде ясно, что процесс на каждом уровне может быть по крайней мере трех типов — стабилизирующийся, колебательный и нарастающий. Так как уровней два, то минимальное число возможностей — девять. Реально их значительно больше, так как, например, колебательные режимы могут быть периодическими (одночастотными) и многочастотными — каждый со своими качественными особенностями.

Совсем другой, если можно так выразиться, кибернетический, системный, классификационный характер имеет задача описания всей цепочки в целом. Здесь достаточно составления «списка» типов связи соседних звеньев. Кинетические же вопросы следует считать включенными в характеристику типа связи.

Очень важно подчеркнуть, что система, приходящая в равновесие на некотором уровне, вполне может оказаться колебательной и даже неустойчивой на больших масштабах времени. Никакой связи между типами поведения на разных уровнях, вообще говоря, нет. Так, например, газ, уравнившийся и удовлетворяющий второму началу термодинамики, вполне может быть рабочим телом в паровой машине, совершающей механическую работу. Никакого противоречия здесь нет, так как время релаксации для газа измеряется ничтожными долями миллисекунды, а механические движения разыгрываются в масштабах секунд.

Кинетика и структура. Вопрос о поведении систем во времени, изучение кинетики имеет большое методологическое значение. Это значение определяется самим существом эволюционного учения. Если сущее не было создано актом творения в готовом виде, если оно возникало постепенно, то кинетика любой системы необходимо должна предшествовать ее структуре². Это несом-

² См. также статью автора «Возможная роль колебательных процессов в эволюции». — Труды Всесоюзного симпозиума по колебательным процессам в биологических и химических системах. М., 1967, стр. 274.

ненно так в плане эволюционном. Куда более интересно и важно, что воссоздание уже раз созданной структуры идет по тем же этапам, что и ее эволюционное возникновение.

В этом общий смысл известного тезиса о повторении в индивидуальном развитии развития эволюционного.

Однако это повторение не может быть только повторением. Нельзя, чтобы рождение каждого человека снова требовало полных трех миллиардов лет эволюции. Происходит головокружительное, в миллиарды раз, сокращение этапов, упрощение и укорочение извилистого эволюционного пути.

Одной из важнейших теоретических задач и является осознание на всех уровнях, с точки зрения любых подходов (в том числе и математического) общих принципов такого убыстрения, при котором не теряется достигнутый структурный уровень.

Можно думать, что понимание этих принципов является не только теоретической, но, вероятно, и практической, едва ли даже не технологической задачей.

СТРУКТУРНЫЕ УРОВНИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ

В качестве примера я хотел бы рассказать об одной попытке подойти с системных позиций к изучению различных уровней организации жизни на Земле, так сказать, интуитивно. До вчерашнего разговора строгих определений в сущности не было. В этой попытке я исходил из одного, теперь уже старого и, по моему, весьма умного положения Нильса Бора,— положения, которое стоит вспомнить, особенно биологам и особенно в наше время, когда модными являются лишь ДНК, а остальная биология остается как бы на задворках. Он говорил, что сейчас точность определяется не количеством математических формул на странице, а степенью строгости определения тех элементарных структур и явлений, которые характеризуют данную область исследования. При этом, разумеется, в разных случаях элементарные структуры и явления могут выступать в самых различных формах.

В свое время я имел удовольствие участвовать в дискуссиях в Копенгагене, и нам приходилось много спорить по биологическим проблемам. И вот мы попробовали положить в основу рассмотрения жизни на Земле следующую точку зрения. Совершенно ясно, что жизнь на нашей планете — явление чрезвычайно комплексное. При этом, в отличие от тех явлений, с которыми имеют дело физики и отчасти химики, жизнь в качестве основной характеристики обладает способностью идентичного самовоспроизведения, которое можно назвать ауторепродукцией или *конвариантной редупликацией*. Это ведет к неизбежности протекания эволюционного процесса.

Отметим, что эта любопытная установка обсуждалась на боровском коллоквиуме еще в тридцатых годах, когда не было молекулярной генетики в современном смысле слова, но было ясно, что в основе всех явлений жизни лежат какие-то макромолекулы, центральные управляющие системы, обладающие этим замечательным свойством — конвариантной редупликацией. Неизбеж-

ность эволюционного процесса как характеристика жизни вытекает отсюда просто потому, что если имеется какой-нибудь механизм конвариантной редупликации основных элементов, управляющих структурой, то должен действовать и всеобщий принцип, выражаемый поговоркой: «Ничто не вечно под луною». Любые структуры обладают не бесконечной, а конечной степенью стабильности, которая характеризуется в первом приближении периодом полуреакции, то есть тем временем, за которое половина соответствующих структур сделает реакцию первого порядка. Это зависит от энергии средней активации атомарной структуры в широком смысле слова — безразлично, будет ли это макромолекула, атом или что-либо иное. Важно, что это будет неделимый в данной системе элемент — физико-химическая единица.

Раз это так, то конвариантная редупликация необходимо приведет к отбору сначала тех макромолекулярных структур, которые в определенных условиях внешней среды, т. е. при наличии определенного стройматериала, будут обгонять другие в ауторепродукции. Так можно себе представить первые шаги естественного отбора. Затем, естественно, появляются структуры, более экономно обращающиеся со стройматериалом. С другой стороны, могут появиться структуры, использующие при конвариантной редупликации некоторые сорта стройматериалов, которые вначале не использовались, и процесс отбора начинает идти во все более расширяющемся объеме. Итак, там, где имеется конвариантная редупликация, то есть идентичное самовоспроизведение и изменчивость, связанная с принципом конечной стабильности любых структур, там начинает работать единственный, пожалуй, специфически биологический принцип — *принцип отбора*.

Помимо естественного отбора, с первых ступеней появления конвариантной редупликации в той же мере обязательен эволюционный прогресс. Были попытки сформулировать этот принцип более или менее строго, но большого успеха они не имели. Эволюционный прогресс неизбежно ведет к усложнению редуплицирующих структур, они приобретают молекулярные защиты, на основную редуплицирующуюся макромолекулу налипает панцирь из других молекул. Эволюция идет все дальше и в конце концов приводит к очень существенному шагу — половости.

Появление половости, т. е. некоего зародышевого пути, неизбежно при определенной степени усложнения самовоспроизводящихся структур. По-видимому, это часто, во всяком случае уже на начальных этапах эволюции, было связано с конъюгацией, ведущей в конечном итоге к двуполовости. Первоначально, очевидно, была многополовость (этот вопрос интересно освещен Максом Гартманом), но победителями в борьбе за жизнь явились двуполовые организмы.

Произошедшая дифференциация с необходимостью повысила степень связей биотической среды с абиотической средой; по мере

дивергенции, естественно, увеличивалась специализация в использовании биотическими элементами условий и материалов абиотической среды обитания. По-видимому, вся эволюция шла, о чем иногда забывают биологи, не просто в виде изолированного процесса под влиянием отбора — эволюционирование лошадей, слонов, человека и т. п., а в виде чрезвычайно комплексного процесса, протекающего для каждого вида в сложнейшем комплексе абиотических и биотических условий, на фоне комплексного использования всей абиотической среды, включающей и продукты распада, трупы живых организмов и т. д., и, конечно, на фоне конкуренции в живой природе.

Так в самых общих чертах приходится себе представлять протекание эволюционного процесса. Отсюда следует то, что мы — подойдя интуитивно, без соответствующих сложных философских рассуждений, к системному подходу — назвали *уровнями биологических систем*. Жизнь, существующая на планете, должна изучаться на разных уровнях ввиду чрезвычайной ее сложности.

Я в свое время выделил (и до сих пор продолжаю придерживаться этой точки зрения) четыре основных уровня: *молекулярно-генетический, онтогенетический, популяционный и биогеоценотический*.

На молекулярно-генетическом уровне функционируют центральные макромолекулярные управляющие системы, которые, используя матричный принцип, обладают способностью к конвариантной редупликации. Какова конкретная форма этих структур — для нас сейчас безразлично. Важно, что эти центральные управляющие системы являются в данной связи неделимыми дальше, т. е. элементарными структурами; основные же элементарные (для данного уровня) явления связаны с функционированием этих структур, с кодом наследственной информации, передаваемой от клеточного поколения к клеточному поколению. Так говорить точнее, чем «от поколения к поколению», потому что в любых условиях этот процесс осуществляется через клеточное поколение. С точки зрения системы кодов наследственной информации можно рассматривать и изучать жизнь на Земле. Таков первый уровень.

Далее. В процессе эволюции образовалось огромное количество биологических видов. *Видами* мы называем дискретные морфофизиологические группы индивидов и географо-экологических форм, обладающие общими признаками и определенным ареалом распространения, потенциально способные скрещиваться друг с другом и перемешиваться, но в природных условиях полностью или почти полностью биологически изолированные от других таких же групп. Так вот, видам многоклеточных присуще замечательное биологическое явление — сложный *онтогенез*. Здесь следует вспомнить, что у всех многоклеточных половых организмов индивид, т. е. поколение отделено от следующего поколения

стадией одной клетки — оплодотворенной клетки зиготы. И в одной этой клетке содержится все то, что заставляет ее проходить все необходимые этапы индивидуального развития — разумеется, лишь при наличии условий, при которых данный вид сохраняет жизнеспособность.

Курица всегда производит цыплят, корова — телят, свинья — поросят; и никакими воздействиями нельзя заставить свинью рожать телят, а корову — поросят. Это значит, что видово-специфический тип онтогенеза зафиксирован в этой одной клетке, которая несет в себе код наследственной информации, передаваемой из поколения в поколение. Еще в конце XIX в. цитологические исследования показали, что хотя полю равноправны в наследственности, у целого ряда живых организмов практически в создании зиготы с мужской стороны участвует лишь этот код наследственной информации (форма набора хромосом), потому что головки многих сперм являются просто концентратом хромосомного набора, покрытым тонкой пленкой, а шейка и хвостик обычно остаются вне оплодотворяемого яйца.

Проблему онтогенеза я позволю себе кратко сформулировать следующим образом: почему в развивающейся зиготе, а затем в зародыше в должное время в должном месте происходит должное? И для объяснения этого замечательного обстоятельства — я это утверждаю со всей ответственностью — не существует никакой разумной теории. Некоторые пробовали мне возражать, ссылаясь на созданную А. Гурвичем теорию эмбриональных полей. Известно, однако, что прошло 30 лет, и ничего из этого не последовало. Это даже не гипотеза, а просто точка зрения, так как никому не удалось эту точку зрения превратить хотя бы в плохонькую рабочую гипотезу, на основании которой можно было бы ставить проверочные эксперименты и развивать ее дальше.

По моему мнению, для построения в предвидимом будущем общей теории онтогенеза необходимо знание не только структуры и изменений генов, но и принципов их работы и — в системном смысле — взаимосвязей в процессе этой работы. Я думаю, что тут, говоря на языке кибернетики, будут открыты некоторые иерархические принципы, поскольку для строгого описания, а затем и объяснения онтогенеза нужно понять иерархию управляющих систем. А эта проблема недостаточно разработана и в общей кибернетике.

В направлении изучения работы генов и их взаимосвязей на начальной стадии онтогенеза мы кое-что начинаем понимать относительно фагов, вирусов и некоторых простейших бактерий. В работах ряда исследователей, особенно зарубежных, это трактуется в качестве твердо установленных истин. Но при этом часто забывают, что в молекулярной генетике существует пропасть между исследованиями до- и внеклеточных структур — вирусов, фагов и некоторых бактерий — и изучением настоящих клеточ-

ных организмов, которые образовались в процессе эволюции и одержали своего рода победу в эволюционном прогрессе. В частности, не решена проблема хромосомной конъюгации в мейозе, поскольку неясно, какие реальные физические силы здесь участвуют. Это интереснейшая общая проблема и в то же время фундаментальнейшая биологическая проблема.

Итак, онтогенез — индивидуальное развитие, развернутая потенция кода наследственной информации, передаваемой из поколения в поколение — дает грандиозную, подчас очень цветастую картину сложных и весьма совершенных, а иногда до чудного специализированных многоклеточных организмов. Ввиду отсутствия общей теории онтогенеза мы пока не можем точно указать основные элементарные структурные явления на этом уровне. Можно лишь интуитивно догадываться, что это какие-то подразделения кода наследственной информации и его работа (или отсутствие таковой) в процессе протекания онтогенеза. Весьма примечательно, что у любого многоклеточного организма все клетки являются дериватами той же одной клетки зиготы, т. е. исходно генетически идентичны и в течение достаточно долгого времени содержат набор генов, а вместе с тем эти гены иерархически во времени то работают, то не работают. Это обстоятельство мы пока не можем объяснить. Есть опять-таки точка зрения, но нет рабочей гипотезы, которую можно было бы экспериментально применить и проверить.

Мы знаем, что реально вся поверхность нашей планеты — и вода, и суша — насыщена жизнью. По выражению В. И. Вернадского, жизнь на Земле обладает «всюдностью». Действительно, даже в районах вечных снегов и льдов (в Арктике, Антарктиде, на горных вершинах и т. п.) встречаются низшие бактерии, низшие грибы и низшие водоросли. Но при этом жизнь распределена очень неравномерной пленкой, ибо не всякое место Земли может прокормить одинаковое количество живых организмов. Этим объясняется мозаичное распределение по планете плотностей живого вещества.

И при этом характерно, что вся эволюция у половых многоклеточных организмов пошла по пути видообразования. Недаром Дарвин назвал свою книгу «Происхождение видов», а не просто «Эволюция». Вид является маркантной вехой в протекании эволюции, и вот почему. Для эволюции, по-видимому, выгодна половость, лежащая в основе любой селекции (и естественного, и искусственного отбора). Но если бы не было видов в той форме, в какой они существуют, то жизнь не много бы выиграла от одного из своих основных свойств — *дискретности*.

Свойство дискретности должно быть обязательно введено в элементарное определение жизни. В качестве грубого примера можно сказать, что жизнь покрывает земной шар не в виде клея или киселя, а существует в форме дискретных макромолекулярных

образований — вплоть до больших многоклеточных образований, которые представлены опять-таки дискретными индивидами. Но если бы не было видов в той форме, как они на самом деле существуют, то эволюция недалеко ушла бы от этого киселя, потому что безграничное скрещивание и неизбежное перемешивание приводили бы к нивелировке различий, достигнутых индивидами и группами индивидов. Эволюционно это было бы невыгодно. В связи с этим в эволюции сформировалась половость и выделились формы, которые — подчеркиваем, в природных условиях — теряют способность свободно скрещиваться и перемешиваться с исходными формами. Их мы и называем видами. Это позволяет форме, эволюционирующей в определенном направлении, наконец приобрести самостоятельность, перейти, так сказать, из детского возраста во взрослый и начать жить своей жизнью.

Виды, благодаря отсутствию скрещивания и перемешивания между разными видами, приобретают возможность дальнейшего эволюционного эмансипирования от ближайших соседей, возможность идти своим эволюционным путем. При этом возникает межвидовой отбор. У нас в биологии был недавно любопытный период, когда разрешалось говорить лишь о межвидовом, а не о внутривидовом отборе. При этом забывали, что межвидовой отбор мог появиться только после того, как возникли виды, возникла видовая изоляция, и что эволюция всегда идет путем внутривидового отбора, конкуренции между особями; а потом, когда в процессе эволюции появляются такие конгрегации — виды, которые генетически изолированы от исходных и соседних, тогда появляется межвидовая конкуренция и сотрудничество, кооперация. Еще со времен Кропоткина, написавшего замечательную книгу «Взаимопомощь как фактор в борьбе за существование», известно, что борьбу за существование, конкуренцию и отбор нельзя понимать грубо: дескать, несется заяц, удирает от волка, а волк, открыв пасть, несется за зайцем; и тут происходит отбор — либо заяц удирает благодаря своим длинным ногам, либо волк благодаря отверстой пасти и тоже длинным ногам его нагонит. Отбор — чрезвычайно комплексный, тончайший механизм, который работает и с помощью борьбы, и с помощью кооперации. Это касается и межвидового отбора, который возникает с появлением видов, не смешивающихся и не нейтрализующих взаимно достигнутых эволюционных отличительных признаков.

Возникает вопрос: что можно считать элементарными эволюционными структурами? Кажалось бы, индивиды и есть элементарные эволюционные структуры, подлежащие эволюции. Но ясно, что не только для людей, но и для любого полового организма положение Робинзона Крузо на необитаемом острове прекращает всякую эволюцию. Во-первых, для этого нужны

Робинзон и Робинзонша; во-вторых, в силу марковского закона они — либо мужчина, либо женщина — непременно сфлуктуируют к нулю, и опять эволюция будет невозможна. Следовательно, для осуществления эволюции нужны какие-то достаточно большие группы, у которых была бы достаточно мала вероятность сфлуктуировать к нулю. Для любой варьирующей системы, скажем, вариации численности какой-то популяции или группы индивидов, равновозможны флуктуации от нуля до бесконечности. Но как только эта вариация сфлуктуирует к нулю (а для половых организмов достаточно, чтобы сфлуктуировал к нулю лишь один из полов) — эволюция прекратится. Следовательно, элементарными эволюционными структурами должны быть какие-то группы организмов, взаимодействующих эволюционно и генетически.

Помимо этого, огромное число наблюдений позволило выявить еще одно замечательное свойство жизни: все виды живых организмов занимают на поверхности Земли определенные ареалы распространения, но индивиды любого вида никогда не распределяются равномерно в пределах своего ареала. Многие виды в пределах ареала образуют территориально разобщенные группы разного размера — вспомните березовые колки западносибирской лесостепи или осиновые островки в европейской лесостепи. Но далеко не всегда организмы разделены на такие группы. Иногда просто количественно варьирует густота заселения ареала — места скопления особей разделены менее густо населенными пространствами.

Теперь можно сформулировать следующее положение: все живые организмы на Земле реально, в пределах видového ареала, образуют *популяции*, если популяцию определить как совокупность индивидов, населяющих в достаточном количестве определенную территорию или акваторию, в пределах которой этими индивидами осуществляется та или иная степень панмиксии, то есть свободного и случайного скрещивания и перемешивания. Отделение же группы индивидов от других таких же индивидов происходит вследствие давления или изоляции. Изоляция — явление количественное, она может варьировать от нуля до ста процентов. Следовательно, популяции могут быть сильно или слабо изолированными друг от друга.

Внутри вида между соседними, а иногда и довольно удаленными друг от друга популяциями всегда в той или иной мере осуществляется перемешивание — в результате миграций, «волн жизни», флуктуаций численности, флуктуации ареалов распространения отдельных популяций и т. д. Вот эти популяции и являются элементарными эволюционными структурами, далее неделимыми в данной системе. С популяциями связаны элементарные эволюционные явления, без которых не может мыслиться протекание эволюционного процесса. Таким *элементарным эволюционным явлением* можно считать более или менее долгосрочное изме-

нение генотипического состава отдельной популяции в пределах вида.

Итак, популяция — это достаточное число индивидов, достаточно длительное время населяющих данную территорию или акваторию. Слово «достаточно» я намеренно не употребляю в каких-либо абсолютных масштабах, потому что это зависит от специфики вида, условий его существования и т. п. Например, достаточное время, по-видимому, следует понимать как относительно большое число поколений. У одних организмов число поколений может быть соразмерно числу лет, а у быстро размножающихся организмов, у той же дрозофилы, при благоприятных климатических условиях за год может появиться 15—20 поколений. Так что здесь важно не время вообще, а биологическое время, о котором вчера уже упоминал Александр Александрович Малиновский. И с точки зрения марковского закона достаточное число индивидов есть такое число, которое не обладает слишком высокой вероятностью быстро сфлуктуировать к нулю.

Между прочим, меня всегда поражало то обстоятельство, что взрослые люди с высшим образованием всерьез интересовались не только знаменитыми летающими тарелками, но и пресловутым «снежным человеком». Но ведь если бы даже с конца третичного, с начала четвертичного периода в Гималаях некоторое время и сохранились бы какие-то «снежные люди», они в силу марковского закона давно бы сфлуктуировали к нулю, и вся эта история кончилась. Малые группы индивидов не могут существовать практически бесконечно долго, то есть на протяжении очень многих поколений.

Таким образом, популяции, являющиеся элементарными единицами эволюции, должны быть достаточно численны и достаточно долговечны. Что же касается элементарного эволюционного явления, то надо сказать, что у всех половых организмов все популяции, как правило, генетически гетерогенны. Ведь генетически гомогенны только свежие, чистые линии или клоны, но и те благодаря давлению мутационного процесса быстро становятся в той или иной мере гетерогенными. Поэтому генетически каждая популяция характеризуется какой-то смесью генотипов; часть из них в течение относительно долгого времени может находиться в состоянии определенного динамического равновесия — это мы называем внутрипопуляционным полиморфизмом. Другие появляются и исчезают в малых концентрациях. Некоторые смеси являются кандидатами в эволюционный процесс, некоторые повышают свою концентрацию, могут вытеснять исходные аллели, из которых они произошли. Итак, элементарное эволюционное явление — это достаточно стабильное по своей длительности (опять-таки в биологическом времени) изменение генотипического состава популяции. Это еще отнюдь не эволюция, но *conditio sine qua non* любого эволюционного процесса — ведь для того,

чтобы могла произойти какая бы то ни было эволюция, должен быть сделан первый шаг: изменение генотипического состава популяции.

Следовательно, вернусь к Нильсу Бору, на онтогенетическом уровне мы имеем пока слишком мало ответов, но на молекулярно-генетическом и на популяционном уровне мы уже можем достаточно строго сформулировать, что является элементарной структурой, что следует рассматривать в качестве элементарного явления, и поэтому можем точно оперировать с ними.

Для характеристики тех эволюционных процессов, которые протекают в пределах вида и ведут к видообразованию, я в конце 30-х годов предложил термин «микроэволюция» («микроэволюционные процессы»). Более «крупные» эволюционные явления мы можем назвать «макроэволюционными». Важно отметить, что в настоящее время область микроэволюционных явлений, как и сфера генетических явлений, допускает применение точных методов исследования, использование математического анализа. Кое-что в этом направлении уже сделано, особенно в работах С. С. Четверикова, Р. А. Фишера, Дж. Холдэна, С. Райта. Но они, как и ряд других ученых, заложили лишь основы математического анализа явлений микроэволюции, и сейчас приходится вновь возвращаться к освещению этих проблем с позиций современных достижений математики, чем, в частности, занимаются Т. Кимура в Японии, отчасти Ю. М. Свиричев, которому удалось уже получить довольно интересные результаты при математическом переосмыслении генетико-популяционных процессов.

Таким образом, я дошел до высшего, наиболее комплексного уровня. Все виды на Земле встречаются в форме рассмотренных выше популяций; но, кроме этого, для реальной жизни на нашей планете характерна еще одна общая закономерность — жизнь нигде, никогда не представлена моноспецифически. Самые малые участки земной поверхности, или водной толщи, или нижних слоев тропосферы всегда населены *сообществами* живых организмов. На основании имеющихся у нас данных о начальных этапах развития жизни на Земле можно утверждать, что уже и на этих этапах жизнь была представлена многими формами, и для эволюции типично взаимосвязанное изменение всех существующих в данное время форм, их координация. Это ведет к тому, что благодаря многочисленнейшим, отнюдь не только трофическим, связям между видами любой участок земной поверхности и водной толщи населен не просто некоторым множеством видов, а таким, которое образует более или менее сложный комплекс — биоценоз. Одним из примеров сравнительно бедных ценозов являются среднерусские сосновые леса. Среднерусский бор — стабильный комплекс, насчитывающий в зависимости от места расположения от двух с небольшим до трех тысяч видов (учитывая и население почвы). Есть еще более бедные — пустынные и арк-

тические ценозы. Есть бесконечно более богатые ценозы — тропические и субтропические.

И такое сложное строение имеет вся живая пленка нашей планеты — биосфера Земли. Это, если хотите, дискретная система, что объясняется общим свойством дискретности жизни. Однако, несмотря на такую сложность многовидового строения, биосфера обладает значительной степенью *стабильности*. Если исключить аварии как общеприродные, так и связанные с деятельностью людей, нельзя не поражаться удивительной стабильности этих сложных комплексов жизни в различных участках биосферы. У нас есть два пути определения степени этой стабильности. Долгое время единственным источником здесь оставались исторические, летописные данные, которые позволяли сделать вывод о том, что некоторые ценозы, например леса Европы, сохранялись в том виде, в каком они и сейчас нам являются, в течение двух, иногда трех тысяч лет. В настоящее время мы располагаем значительно более точным и мощным методом пыльцевого анализа. Дело в том, что строение пыльцевых зерен в очень высоком проценте даже не родово-, а видо-специфично. Кроме того, пыльца обладает превосходной способностью сохраняться. В ряде торфяных, почвенных, подпочвенных, глинистых отложений и донных отложений водоемов вся пыльца может сохраняться тысячи, десятки и сотни тысяч, иногда до двух миллионов лет. Благодаря этим обстоятельствам методом пыльцевого анализа различных наслоений определенного района можно с очень большой точностью, даже количественно, учитывая относительное количество пыльцы того или иного вида, восстановить прежние фитоценозы, населявшие данный район. Особенно это удобно в отношении древесных, кустарных пород. Было показано, что там, где не было последних ледниковых периодов, в течение очень длительного времени — десятков и сотен тысяч лет — лесные и нелесные ценозы сохранялись в том виде, в каком мы их знаем сейчас.

Помимо этого, по времени появления пыльцы определенного вида и по темпам послыного изменения структуры пыльцы в некоторых случаях можно судить о темпах эволюции. Этот метод еще недостаточно разработан, им преимущественно пользуются практики, биологи же — в меньшей степени. Отчасти их можно понять — ведь нужно сидеть восемь часов в день за микроскопом, и так изо дня в день, из месяца в месяц, из года в год. Действительно, это очень трудоемкая работа, но она в предвидимом будущем обещает интереснейшие результаты. И недаром замечательный человек и биолог В. Н. Сукачев создал и до конца своих дней возглавлял Пыльцевую комиссию при Академии наук.

Вторая особенность биосферы — ее *мозаичность*. Как вид в известной степени разбит на дискретные единицы популяции, так и биосфера в известной мере разбита на дискретные регионы, внешне отличающиеся по типу населяющих эти регионы сооб-

шесть. Каждый знает сосновый, дубовый, березовый лес, болото, луг и прочее. Но при ближайшем рассмотрении это разбивается, становится тоньше, подробнее — и оказывается, что вся биосфера разбита на то, что В. Н. Сукачев предложил назвать *биогеоценозом*; это — некий комплекс биотических и абиотических единиц, факторов и предметов, так или иначе отграниченных от соседних комплексов, причем границы могут быть почвенными, микроклиматическими, стоковыми (что очень важно, так как вектора стока определяют геохимические свойства территории) и, наконец, биоценотическими — по границам соответствующих биоценозов, ассоциаций живых организмов, которые населяют данный регион. Биогеоценозы могут быть большими или малыми; одни из них явно и удобно для нас отграничены от соседей, другие отграничены неявно, некоторые границы мы можем не найти, но ясно следующее: в общей биосфере Земли мы можем выделить свои специфические элементарные единицы — биогеоценозы, и соответственно элементарным явлением будет работа отдельных биогеоценозов и их изменения.

Дело в том, что в биосфере Земли протекает колоссальная работа геохимического типа, которая образует гигантский биологический круговорот в масштабах всего земного шара, состоящий из отдельных круговоротов. Биогеоценозы же являются элементарными ячейками этой биогеохимической работы биосферы, так как каждый биогеоценоз, по определению, в известной степени обладает своим замкнутым круговоротом, конечно, замкнутым относительно. Соседние биогеоценозы связаны друг с другом через атмосферу, через стоки и т. п. Вещественный и энергетический круговороты биогеоценозов взаимосвязаны и образуют гигантский круговорот биосферы Земли. Через систему стоков продукты этого круговорота попадают в мировой океан, являющийся базисом эрозии, и при поднятии океанического дна выступают в виде осадочных горных пород.

Выделение элементарных явлений на уровне биосферы в целом позволяет и здесь достаточно точно и строго применять системный подход — в том же смысле, как мы можем применять его к изучению микроэволюционных процессов. Правда, пока мы здесь сталкиваемся со значительными трудностями из-за недостатка эмпирического материала, что отчасти объясняется той нестрогостью в определении понятий и терминов, которая вчера была предметом столь горячего спора. Материал собирать чрезвычайно трудно ввиду полной словесной и терминологической неразберихи в области биогеографии, геоботаники и т. д. Перед тем, как классифицировать имеющийся материал, нужно проделать тщательные филологические изыскания, чтобы уяснить себе, что именно подразумевает автор под таким-то словом. Поэтому я и настаивал на том, чтобы в нашей работе договориться о единстве терминологии.

Вот, собственно, все, что я хотел вам сообщить. Мне кажется, что в плане системного подхода можно подходить к изучению жизни и рассмотренным выше образом, подразделяя систему на разные уровни, применяя понятие системы к изучению уровней. Теперь стало модным говорить об уровнях, но в 40-х годах я был одним из первых, начавших этот разговор; поэтому я позволю себе сказать следующее. Четыре уровня, которые я вам кратко описал, выделены с точки зрения общего изучения организации жизни на нашей планете. Можно, конечно, говорить о гистологическом уровне, о кровяном, о кардиологическом — о каком угодно, но только не с этой точки зрения. Мне кажется, в этом опять-таки заключена одна из возможностей целесообразного подхода к изучаемым явлениям с системной точки зрения: применение системного подхода сразу же выдвигает перед исследователем требование определить, к чему он прилагается и для чего. Иначе он становится довольно бессодержательным. Поэтому в биологии нужно применять системный подход либо с очень общей точки зрения, скажем общих принципов организации земной жизни, либо с точки зрения, позволяющей специфически подойти к определенному кругу явлений. Сейчас для биологов наиболее важна реальная конкретная работа, накопление большого материала для дальнейших обобщений. Но такие общие рассуждения, как наши, если они ведутся при соблюдении необходимых требований, помогают накапливать и нарабатывать этот материал более или менее разумно.

Ответы на вопросы

Я. И. Старобогатов. Николай Владимирович, у меня к Вам два вопроса, правда, несколько частных. Первый вопрос касается популяционного уровня. Организмы, не имеющие нормального полового процесса, составляют, конечно, исключение из общего числа организмов. Но как с ними быть? Что является у них элементарной единицей, элементарным процессом?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Позвольте сразу ответить на первый вопрос. Я должен честно сказать — не знаю. В отличие от К. М. Завадского и Р. Л. Берг, я совершенно намеренно пока даже не думал о понятии вида для неполовых организмов. Там возникают трудности чисто морфофизиологического определения видов. Это нечто принципиально иное, чем та видовая грань, о которой мы говорили. И то же самое, естественно, относится и к популяции.

Я. И. Старобогатов. В порядке продолжения вопроса — может быть, тогда имеет смысл считать здесь элементарной единицей нечто аналогичное популяции (с необходимыми оговорками), некоторое множество особей, достаточно большое, чтобы оно не сфлукутировало к нулю.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Да, при этом я совершенно согласен с попытками Р. Л. Берг. Это множество особей можно даже несколько точнее определить как такую совокупность организмов, о которой Вы говорите, и в то же время обладающую некоторым единым принципом отношения к окружению, то есть к сумме биотических и абиотических условий.

Я. И. Старобогатов. Второй вопрос таков. Если я Вас правильно понял, Вы вовсе не исключаете возможность применения системного подхода при решении совершенно конкретных задач более частного характера, например, когда мы рассматриваем данный биогеоценоз как систему некоторых более простых биогеоценозов, при условии, что такая постановка вопроса сулит нам важное для биологии конкретное решение, хотя и в пределах лишь этой задачи.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. По-моему, системный подход может быть приложен к чему угодно — вплоть до спичечной коробки. Не нужно только терять, как вчера говорил А. А. Малиновский, прагматический критерий применения, т. е. нужно четко сформулировать, для чего и почему применяется системный подход к такому-то комплексу явлений. При этом нужно очень аккуратно относиться к терминам. Если Вы хотите строить систему биогеоценоза и его подразделять, то назовите его подразделения иным словом, чем «биогеоценоз», иначе произойдет большая путаница.

Г. А. Викторов. Если коротко сформулировать, в чем специфика системного подхода — это выделение системы и ее изучение?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Совершенно верно. Я это назвал уровнями и структурами. Вчера мы договорились, что уровни и структуры — понятия более частные, определяющие свойства и отношения внутри системы. Вчера Л. А. Блюменфельд прекрасно сформулировал определение системы. Я берусь подвести под это определение понятия уровня и структуры организации жизни на Земле.

К. М. Хайлов. Каковы характерные времена для выделенных Вами уровней? Скажем, молекулярно-генетический уровень — это около секунды, или доли секунды, или часы?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. От долей секунды до (приблизительно) 2 млрд. лет, если Вы интересуетесь судьбой эволюционных изменений определенного участка управляющей системы кода наследственной информации. Ведь гены существуют с момента возникновения жизни. Мы должны либо признать непрерывность этой цепи, либо допустить какую-то периодичность, т. е. вернуться к теории катастроф.

К. М. Хайлов. Каково характерное время для онтогенетического уровня?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. От десятков минут до 5 тыс. лет. Этот возраст имело самое старое мамонтово дерево.

К. М. Хайлов. Меня интересуют некоторые глобальные цифры. Дальше — уровень популяционный.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Если Вы хотите узнать временные границы того, что происходит на популяционном уровне, возьмите нижние границы — минимальная продолжительность одного поколения зависит от того, какой организм мы берем. Например, у некоторых микроорганизмов — полчаса. Значит, от десятков минут до тысячелетий. Некоторые популяционные процессы протекают очень медленно (скажем, знаменитый моллюск лингула за последние 300 млн. лет почти не изменился, по крайней мере, в отношении тех свойств, о которых мы можем судить по сохранившимся остаткам).

К. М. Хайлов. И, наконец, биогеоценоз — это сотни тысяч лет?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Опять от десятков лет до десятков тысяч лет.

В. Н. Садовский. Может быть, Вы сочтете возможным несколько расширить свое понимание системного подхода в биологии, который, по-видимому, не сводится к одному лишь определению системы, каким бы удачным оно ни было. Когда идет речь, допустим, о выделенных здесь четырех уровнях, то, очевидно, предполагается наличие какой-то совокупности специфических методов, которые базируются на понятии системы, дополняют это понятие и в какой-то степени отличаются от других методов. В частности, Александр Александрович вчера предлагал один из способов системного анализа — структурный подход: когда имеется несколько структур различной конкретной реализации, то можно установить некоторые общие закономерности. Здесь возникает вопрос о специфическом языке, на котором мы можем сформулировать эти закономерности. Но этот способ структурного анализа вряд ли покрывает системный подход в целом.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Системным подходом в общем виде заниматься мне не приходилось. Это скорее дело математиков. Я могу высказать точку зрения в отношении биологии и биологического материала, который мне знаком. Мне показалось, что в своих рассуждениях об уровнях организации и изучении жизни на Земле я интуитивно подошел к тому, что носит название системного подхода. Если это так — я рад, если нет — я не очень расстроюсь.

Исходя из вчерашнего доклада А. А. Малиновского, я поставил следующий вопрос: какова разница между структурой и системой? Я понял, что Александр Александрович считает разумным применять системный подход в тех случаях, когда начинается хотя бы структурный анализ, избранный для изучения системы. При этом понятие системы необходимо терминологически как-то отграничить от понятия структуры, что Л. А. Блюменфельд и сделал. Прибавлю, что мне интересно заниматься такими системами, в которых можно вычленишь типичные для

данной системы (исходя из ее определения) элементарные структуры и явления, далее неподразделимые в пределах данной системы, избранной для изучения. Из этого вовсе не следует, что они должны быть представлены элементарными физическими частицами. В генетике такой элементарной структурой является ген, а не полуген. В онтогенезе — мне пока неизвестно, что является элементарной структурой и элементарным явлением, в эволюционном плане — популяция и то, что с ней происходит, в плане биосферы в целом — биогеоценоз и то, что с ним происходит. Здесь открываются интересные области работы. Например, относительно популяции и биогеоценоза возникает одна и та же основная проблема: изучение условий стабильности и нарушений стабильности или, точнее, — равновесия и нарушений равновесия, построение соответствующих математических, а в дальнейшем — машинных моделей. Это позволит быстро работать.

В этих областях любое эмпирическое экспериментальное или описательное исследование очень трудоемко и требует огромного времени. Если для определенных характеристик этих дискретных систем будут выработаны такие математические модели, которые могут быть легко и достаточно точно запрограммированы, то можно будет проводить машинные эксперименты, менять исходные параметры, определять граничные состояния для любых исходных параметров этих систем. Это позволит очень быстро накопить эмпирический материал, который потом просто нужно будет сравнительным методом проверять на природных ситуациях.

Мне кажется, что ни один метод, ни одну идею, ни один подход не следует подвергать инфляции. И системный подход, по-моему, целесообразен в тех случаях, когда можно сформулировать подлежащую изучению, но еще не изученную структуру и систему, в которой можно выделить далее неделимые элементарные структурные единицы, с которыми что-то может происходить.

Э. Г. Юдин. Как Вы представляете себе возможность и необходимость теоретической взаимосвязи уровней, о которых Вы говорили? Существует ли такая проблема — увязать эти уровни в единой теоретической картине для каких-то надобностей?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Конечно, существует. Ведь жизнь на нашей планете монолитна во всех смыслах — временном и каком угодно ином. Наши гены — непосредственные потомки первых генов на Земле. Следовательно, все уровни связаны. Но поскольку на разных уровнях организации имеются различные типы элементарных структур, работающих в том плане и смысле, в каком изучается данный уровень структуры или системы, то они и подлежат раздельному изучению.

Я, например, уверен в том, что когда мы будем в состоянии разработать действительно достаточные математические модели для каждого из четырех уровней, естественно возникнет интересная задача, в том числе математическая, — увязать эти модели.

Они, несомненно, имеют связь друг с другом. Тогда возникнет, по-моему, системный подход опять совершенно иного уровня, который сейчас не осмыслен ввиду недостаточности знаний по этим четырем отдельным уровням.

Э. Г. Юдин. Второй вопрос я сформулирую более развернуто. Известно, что когда пытаются как-то классифицировать или типологизировать живую природу в целом, то при этом исходят из разных соображений. Скажем, в одном случае в основание расчленения живой природы кладут различие подходов: говорят, что мы можем выделить физический, химический, биологический уровни и соответственно этому строить классификацию. В других случаях в той или иной модификации говорят уже о биологическом уровне в собственном смысле слова. Ваш сегодняшний рассказ — яркий пример классификации такого рода. Третий случай представил нам вчера А. А. Малиновский, который исходит из несколько иного принципа, когда, схематически говоря, пытаются в основание возможных расчленений или выделения каких-то более или менее крупных, более или менее абстрактных типов систем положить представление о связях, специфических для соответствующих типов. Скажем, Александр Александрович делит системы на жесткие и корпускулярные. Как, с Вашей точки зрения, можно соотнести между собой такие существенно различающиеся подходы к биологической системе (причем все они могут быть уложены в определение Л. А. Блюменфельда)?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Отчасти на этот вопрос я уже ответил. Можно, конечно, с любой точки зрения подходить к выбору системы, в пределах которой хочется работать. Единственным условием является разумность такого выбора. Но это зависит от личных вкусов, таланта, наличия материала и т. п. От самих систем, как мне кажется, в какой-то абстрактной форме не зависит, так как системы имеют много параметров.

Можно, конечно, подразделять системы на жесткие, мягкие, дискретные, но я не вижу в этом особенного смысла. Мне кажется, что систему следует выбирать не с этой точки зрения, а работать в определенном направлении с какой-то практической надобностью. Например, в мягких системах, если мягкими системами назвать биологический материал, мы всегда имеем комбинацию жестких и дискретных систем. У нас в организме имеется несколько систем. Имеется кровь, которую целесообразно рассматривать как дискретную систему, есть скелет, который, по-видимому, целесообразно рассматривать в качестве жесткой системы, и т. д. Но мне кажется, что такого рода общие рассуждения осмысленны до тех пор, пока не накапливается материал, показывающий круг явлений, к которым системный подход приложим разумно и плодотворно. Может быть, я ошибаюсь, и в действительности имеется какая-то математика, показывающая, подобно теории чисел, что

системный подход свойствен всему человечеству и лежит в основе всякого разумного мышления, но мне кажется, что пока системный подход имеет смысл лишь там, где он нужен.

Я считаю, что в науке полезно правило экономии — никогда не следует делать то, что с успехом можно не делать. Англичане, как известно, пользуются следующей короткой формулой: в науке никогда не следует делать то, что все равно сделают немцы. Поэтому англичане делают хорошую науку.

Я. И. Старобогатов. Мне хочется задать еще один вопрос. По-видимому, все мы согласились, что один из компонентов системного подхода — наличие критериев выделения первичных элементов данной системы, далее неделимых. В этой связи мне хотелось бы услышать Ваш ответ на вопрос, который дискутируется в литературе, начиная чуть ли не с Менделя. Вопрос может формулироваться абстрактно и конкретно, но я его формулирую на конкретном примере. В водах, омывающих Антарктический материк, вполне четко характеризуемых гидрохимически и гидрологически, живет планктон — растительный и животный. Планктон и водная масса образуют в целом единый биогеоценоз. Немного дальше по широте от Антарктиды, в водах западного дрейфа имеется тоже своя водная масса, свой планктон и свой биогеоценоз. Тут, следовательно, два биогеоценоза. Имеются киты, причем одни и те же особи питаются то здесь, то там. Куда относятся киты?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Они относятся к обоим биогеоценозам — в мере своего биогеохимического участия в том и другом. Таких видов много среди крупных млекопитающих, среди птиц, которые не являются биогеоценозически образующими. Нечто подобное мы имеем и в биоценологии — в различных типах фитоценозов могут встречаться одни и те же виды.

Выступления

В. И. Кремьянский. Прежде всего, мне хотелось бы напомнить об одной модели общего и специфического во взаимоотношениях систем различных структурных уровней. Ее однажды предложил А. А. Малиновский; к сожалению, она осталась неопубликованной. Представьте себе пирамиду, перевернутую вершиной вниз. Ее узловые сечения — это структурные уровни, а ее грани — это те аналогии, которые нужно и возможно выявить. Кроме того, можно было бы показать стрелками взаимодействия и взаимосвязи между уровнями. В самом деле, молекулы могут влиять на клетку и даже на самый сложный многоклеточный организм. А популяция влияет на эти молекулы. Правда, это не прямые взаимосвязи, тут имеют место преимущественно косвенные влияния, посредством отбора. В живой природе (в отличие от общества)

пока не найдены возможности прямого влияния со стороны систем высоких уровней на нижний. Видимо, такое влияние со стороны верхнего уровня на нижний в живой природе может быть только косвенным, лишь посредством естественного отбора или, как мне кажется лучше говорить, естественной селекции.

Затем вопрос к математикам. Быть может, стоит попытаться найти единый принцип, который позволил бы подойти к ответу на вопрос, звучащий, правда, несколько наивно: а почему, собственно, существуют системы как дискретные образования? Почему в системах существует дискретность их подсистем и элементов? Понятие дискретности системы как целого, ее отграниченности, обособленности от других систем, часто не осознанное и лишнее обоснования, неявно включено и в самое общее понятие системы. Почему же материя существует главным образом в виде каких-то серий, групп, дискретных образований, систем?

Кстати, надо сделать небольшое добавление к тому, о чем я вчера говорил. Понятие системы отличается от общего понятия множества не только тем, что отображает какие-то взаимосвязи, но еще и потому, что материальная система представляет собой совокупность элементов, которые обязательно существуют вместе. Этим понятие системы, мне кажется, отличается и от понятия группы как частично упорядоченного (какой-то связью или каким-то соотношением) множества, выделяемого нередко просто по условному соглашению. Напротив, реальная совместность существования элементов — очень важный признак системы. Эта совместность обеспечивается не простой конденсацией, что имеет место, скажем, с молекулами газа, а такой конденсацией, которая делает достаточно значимыми возможные воздействия одних элементов на другие. Все отмеченные обстоятельства и дают, по моему мнению, искомый подход к ответу на вопрос — почему существуют системы. Ведь воздействия (и вообще взаимодействия) всегда имеют конечные скорости и оказывают значимые влияния — по крайней мере, порознь — только на конечных по дальности расстояниях. Я не говорю здесь об информационных взаимосвязях и взаимодействиях, присущих только высокоорганизованным системам. Информационные взаимодействия таких систем могут быть чрезвычайно дальнедействующими; но конечность скоростей взаимодействия имеет место и в этом случае.

Очень интересный пример отграниченности биологических систем вследствие дальности расстояний приводят зоологи, когда говорят об изоляции групп организмов посредством расстояния. Во многих случаях нет никаких естественных препятствий между популяциями; когда они населяют обширную равнину, они могут скрещиваться между собой. Но скрещивания осуществимы лишь между популяциями, не слишком удаленными друг от друга. Вот это ограничение дальности взаимодействий, не говоря уже о конечности их скоростей, и служит, как мне кажется, простой

реальной основой для существования систем как объектов, представляющих собой совокупность элементов, связанных совместностью существования в силу того, что между ними постоянно имеются значимые взаимодействия.

Принцип значимости взаимодействий и ограниченности этих взаимодействий в силу их конечности по скоростям и дальностям не вполне применим для того разделения систем на жесткие и дискретные, о котором говорил А. А. Малиновский. Мне кажется, что сформулированный им подход имеет не только субъективное, но и объективное значение. Это одна из особенностей тех отношений, которые мы находим в реально существующих системах. Сходные формы жестких и дискретных связей в системе, как отметил Александр Александрович, не вдаваясь в детали, наблюдаются на разных структурных уровнях. Это как бы одна из важных «граней» той пирамиды, о которой я говорил вначале.

В заключение сделаю одно терминологическое замечание. Когда мы говорим — кровеносная система, управляющая система и т. п., то можно упустить из виду, что это, в сущности, подсистемы. Ведь одно дело — система, существующая относительно самостоятельно (абсолютно самостоятельной системой является только вся вселенная, если вообще о ней можно говорить как о системе), и другое дело — подсистемы, которые дифференцируются и вычленяются внутри данной системы. И мне кажется, что дифференцировать термины «система» и «подсистема» (это довольно часто делается в литературе) нужно также и в дискуссиях.

Та дискретность в пределах системы, о которой говорил А. А. Малиновский, несколько отличается по своим характеристикам от дискретности системы как целого. Те системы, которые дифференцируются и вычленяются, скажем, в организме, это не самостоятельно существующие системы, а именно подсистемы. Незачем много говорить о том, что для процесса управления, осуществляемого, например, в процессе биосинтеза первичной биохимической структуры белка, требуется целая совокупность сложных факторов. Тут и определенная группа ступенчато действующих ферментов, тут и катионы двух- и одновалентных щелочных металлов магния, кальция, калия; а кроме того, конечно, определенные субстраты и участие водной среды. Все это не могло бы обеспечиваться только самой «управляющей подсистемой», а обеспечивается и совокупностью элементов всей системы клетки как целого в ее взаимодействиях с определенной внешней средой.

И. В. Блауберг. Здесь прозвучала боязнь субъективизма при введении достаточно произвольных критериев для выделения систем.

Выясняя специфику системного подхода в современной науке, нужно иметь в виду, что у нас нет достаточных оснований считать системным исследованием всякое исследование сложного объекта. Изучением таких объектов (жизнь, общество, мышление

и т. п.) наука занималась фактически с самого своего возникновения. Если мы считаем системный подход каким-то новым способом подхода к объекту, то дело состоит не в том, что изменился сам объект, а в том, с какими новыми познавательными средствами мы обращаемся к изучению этого объекта. В этой связи я поддерживаю то определение системы, которое было предложено на вчерашнем заседании Л. А. Блюменфельдом. В самом объекте, который мы исследуем, еще нет оснований для суждений о том, является ли он системой или нет. Если мы подходим к нему со средствами системного анализа (которые наука начала разрабатывать совсем недавно), то осуществляем системное исследование, если же мы к тому же объекту подходим с несистемными средствами, то и результат будет иной — системной картины объекта мы не получим.

Поскольку у нас нет пока средств, позволяющих охватить сложный объект сразу, целиком, во всем многообразии его связей, то мы вынуждены прибегать к расчленению объекта, которое — как здесь уже говорилось — может производиться по самым различным основаниям. А раз так, то любая системная картина объекта, выражающая одно из возможных его расчленений, один снятый с него «срез», не может быть полной его картиной. Ее полнота может быть достигнута, по-видимому, лишь в результате очень сложных операций синтеза различных картин, различных системных представлений об одном и том же объекте; задача такого синтеза пока еще не имеет общего решения. Если же добавить, что каждое расчленение объекта производится на основе определенных научных, философских и иных предпосылок, т. е. обусловлено существующим уровнем культуры, то станет очевидным, что имеющиеся в научном знании системные представления в значительной мере зависят от исходной позиции исследователя, который строит эти представления. Разумеется, при этом весьма существенные параметры исследования задаются самим объектом, в частности, присущим ему типом целостности: воспроизведение в знании органичного целого даст совсем иную системную картину, чем отображение особенностей неорганичного целого. Но здесь всегда имеется вторая сторона — без исследователя, его позиций и конкретных задач, которые он ставит перед собой, системная картина не получится, в объекте самом по себе она не заложена. Поэтому я думаю, что в данной связи речь должна идти не о субъективизме, не о произвольности, а об активности познавательного процесса.

Г. А. Викторов. У меня вопрос к инициаторам этого совещания. Не найдете ли Вы возможным кратко сформулировать, в чем специфика системного подхода, каким арсеналом методов он пользуется и чем он отличается от простого изучения системы? В ходе дискуссии эти вопросы, как мне кажется, пока по полноте достаточного освещения.

В. Н. Садовский. Позвольте мне попытаться ответить на Ваш вопрос. Допустим, мы называем системой какой-то объект, пусть это будет кровеносная система или что-либо другое. При этом, изучая данный объект, мы практически не пользуемся тем определением, которое нам дал Л. А. Блюменфельд, — мы изучаем объект традиционными методами, сложившимися в биологии и вообще в естествознании. Такое исследование не является системным исследованием, даже с учетом того, что сам этот термин может иметь разный смысл, о чем говорит хотя бы сопоставление вчерашнего доклада Александра Александровича и сегодняшнего сообщения Николая Владимировича. И то, что мы называем данный объект системой, еще не дает нам системного подхода, а есть лишь дань времени.

Следовательно, объект, который мы называли системой, можно исследовать, не применяя никаких специфических системных методов, не применяя даже понятия системы, а лишь используя определенную последовательность операций. Для того, чтобы применить это понятие к исследуемому объекту, прежде всего нужно вычленил какие-то неделимые элементы, заданные каким-то определенным образом, но это должны быть неделимые элементы в рамках универсального рассмотрения, если так можно сказать. Должны быть выделены определенные системы связей, определенная совокупность связей внутри выделенных нами элементов, затем выделены какие-то операции (здесь очень много интуитивного), направленные на исследование целостности и других параметров объекта.

По-видимому, в самом первом приближении, системным исследованием можно считать любой тип исследования, который удовлетворяет данному определению системы, который базируется на этом определении и, кроме того, использует некоторые специфические методы — какие именно, еще до конца не ясно.

Г. А. Викторов. А как же из определения системы вытекает подход? Систему можно изучать по-всякому. В чем же специфичность системного подхода, например, в применении к кровеносной системе?

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Кровеносная система к слову «система» не имеет ни малейшего отношения — эти слова употребляются в разных смыслах. Кстати говоря, термин «кровеносная система» существовал задолго до того, как понятие «система» стало модным.

Г. А. Викторов. Но ведь речь шла о том, что системный подход может быть применен к любому объекту, на любом уровне?

В. Н. Садовский. Если есть тот прагматический критерий, о котором мы вчера и сегодня говорили, и если мы можем подойти к спичечной коробке вот с такой системной точки зрения, то прагматически это система.

Г. А. Виктор. В чем же тогда специфика этого подхода, и почему его надо называть системным?

Э. Г. Юдин. Этот вопрос требует гораздо более обстоятельного разговора, но для того, чтобы мы могли говорить о системном подходе как о какой-то реальности, я предлагаю хотя бы в первом приближении договориться о следующем. Вчера Л. А. Блюменфельд сформулировал определение системы, против которого, кажется, никто не возражал. Давайте его и примем. В этом определении задано, по крайней мере, четыре существенных признака, определяющих не только объект сам по себе, но и нашу позицию при исследовании этого объекта, со всеми соответствующими ограничениями. Если мы исследуем некую реальность, опираясь на это определение, то есть пытаюсь рассмотреть ее с точки зрения сформулированных признаков, то мы пытаемся исследовать не просто некий объект, а стремимся исследовать его как систему.

В качестве примера я бы хотел сослаться на сегодняшнее выступление Н. В. Тимофеева-Ресовского, в частности, на изложенное им понимание популяционного уровня. Свою точку зрения по этому вопросу он стремится увязать с определением системы. Он говорит, что популяция как таковая может исследоваться самыми разнообразными способами, начиная с чисто описательного. Его же как биолога интересует выяснение исходного элемента, того кирпичика, из которого строится данный вид рассматриваемых им систем; его интересует механизм жизни и развития этих элементов, образующих системы данного уровня, и так далее. Таким образом, он не ограничивается просто «системной» терминологией, а, исходя из определения системы, ищет какие-то законы жизни...

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Я бы дополнил Ваши рассуждения, с которыми совершенно согласен, одним единственным моментом. Для того, чтобы применить системный подход к изучению объекта или какой-то вне нас находящейся реальности, сначала нужно выяснить, содержатся ли в данной реальности те основные черты, которые определяют систему. Если эта реальность или этот объект на основе данного определения могут быть охарактеризованы как система, то тогда оправдано применение к ним системного подхода, т. е. вычленение элементарных структур и явлений, выделение взаимосвязей, структурное рассмотрение и другие моменты, которые содержатся в определении Льва Александровича. Это очень существенно.

Второе, что мне хотелось бы отметить. Сегодня уже шла речь о том, что существуют живые организмы, для которых не годится половое определение вида, для них требуется какое-то иное определение понятия популяции. На этом частном биологическом примере видно, что не всегда целесообразно ставить слишком общие задачи и давать общие определения. Правда, многие био-

логи пробуют дать такое определение видов, под которое подошло бы все без исключения. Но тогда такое понятие вида теряет рабочий смысл в самых основных проблемах эволюции. Зачем же оно мне нужно? Я так и буду держать на заметке, что здесь, как и во многом другом, имеются исключения, но предпочту пользоваться таким определением понятия вида и понятия популяции, которые могут «работать» при решении достаточно больших биологических проблем. Этот пример можно обобщить.

В связи с этим у меня возникает вопрос — есть ли смысл сейчас нам говорить о небиологических системах? Мы занимаемся биологическими системами и системным подходом в биологии. Целесообразно ли сейчас формулировать этот подход в столь широких и общих определениях, которые для его внедрения в биологическое исследование просто не нужны? Часто бывает, что слишком общее определение, особенно методологического характера, теряет работоспособность, становится просто некоторым утверждением. Нам же на настоящей стадии развития, в частности, в биологии, нужно конкретно выяснить, что дает системный подход в применении именно к биологическим системам.

Л. А. Блюменфельд. Несколько слов о том, что я понимаю в результате нашего обсуждения под системным подходом.

По-моему, системный подход — это абсолютно универсальный принцип, который основан главным образом на невозможности охватить сложные явления со всей мыслимой полнотой. В принципе это возможно, но реально, конструктивно мы это сделать не можем. В самом деле — ведь никто не сомневается в том, что достаточно несколько десятков постулатов, являющихся обобщением опыта, чтобы построить теорию, позволяющую описать и понять все мыслимые явления в природе. Но у нас нет достаточных знаний, нет этих постулатов. Поэтому при изучении сложных явлений нам и приходится произвольно задавать системы и расчленять их на некоторые единицы, относительно которых мы уславливаемся, что мы можем о них ничего не знать, кроме некоторых их свойств, их взаимодействия друг с другом, и что в рамках поставленной задачи они остаются неделимыми. Они остаются таковыми только в рамках поставленной задачи, и не более. Как мы их выделяем — это наше дело; необходимо только, чтобы они соответствовали поставленной задаче. Этот метод широко применяется в науке.

В качестве примера: исследуя сложный химический процесс, последовательность многих сложных реакций, мы считаем заданными, неделимыми скорости отдельных последовательных реакций. Это те элементы, из которых мы объясняем поведение нашей сложной системы. В принципе мы могли бы объяснить ее поведение, рассчитывая константы скоростей отдельных реакций квантовомеханически — если бы умели это как следует делать. Но на самом деле мы этого не умеем, существуют лишь разные приближенные

способы. В этом случае весь путь от единиц, взятых на квантовомеханическом уровне, до поведения системы в целом был бы совершенно необозримым. Поэтому мы выделяем скорости отдельных реакций в качестве неделимых, и уже потом строим систему сложных реакций, находим в них колебания и т. д. Но при этом мы не задаемся вопросом о том, как рассчитать и как понять скорости отдельных процессов — в данном случае это для нас безразлично.

Изучая свойства молекулярного кристалла, мы забываем о многих свойствах молекул. Нам достаточно знать, что связь внутри молекул сильнее, чем между молекулами. Зная соотношения строения, мы можем получить свойства твердого тела.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Т. е. строим чисто феноменологическую картину.

Л. А. Блюменфельд. Совершенно верно. Поскольку же биологические явления еще более сложны, то при их исследовании абсолютно обязателен именно такой системный подход. Иначе мы не можем построить последовательной теории. Поэтому в зависимости от того биологического вопроса, который мы ставим перед собой, мы выделяем сами системы. Вы, Николай Владимирович, выделили их как четыре уровня организации. Если же будет поставлен другой вопрос, системы могут быть выделены иным образом.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Совершенно верно.

Л. А. Блюменфельд. Следовательно, это абсолютно обязательный и единственно возможный путь общего подхода к биологическим проблемам.

А. М. Молчанов. Я начну с истории, которая произвела на меня сильное впечатление, истории прямо-таки лесковской. Мне рассказывал ее С. Маслов — биолог из Московского университета.

В начале или середине прошлого столетия немецкий колонист Фальцфайн захотел спасти русскую степь. Ему не очень нравилось, что по степи бродит скот — вытаптывает ее, бегают зверушки — грызут траву. И вот в Аскания-Нова он огородил большой участок ковыльной степи. Дальше события разворачивались почти по Лескову, у которого сердобольному немцу жалко было сразу отрубить хвост собаке, и он резал его по кусочкам. Неблагодарная взбесилась. Степь повела себя похоже: участок сгнил, и степь исчезла с лица земли.

Оказывается, мы не вправе произвольно создавать систему. Она сама знает, какая она. В случае с Фальцфайпом выяснилось (повторяю, это мне рассказывали, и я не ручаюсь за точность своего изложения), что без протоптанной между дерновинами голой земли степь существовать не может: из-за обильного травостоя семена не достигают почвы и сгнивают. Надо, чтобы и мышки трудились, а то ковылинки друг друга уничтожат, задохнутся.

Здесь система сама сказала, что одна трава — не степь, не система.

Фальцфайн урок потом понял. Все-таки Асканию-Нова он создал, несмотря на «спасение» степи. Но и для нас здесь есть урок — даже с самыми лучшими намерениями следует обращаться осторожно. Можно так «помочь», что потом уж не спасешь.

Другой пример. Массы звезд, при всем разнообразии их строения, укладываются всего лишь в один порядок. Если масса звезды в три раза меньше массы Солнца, то звезды не получится — она не будет гореть, поскольку давление внутри нее слишком мало. Если же взять массу в сто солнечных, то горение будет столь бурным и будет сопровождаться такими взрывами, что эта масса материи либо развалится на куски «надлежащих» размеров, либо выбросит в виде газа и продуктов взрыва в окружающее пространство подавляющую часть своей массы. Все эти события разыгрываются необычайно быстро: сотни тысяч, миллионы лет из стамиллиардной истории Галактики — все равно, что день в жизни человека.

Поэтому мне кажется, что система всегда сама знает, чем ей быть. Именно акцент на произвольность в определении Льва Александровича меня не устраивает. Если вы рассматриваете систему на разумных для нее временах, она всегда будет стабильной.

Мне кажется, что уровни организации жизни, о которых говорил Николай Владимирович, как раз и соответствуют стабильным состояниям. Самая замечательная и характерная особенность жизни — ее «некисельность» — и находится, по-моему, в прямой связи с устойчивостью системы.

Неживые системы обычно тоже устроены дискретно: у них есть неустойчивые критические состояния, отделяющие «зону притяжения» одной устойчивой формации от другой. Однако при нарушении устойчивости они, видимо, чаще всего «сваливаются вниз». Звезды, например, теряют гетерогенность и становятся более «скучными», однородными. Когда биологическая система (вид) достигает критического размера в самых разных смыслах этого слова (это может быть размер интенсивности жизненного обмена и т. п.) — то вид, вероятно, резко возрастает и захватывает ныне по праву принадлежащий ему район. А если этот размер немного снижен, как, вероятно, обстояло дело с мамонтами, вид спадает до нуля.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Но если он слишком возрастет, то окружение вдавит его в должный порядок вещей. Это — «волны жизни».

А. М. Молчанов. Однако из понимания роли критических, неустойчивых состояний вытекает и некоторый оптимизм. Биологическую систему, например, лес, не обязательно доводить до полного расцвета. Надо только помочь ей «перевалить» крити-

ческую точку, а дальше она «сама пойдет». Это попросту дешевле.

Мне кажется, что уже при определении понятия системы нельзя обойтись без представления об устойчивых и критических состояниях. Пока мы бродим между квазиустойчивыми состояниями, то это еще не сложившаяся система, либо более поздний ее период. Называйте ее как угодно — переходным процессом, например, — но это еще не система. Вот когда она стабилизируется (а на это много времени не нужно), тогда станет системой и начнет медленно — относительно, конечно, — эволюционировать. А когда она снова доэволюционирует до взрыва, назовите ее хоть активированным комплексом. Ведь когда рождается ребенок, все согласны, что возникает новая система — мать и дитя.

В этом смысле я не согласен, в частности, с В. А. Геодакяном по поводу популяционных и организменных систем. На мой взгляд, популяционных систем просто быть не может — это и есть недообразовавшаяся организменная система. Я бы предпочел говорить о популяционной стадии переходного процесса.

Из этого подхода вытекает, что можно, например, рассматривать популяцию звезд (слово-то, кстати, биологи у нас, астрономов, утащили, мы его первые придумали, прямо из латыни) без тех элементов — пыли, газа, магнитных полей, которые на достаточно больших временах замыкают ее до единого цельного организма — Галактики. Это и есть главный предмет разногласий.

Говорить о Галактике десяти миллионов лет — это бессмысленно. Ее масштаб — много миллиардов лет. А на таких временах без учета магнитных полей, пыли и газа понять ничего нельзя. Опять получается, что произвольное определение системы неудовлетворительно.

Кроме основных устойчивых уровней, о которых говорил Николай Владимирович (я склонен их отождествлять с понятием системы, если угодно — Системы с большой буквы), существуют промежуточные, неустойчивые, критические состояния. Эти состояния — перевальные точки, означающие, что эта система выше крестика, отмечающего границу между молекулярно-генетическим и онтогенетическим уровнем. Значит, она «сама собой» разовьется до онтогенетического уровня — перевальную точку (линию, границу, условие — как угодно) она уже преодолела. А вот эта — ниже: значит, она «свалится» на молекулярно-генетический уровень.

Н. В. Тимофеев-Ресовский. Это в том случае, если Вы считаете, что есть только одна система.

Ю. М. Свирижев. Мы говорили о системах, о выделении систем из некоторой реально существующей действительности. Скажите, пожалуйста, можно ли в принципе наблюдать Ваши критически

состояния? Ведь любое неустойчивое состояние — это в природе настолько невероятная вещь, что наблюдать его в принципе нельзя.

Вы классифицируете системы по характерным временам. Но характерное время всякой катастрофы, всякого развала настолько меньше характерного времени системы, что, выделяя элементы системы, мы эту катастрофу попросту не видим. Рассматривая системы, мы по сути дела рассматриваем только устойчивые системы.

А. М. Молчанов. Неустойчивые состояния вполне можно наблюдать. Я не говорю уже о всевозможных взрывах. Возьмем более мирную вещь — главную последовательность звезд в астрофизике. На ней есть пустота, которая соответствует цефеидам — переменным звездам. Каждая звезда достаточно большой массы проходит через это состояние. Но на графике оно выглядит именно как пустота. Происходит это потому, что эволюция необычайно убыстряется, когда звезда достигает цефеидного состояния. Она буквально «просвистывает» этот участок. Статистически это выглядит следующим образом. Возраст Галактики — сто миллиардов лет, а время жизни звезды в цефеидном состоянии не более миллиона лет. Следовательно, доля звезд в цефеидном состоянии должна быть что-то около 10^{-5} . Ясно, что на статистическом материале это состояние воспринимается как провал в распределении. Однако негатив в познавательном отношении ничуть не хуже позитива.

Ю. М. Свирижев. Но характерны ли эти состояния для системы?

А. М. Молчанов. Как же не характерны, если она не может перейти из одного состояния в другое, минуя это критическое состояние?

Ю. М. Свирижев. Но если так, то тогда определение Льва Александровича полностью охватывает и рассмотренные Вами случаи.

Я. И. Старобогатов. Боюсь, как бы здесь опять не возникли чисто терминологические недоразумения. Можно вести речь о системах стабильных или квазистабильных и о системах нестабильных. Другое дело, что для биологических целей, по-видимому, нужнее и полезнее изучать систему стабильную, а на систему нестабильную не стоит тратить труда. В некоторых случаях может возникнуть сугубо специальная задача изучения нестабильной системы, но большинство систем, с которыми сталкивается исследователь, это системы стабильные или квазистабильные. Поэтому вместо категорического спора — система это или не система? — мы можем поставить вопрос иначе: это система стабильная или нестабильная? Все, что Вы говорили, относится к стабильной системе.

А. М. Молчанов. Я не предлагаю никакого другого определе-

ния системы. Интуитивное понимание того, что такое система, есть у каждого, кто чем-нибудь «систематически» занимался. Мне кажется, что не стоит зря «разбазаривать высокое звание системы». На мой взгляд, для наших целей более всего подходят два крайних типа объектов: стабильные системы и объекты, находящиеся в крайне неустойчивом состоянии. Первые и есть собственно системы, а вторые, быть может, еще более важны, так как указывают границы областей. Переход через такую границу вызывает к жизни новое качественное состояние, тяготеющее к определенному типу стабильности. Этот-то тип стабильности и заслуживает, по-моему, наименования «система», а то, что происходит с объектом «по дороге», есть не более как переходный процесс.

А. А. Малиновский. Я начну с выступления А. М. Молчанова. Мне кажется, что понимание того, что такое система, это вопрос отчасти терминологический и одновременно существенный. Вопрос о том, что́ нужно рассматривать, что́ интересно и что́ важно — это вопрос не терминологический. В этом смысле Альберт Маркарьевич совершенно прав. С другой стороны, проблема определения — это вопрос довольно произвольный. В этом отношении я иду дальше, чем Лев Александрович, считая, что систему вообще нужно выделять произвольно.

Мне кажется, удобно назвать системой любой комплекс элементов. Я согласен, что неделимость элементов — это очень важный момент. А дальше уже идет вопрос о закономерностях систем: одни системы обладают большей степенью целостности, другие — меньшей, но нет системы, которая вообще не имела бы никакой целостности, т. е. определенной устойчивости, организованности, стабильности, определенных общих свойств. Наверное, ни одна, даже произвольно выделенная, система не обладает полным отсутствием целостности: раз мы ее выделяем, то выделяем по какому-то объединяющему принципу. И очень важно выявить закономерности, в силу которых появляется эта целостность и стабильность.

Еще одно. В биологии представление об отрицательных обратных связях возникло очень рано — в 1912 г. Оно было четко сформулировано Беловым, который рассматривал эндокринные и другие органы, и это представление он распространял даже за пределы биологии. Но интересно, что и Белов, и Завадовский, экспериментально изучавший эти явления, считали, что других связей не может быть потому, что положительные обратные связи (Завадовский называл их «плюс — плюс взаимодействием») приводят к развалу системы. Между тем я и некоторые другие указали на то, что разные типы связей на самом деле характеризуют разные этапы развития системы. В период активного онтогенеза мы наблюдаем много связей типа «плюс — плюс» и «минус — минус» (по терминологии Завадовского). Например, у некоторых

животных имеет место взаимное подавление женских и мужских половых клеток, благодаря чему избегается гермафродитизм. В других случаях имеется взаимная стимуляция.

Но процессы развития кратковременны по сравнению с периодом существования зрелого организма. Поэтому положительные обратные связи, т. е. «плюс — плюс» и «минус — минус», сначала выпадали из поля внимания, хотя они очень важны для развития системы, ее возникновения и становления. С этой точки зрения изучение закономерностей связей в равной степени интересно и на том, и на другом этапе развития систем. Преимущественное же внимание к стабильным системам объясняется просто тем, что мы чаще их видим.

Теперь второй вопрос.

Мне кажется, что при разработке системного подхода нас должно интересовать то общее, что имеется в качественно различных системах. В этом и состоит основная задача. Здесь, разумеется, можно говорить не только о структурах. Но на структуры делается основной упор, потому что именно они, будучи в определенной степени инвариантными, могут быть абстрагированы из качественно различных систем.

Я возвращаюсь к вопросу Николая Владимировича — имеет ли смысл разделение на жесткие и корпускулярные системы? Мне кажется, имеет. Об этом свидетельствуют уже те ошибки, которые были допущены вследствие того, что это различие не учитывалось. Во вчерашнем докладе я уже говорил о не оправдавшей себя попытке Вейсмана перенести отбор внутрь организма. Подобную же ошибку допускал и Ру, который говорил о наличии отбора не наследственных задатков, а отдельных элементов, клеток и органов. Отбор имеет смысл в корпускулярной системе, но не в жесткой, о какой здесь шла речь. Отбор между отдельными элементами нецелесообразен для организма и ведет к его разрушению. В принципе в организме может существовать отбор, но он должен быть заранее запрограммирован в пользу организма, что получается вовсе не автоматически.

С этой же точки зрения можно понять, почему имеет место линейное расположение генов. Принципиально незамкнутое, линейное расположение генов могло бы быть заменено замкнутым. У высших форм искусственно создавались замкнутые кольцевые хромосомы. Но они невыгодны, потому что нарушается корпускулярность, свобода распределения. Максимальная независимость в эволюционном смысле наиболее полно обеспечивается именно линейным расположением генов.

Таким образом, для отбора наиболее выгодна корпускулярная форма, допускающая свободную комбинаторику, для развития же наиболее выгодна жесткая форма, где имеется определенная связь частей, обеспечивающая локализацию и одновременность развития отдельных органов. Зная это, можно найти

оптимальные соотношения между тем и другим типом систем. Одним из таких оптимальных соотношений является то, о чем я уже говорил, — так называемая звездная связь, где один элемент связывает между собой многие, являющиеся конечными звеньями, благодаря чему возможен отбор, независимое изменение любого из элементов, и, с другой стороны, достаточно жесткая связь, когда этот отбор не действует.

Исходя из всего сказанного, я повторю, что разделение на жесткие и нежесткие системы кажется мне полезным. При этом, конечно, нельзя забывать, что это разделение фиксирует лишь крайние формы, не исключая многих промежуточных форм.

Необходимо пояснить, что под *жесткостью* системы я подразумевал такую связь, которая предполагает необходимость двух каких-то элементов для сохранения системы в целом. С этой точки зрения можно рассматривать самые разные образования. Действительно, цепь выступает как жесткая система в тех случаях, когда мы испытываем ее на прочность (по длине). Это — жесткая система, в которой каждое звено необходимо и прочность которой определяется самым главным звеном. В других направлениях она может быть нежесткой системой.

Только в таком организационном, структурном, абстрактном смысле я и говорил о жесткости системы. Жесткость не обязательно должна быть физической, механической или какой-либо иной; это — жесткая *связь*. Таковой является, например, связь между двумя полами у двуполовых организмов: исчезни один пол, и размножение прекратится. А внутри пола, внутри популяции особей одного пола, напротив, имеет место корпускулярность, т. е. одна особь одного пола может заменить другую особь того же пола.

Разделение на жесткие и корпускулярные системы позволяет делать далеко идущие выводы, на которых я сейчас не могу останавливаться. Отмечу лишь в качестве примера, что для биологии, в частности, очень важна разработка теории оптимума. Она может вестись в различных направлениях: 1) для отдельного фактора; 2) для распределения различных показателей внутри заранее заданной системы; 3) для выявления оптимальности строения. Во всех этих трех отношениях понятие оптимума различно, но для второго и третьего случаев важно представление о жесткости или корпускулярности системы, представление о том, как их сочетать в направлении, наиболее выгодном для системы, для ее устойчивости.

Л. А. Блюменфельд. Я несколько удивлен горячностью полемики по поводу того определения системы, которое я дал. Это было просто определение, а не классификация систем, не рассмотрение изменения их свойств во времени. Понятие «система» употребляется в разных смыслах, и мне захотелось сформулировать, как употребляется это понятие при системном подходе.

Совершенно ясно, что выбираемая система произвольна, но сама возможность ее выделения определяется свойствами системы. Для решения какой-либо конкретной задачи нам не всегда удается это сделать: например, если свойства системы таковы, что их задавать нельзя, если нельзя выделить элементы, которые считаются неделимыми, и нельзя выделить связи между ними. Можно ли это сделать или нельзя — это определяется объективными свойствами системы.

Как мы выделяем систему? Это зависит от того, какой вопрос мы хотим решить. Рассматривая эволюцию системы во времени, мы можем считать некоторую совокупность одной системой, если между ее элементами в разные моменты времени можно установить однозначное соответствие. Если нас интересует эволюция в течение очень большого времени, мы должны учитывать слабые воздействия, на меньших же временах слабые взаимодействия с удаленными частями системы мы можем не учитывать, а учитывать лишь сильные воздействия — это зависит от конкретного вопроса, который мы ставим. Иногда эволюционный подход нам вообще не нужен, — например, когда мы рассматриваем систему стабильную в данный момент времени, или рассматриваем нестабильную систему на достаточно коротких временных отрезках. В этих случаях деление систем на стабильные и нестабильные вообще не нужно. Короче говоря, здесь все зависит от точки зрения. Я думаю, что определение системы еще можно усовершенствовать. Но мне не хотелось бы включать в это определение все вопросы эволюционные, классификационные и т. п.

В. А. Геодакян. Я полностью согласен с А. А. Малиновским, за исключением вопроса о кольцевых и линейных структурах хромосом. Эволюции нужно «писать» дальше, поэтому строчка не должна быть кольцевой. И дело не в том, что кольцо — жесткая система, а в том, что оно не имеет концов. А в ходе эволюции к хромосомным структурам должны добавляться новые гены.

Я согласен и с А. М. Молчановым, и с Л. А. Блюменфельдом, и считаю, что правы оба. Но несмотря на то, что вы правы, прав и я.

А. М. Молчанов говорил, что не существует популяционных систем — есть только жесткие системы, а популяционные исчезают. Я же полагаю, что есть и жесткие, и популяционные системы, вопрос лишь в том, сколько времени та или иная система живет. Я думаю, что одной из будущих аксиом теории эволюции будет следующая: популяционная система эволюционирует в жесткую организменную систему, и, наоборот, создавшиеся организменные системы образуют новые популяционные системы на новых уровнях. Если рассматривать временной разрез — своего рода моментальный снимок, то мы увидим набор популяционных систем, каждый элемент которых представляет собой организменную систему. Так вырисовывается стройная картина, начиная с элементарных частиц и кончая социальными системами.

Здесь говорили, что не следует выходить за пределы биологических систем. Я считаю, что это неверно — тогда теряется смысл нашего собрания.

В свое время объектом исследования был организм, изучаемый как единая система. Затем выяснилось, что в нем могут быть выделены сердечно-сосудистая, мочеполовая, нервная и другие системы, т. е. постепенно удавалось открыть все новые и новые системы. Открыть систему — это значит правильно отбросить все ненужное, правильно пренебречь несущественными с данной точки зрения взаимодействиями. Подобно этому и инженер, изучая автомобиль, выделяет в нем систему охлаждения, систему зажигания и т. п. Это делается из соображений удобства.

Задача теории систем состоит в выявлении того общего, что лежит в основе и подхода анатома, и подхода инженера, если воспользоваться приведенным примером. Интуитивно все мы чувствуем, что есть какие-то общие закономерности, которые применимы и там, и здесь. Поэтому, если мы исключаем из рассмотрения неживые системы, оставляя только живые, тогда нет смысла говорить об общем системном подходе, остается одна биология.

Кто-то говорил здесь, что слово «система» — это дань времени. Я думаю, что это скорее дань удобству — так нам удобнее, так легче исследовать объект.

Ю. М. Свирижев. Несколько слов по поводу предлагавшейся здесь классификации систем. Я считаю, что вводить разделение систем на жесткие и популяционные не имеет смысла. Мы говорим о системе как о наборе некоторых элементов, между которыми установлены известные связи. Насколько я понял, связи в организменной системе рассматриваются как более сильные, чем в популяционной. Однако сильные это связи или слабые, и к какому типу они будут относиться, — все это определяется характером исследования. Так, например, мозг можно рассматривать и как некоторый организм, и одновременно как популяцию нервных клеток. В частности, при моделировании мозговых процессов при помощи сети формальных нейронов используется типичный популяционный подход. Пример из биологии — муравейник: это популяция муравьев и в то же время своеобразный организм.

Я хотел бы еще отметить, что примером системного подхода в биологии является популяционная генетика, развитая Холдэном и Райтом и сейчас интенсивно развиваемая на Западе. Там четко выделяются далее не делимые объекты, задаются правила оперирования с этими объектами, задаются некоторые связи между этими объектами и некоторые их характеристики, в частности, коэффициент относительной взаимоприспособленности, выражающий связь каждого из этих объектов с внешним миром. И затем исследуются общие свойства этой системы — например, свойство некоторых систем повышать свою приспособленность,

Отмечу в связи с этим, что при разработке проблемы оптимальных процессов в популяционной генетике нами была доказана теорема о том, что при максимально возможном богатстве комбинаций генов приспособление системы максимально, точнее, максимальна функция средней приспособленности популяции к данным условиям. Если же условия изменяются, то от системы требуется не только максимальная приспособленность, но и способность адаптации к изменениям. В этом случае максимальная приспособленность вредна, и должен существовать какой-то механизм или аппарат, который сбил бы максимальную приспособленность до известного уровня и тем самым сохранил адаптивные свойства системы. Можно совершенно строго показать, что естественный отбор, будучи пассивным началом, сделать этого не может. Повышением своих адаптивных свойств система обязана определенным генетическим механизмам, которые приводят к образованию некоторых более или менее устойчивых комбинаций генов.

А. А. Малиновский. Вы имеете в виду инверсию или нечто иное?

Ю. М. Свиржев. Это может быть инверсия, может быть объединение супергенов и т. д.

А. С. Мамзин. Я хочу коснуться некоторых общих вопросов, связанных с темой сегодняшнего обсуждения.

При рассмотрении любой сложной системы мы сталкиваемся с таким свойством ее элементов, как *мультифункциональность*. Из этого вытекает, что каждая система как изучаемый объект обладает многими параметрами, т. е. ее можно рассматривать как совокупность нескольких систем. В какой-то мере это показал Я. И. Старобогатов, говоря о соотношении связей в их динамике, когда одна система выступает как ряд состояний, ряд систем. Это, в частности, объясняет, почему при биохимическом, физиологическом или каком-либо ином биологическом исследовании на одном и том же круге объектов выделяются разные системы. Означает ли такое выделение разных структур (если под структурой понимать частный вид системы) полный произвол в выборе этих структур? Идет ли оно только от точки зрения или же имеет объективную обусловленность? Мы должны прийти к выводу, что как нет объективно заданной однозначности, так нет и произвола в подходе к изучению данной системы со стороны того или иного специалиста, так как любой подход связан с объективной стороной, аспектом более сложной системы.

Относительно общего и специфического в системном подходе. Я не могу согласиться с теми, кто считает, что системный подход и его категории следует разрабатывать только в конкретном плане — например, сугубо для биологов. Чтобы прийти к общему, нужно проанализировать единичное и особенное, но это не значит, что не могут быть разработаны некоторые общие мо-

менты системно-структурного подхода к изучению действительности, или что они будут настолько предельно общими, что потеряют всякое содержание. Конечно, чем более общее понятие мы берем, тем меньше мы можем сказать конкретного о его содержании, но тем не менее уже в нашем обсуждении были намечены некоторые общие принципы системного мышления в его гносеологическом аспекте. Эти принципы обладают определенными чертами всеобщности, хотя они и дополняются специфическими методами, заимствованными из конкретных наук. Плодотворное стремление к уточнению понятий, продемонстрированное на нашем симпозиуме, как раз и показывает, что можно найти такие общие моменты, с которыми согласны все.

Всякое системное исследование основывается на выделении в системе некоторых элементов, о которых предварительно мы уже что-то знаем. После выделения элементов рассматриваются их взаимоотношения, и процесс познания идет от нерасчлененного целого к его расчленению и затем к синтезу. Системный подход представляется мне таким подходом, в котором сливаются нерасчлененное знание о целом и предварительный анализ. Например, биология вышла на ценотический уровень тогда, когда уже имелись знания о жизни отдельных организмов и небольших групп. После этого началось исследование более сложных систем. То же самое произошло с развитием генетики — это развитие шло от утверждения принципа атомизма к рассмотрению генов как систем. Здесь мы наблюдаем общий момент — знание становится системным, когда уже имеются в наличии предварительные сведения об элементах и предварительное общее терминологическое описание данного системного образования в целом. А затем знание расширяется и обогащается за счет того, что мы выделяем в системе не одну структуру (скажем, динамическую), а рассматриваем систему как многопараметровую структуру; система предстает перед исследователем как многокачественная совокупность систем.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В ЭКОЛОГИИ

Я. И. Старобогатов. К участию в настоящем симпозиуме, помимо всего прочего, меня побудила и некая практическая цель. Правда, довольно дальнего прицела — к решению этого вопроса мы подойдем лишь через два-три года. Дело в том, что в современной биогеоценологии (будем так называть науку, изучающую биогеоценоз) наступило в какой-то мере кризисное состояние. Существующие в ней подходы (в том числе и один из наиболее плодотворных — трофодинамический подход), давшие в свое время чрезвычайно много, в значительной мере исчерпали себя теоретически. Так, из чисто теоретических предпосылок ясно, что эти подходы могут дать и чего они дать не могут. Более того, создается впечатление, что современные исследования в этой области, проводимые в рамках существующих подходов, расширяют приложение теории, но не углубляют, не развивают ее. Все это и заставляет искать в биогеоценологии новые подходы. Мне представляется, что системный подход перспективен в этом отношении. Я бы не утверждал этого категорически, но он, по крайней мере, не обещает не дать ничего. А, скажем, энергетический (трофодинамический) подход обещает ничего не дать. Почему?

Ответ на этот вопрос связан с основной проблемой биогеоценологии — выяснить, как будет изменяться численность (или какая-либо другая количественная характеристика) вида *A*, если ряд факторов, воздействующих на вид *B*, изменят численность этого последнего. Трофодинамический подход принципиально не может ответить на этот вопрос. Он может лишь сказать, как изменится поток энергии к данному виду, но не как произойдет изменение численности его.

На мой взгляд, системный подход в экологии возникает не на пустом месте, а рождается из предыдущих подходов (и поэтому использует все их данные и методы) в условиях, когда они уже не в состоянии плодотворно решать стоящие перед экологией задачи.

Например, энергетический подход в трофодинамике изучает, в частности, структуру сообществ (а изучение структуры — составная часть системного подхода). Он делает это, выявляя определен-

ные межорганизменные связи и анализируя потоки энергии вдоль линии этих связей. Качественное исследование позволяет выявить эти связи (в основном трофические), а количественное исследование анализирует потоки энергии в них. Другой подход, частично используемый в системном анализе, связан с явлениями пищевой конкуренции в водных сообществах. В свое время этим подходом оперировал Шорыгин. Сначала он чисто феноменологически исходил из определенных количественных отношений видов в биоценозах дна и пытался объяснить эти отношения конкуренцией или, точнее, отсутствием конкуренции в устойчивом биоценозе. Потом он попытался измерить количество конкуренций — отсюда появились его единицы «канкалии». Однако пищевая конкуренция не исчерпывает всех связей в биоценозе (существует, например, конкуренция за место, за пространство и т. п.), и для описания его структуры не хватает очень многого.

Системный подход представляется в этом отношении более разносторонним или даже всесторонним. При системном подходе мы должны: а) показать, что данный объект может рассматриваться как системный (это необходимое условие); б) выяснить, из каких элементов состоит данная система. Поскольку элементы могут выделяться более или менее произвольно, то при этом требуется ввести критерий выделения элементов и показать, что именно элементы такого рода удовлетворяют нас при изучении системы. Иначе неизбежен вопрос: почему элементы выделены именно таким, а не иным образом. Затем нужно выявить соотношение между этими элементами или структуру системы, характер связей — сначала качественно, а затем по возможности количественно.

Я настаиваю на том, что помимо качественного анализа связей, который может дать много полезного, необходим и количественный их анализ. Тем более, что в настоящее время чрезвычайно трудно измерить единой мерой связи разного типа и различные по своей внутренней биологической сущности. Скажем, энергетический подход позволяет измерять только трофические связи, но не связи при конкуренции. А между тем важно измерить единой мерой все связи, рассматриваемые в данной системе, и показать, какие из них сильнее, а какие — слабее. Если мы будем знать это, сможем выяснить, в какой мере одно определяет другое. Системный подход дает такую возможность.

Если рассматривать биогеоценоз (а хорошо локализованный биогеоценоз, на мой взгляд, может рассматриваться как система) и подходить к нему с учетом того, что А. А. Малиновский говорил о характере связей, то обращает на себя внимание следующее. Здесь имеются разные связи: положительная обратная связь — «плюс — плюс» или «минус — минус», и отрицательная обратная связь — «плюс — минус». Естественно, что положительные обратные связи неизбежно должны привести либо к неограничен-

ному увеличению численности или массы вида, если связь «плюс — плюс», либо к исчезновению одного из видов, если связь «минус — минус». Если связь ведет к увеличению, то предел ему кладут какие-то внешние факторы. Напротив, связь «плюс — минус» в принципе ведет не к неуклонному увеличению или уменьшению численности какого-либо вида, а к некоторому стационарному состоянию — правда, с известными колебаниями. Таким образом, стабильный биогеоценоз должен представлять собой стационарную систему с неизбежным преобладанием связей типа «плюс — минус». И действительно, все трофические связи по своей природе принадлежат к этому типу, потому что тот, кто съедает, всегда рассматривается как жертва, а тот, кто съедает, рассматривается как хищник, безотносительно к тому, съедает ли он животный объект или растительный. Напротив, на ранних стадиях формирования экосистем, в данном случае биогеоценозов, должны преобладать положительные обратные связи — «плюс — плюс» и «минус — минус». В этого рода системах связь «плюс — плюс» сравнительно редкая, хотя и вполне возможная — мы знаем примеры ее существования; «минус — минус» — это типичный случай конкурентных отношений. Что при этом происходит?

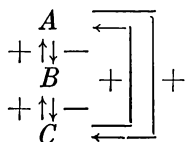
В свое время было предложено несколько вариантов индекса разнообразия. В конечном счете они меряют разнообразие видов в данном биогеоценозе и разнообразие их количеств (имеются в виду видовые популяции). Возьмем, например, данные Дуплакова по развитию обрастания. Развитие обрастания на вновь поставленном бетонном молу в море будет идти так же, как и в пресных водах. Индекс разнообразия будет с некоторыми колебаниями нарастать, пока он не придет в стационарное состояние: с появлением каждого следующего конкурента за место численность предыдущих зачастую значительно снижается. Эти переломные точки — пики возрастания и снижения — и являются причиной волнообразного характера этой кривой. Когда заселение заканчивается, получается то самое стационарное состояние, когда все конкуренты, так сказать, придавлены, и связь «минус — минус» потеряла свою роль, стала незначительной.

Если априорно согласиться с этим утверждением, то получится, что в биогеоценозе должны резко преобладать связи «плюс — минус», любыми же положительными обратными связями мы можем с достаточным основанием пренебречь. И мы приходим к утверждению Шорыгина, что основой формирования биоценоза является отсутствие конкуренции между организмами, имеющими сходное питание.

Однако при более внимательном рассмотрении оказывается, что имеются биогеоценозы, в которых это положение не соблюдается. Широко известен планктонный парадокс, состоящий в том, что виды, которые могут конкурировать между собой, в планктоне наблюдаются в соизмеримых друг с другом коли-

чествах. Попыток объяснить это явление чрезвычайно много, но при изучении планктонного парадокса обычно не учитывают, что подобное же явление наблюдается и во многих других случаях, когда избыток организмов (с энергетической точки зрения это можно трактовать как избыток энергии) в какой-то мере выносятся из данной экосистемы. Причем чем больше количество выносимого живого вещества (или энергии — как угодно), тем ближе состояние к пресловутому планктонному парадоксу. Получается, что данная система на ранней стадии как бы заторможена внешним воздействием. Следовательно, здесь преобладают положительные обратные связи.

Теперь обратимся к следующему обстоятельству. Если внимательно взглядеться в трофические связи, то окажется, что дело обстоит совсем не просто. Возьмем не два элемента трофической цепи, а три — изобразим их формально как *A*, *B*, *C*. Связь между *A* и *B* — «плюс — минус» (хищник — жертва). Связь между *B* и *C* — также «плюс — минус». А какова связь между *A* и *C*? Ведь они тоже как-то опосредованно связаны. Оказывается, что эта связь — «плюс — плюс»:



Но если так, то получается противоречие тому, что я только что сказал: выходит, что в устойчивых стационарных системах биогеоценотического типа положительных обратных связей не меньше, чем отрицательных обратных, или, самое большее, первых в два раза меньше, чем вторых, — порядок тот же. Таким образом, систему что-то уравнивает, иначе она будет нестационарной.

А какова связь между животным, не питающимся бактериями, и бактериями, которые разлагают органические остатки? Увеличение численности животных, естественно, способствует увеличению численности бактерий, увеличение же численности бактерий не влияет на увеличение численности животных. Выявляется еще и четвертая категория связей — «плюс — ноль». Вероятно, можно найти и пятую категорию связей — «минус — ноль». Именно за счет такого рода связей уравнивается избыток положительных обратных связей в биогеоценозе, что обуславливает его стабильность.

Видимо, следует изучать связи в количественном отношении. Совсем непросто найти единую меру для всех этих связей, независимо от того, в каких биологических взаимодействиях они выражаются. Можно попробовать пойти по более простому пути: изучать не корреляцию между числами, а корреляцию между

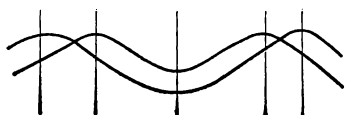


Рис. 2

тенденциями изменения чисел. Правда, здесь мы всегда сталкиваемся с возможностью ошибки. Поскольку связь «хищник — жертва» периодически изменяется (рис. 2), то на определенном отрезке будет возрастание и хищника, и жертвы, на другом отрезке — убывание и хищника, и жертвы, и лишь на каком-то ином отрезке будет убывание жертвы и возрастание хищника, либо наоборот. Какая же имеется корреляция между тенденциями за разные промежутки времени? В какой-то мере это игра вслепую. Зато найдя период, за который наиболее четко выражается отрицательная обратная связь (т. е. возрастание жертвы ведет к возрастанию хищника, а возрастание хищника ведет к убыванию жертвы), мы найдем период этих колебаний.

Сейчас, на мой взгляд, мы находимся на таком начальном этапе системных исследований, когда желательно ставить и формулировать задачи, чтобы каждый в своей области подумал о том, как на них можно ответить.

К. М. Хайлов. Определение системы, данное вчера Л. А. Блюменфельдом, предполагает, в частности, что система — совокупность элементов, выделенных любым способом, каждый из которых в рамках этой системы признается неделимым, со всеми связями между этими элементами внутри системы.

Иногда выделение системы из какой-то большей совокупности объектов не представляет трудностей, как и выделение неделимых в рамках этой системы элементов. Так обстоит, например, с видом или менделевской популяцией, поскольку речь идет об актуальных генетических связях между организмами вида (популяции), которые (организмы) тем самым и являются элементами. Отчасти так обстоит дело и с организмом, который настолько явно «выделен» из окружающей среды, что сама постановка вопроса о «системном подходе» к организму может показаться бессодержательной (Н. В. Тимофеев-Ресовский), с чем, однако, я не вполне согласен. Действительно, при решении разных задач может оказаться целесообразным считать элементами организма разные вещи — системы органов, органы, разнофункциональные ткани, клетки. Соответственно по-разному будут «построены» в этом случае и «системы организма». Их изучение отдельно друг от друга является самостоятельной и достаточно важной задачей, что, собственно, и является системным подходом к организму, в целесообразности которого сомневается Н. В. Тимофеев-Ресовский.

Но он совершенно прав, настаивая несколько раз в течение этой встречи на том, что системный подход разумен и полезен *не вообще*, а применительно к решению *совершенно конкретных задач*. В случае с экологическими объектами затруднения, свя-

занные как с выделением самих систем, так и их элементов, возникают прежде всего тогда, когда задача исследования либо очень широка, либо сформулирована недостаточно конкретно. Постараемся показать это на примере.

Пусть имеется некоторое множество организмов, обитающих в определенном районе моря (рис. 3) — в толще воды (планктонные организмы — A, B, C) и на дне (бентос-организмы K, L, M).

Пусть известно, что организмы A, C, K, L объединены трофическими связями типа хищник — жертва, а организмы A, B, C объединены трофическими связями нехищного типа (например, при помощи растворенных в воде органических соединений, выделяемых одними и утилизируемых другими организмами).

Поставим задачу в общей форме: как можно выделить систему из этого круга объектов и что считать элементами такой системы, не делимыми с точки зрения этой системы? Поскольку система — единство взаимосвязанных элементов, при выделении системы необходимо, очевидно, руководствоваться типами связей между организмами. Учитывая, например, трофические связи типа хищник — жертва, можно выделить из всего множества подмножество A, C, K, L , которое тем самым и образует определенную систему — X . Если же иметь в виду связи нехищного типа, то состав выделенной системы и ее локализация в водоеме окажется иной — организмы A, B, C , система — Y . Можно избрать еще один путь — рассматривать косвенные связи между организмами, заключающиеся в совместном использовании общей территории. Тогда окажется, что все множество названных организмов — A, B, C, K, L, M образует одну систему — Z . Таким образом, на основе одного и того же множества организмов, можно выделить несколько разных по своему составу подмножеств, каждое из которых будет удовлетворять определению системы и соответствовать определенной исследовательской задаче. Характер задачи в свою очередь обусловлен типом межорганизменных связей, которые мы хотим или можем исследовать. В таком случае по мере развития возможностей исследования межорганизменных связей в экологии должны возникать все новые и новые системные изображения (пока не будут охвачены все типы межорганизменных связей и не будут выявлены все отвечающие им типы систем). Когда такое состояние будет достигнуто, возникнет задача синтеза отдельных систем в рамках единой системы, занимающей данный район моря. В этом случае потребуется либо изменить понятие «элемент», либо ввести понятие «субсистема». В самом деле, с точки зрения общей системы — A, B, C, K, L, M , множества

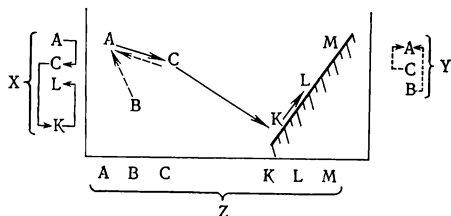


Рис. 3

X и Y могут рассматриваться как отдельные элементы. И если задача исследователя ограничена анализом взаимодействия, скажем, системы связей хищник — жертва и системы нехищных связей, то элементы X и Y можно рассматривать как неделимые с точки зрения этой системы. Но те же множества X и Y будут рассматриваться как subsystemы, если мы пожелаем рассматривать каждую группу связей достаточно детально. Таким образом, понятия «субсистема» и «элемент» весьма условны и их выделение определяется опять-таки конкретной задачей исследования. Это еще раз позволяет подчеркнуть, что системный подход является не самоцелью, а лишь определенным методом исследования реальных объектов, методом, который предполагает прежде всего рассмотрение межэлементных связей сложных объектов.

В общей форме способ выделения систем и их элементов, исходя из типов межэлементных связей, по-видимому, достаточно ясен и приемлем. Однако его реализация встречает иногда определенные трудности. Рассматривая выше некое природное множество организмов A, B, C, K, L, M , мы упрощали реальную ситуацию, называя лишь символы видов — A, B, C и т. д. и игнорируя такой важнейший экологический показатель, как численность видов. В этой связи уместен вопрос: правильно ли считать, например, элементами системы X символы видов, безотносительно к их реальной численности, или же такой подход неправилен и элементами экологической системы такого рода следует считать реальные видовые популяции — N_A, N_B и т. д., где N — численность видов?

Я склонен считать, что оба способа выделения систем — с учетом и без учета реальной численности видов — одинаково правильны и допустимы и что выбор того или иного из них определяется опять-таки задачей исследования. Кстати, это вполне соответствует и определению системы, которое предложил Л. А. Блюменфельд: в систему могут быть объединены не только реальные (N_A, N_B, N_C и т. д.), но и абстрактно мыслимые (A, B, C) элементы.

Для решения целого ряда экологических задач численность видов является основным показателем. Однако в других случаях при выделении системы можно отвлекаться от численности видов, оперируя лишь их символами, как если бы каждый вид был представлен всего лишь одним индивидом. Возможность такого подхода определяется, например, специфической задачей — анализом механизмов нехищных связей при участии растворенных в воде органических соединений. Вероятно, такой подход удовлетворил бы и энтомолога, если бы он имел задачей изучение механизмов сенсорных связей особей разных видов в наземных сообществах. Разумеется, при таком подходе к системам, когда выделяются лишь механизмы межорганизменных связей или анализируются их *схемы* в сообществах, многие экологические

лагал ранее ¹. Однако мне кажется, что выделение корпускулярных и жестких (или функционально упорядоченных и пространственно упорядоченных) систем далеко не исчерпывает задачи, так как в системах «жесткого» типа существует большое разнообразие связей между элементами, и задача системного исследования — пойти дальше выделения «вообще жестких» систем. Экологический пример, который я приводил выше, позволяет, мне кажется, увидеть реальность таких задач.

Сопоставляя точку зрения А. А. Малиновского и свою, я еще раз убеждаюсь, что в определенных задачах нет необходимости включать численность элементов, несущих одни и те же функции, в число обязательных показателей системы. Насколько я понимаю, выделение «жестких» систем по А. А. Малиновскому предполагает как раз возможность неучета численности элементов-гомологов. Но численность становится основной величиной при изучении корпускулярных систем объекта или всего объекта в целом.

В. Е. Заика. Общая теория систем вызвала такой интерес, что представители самых различных отраслей науки в последнее время спешат заверить, что они тоже изучают системы. Это заверение столь же справедливо, как и то, что научные труды пишутся прозой. Действительно, часть философов утверждает, что любой объект можно рассматривать в качестве системы.

Каждая из областей естествознания имеет свой формализованный язык, свои методы исследования и т. д. Ожидается, что описание различных объектов и способов их изучения на языке системных исследований поможет установлению изоморфизма систем, причем будут взаимно обогащены и общая теория систем, и естествознание. Такая цель стоит определенных усилий, которые состоят в освоении и применении системного подхода к различным областям науки. В данном случае эколог делает попытку взглянуть на экологию глазами «систематика» (теоретика систем).

Экологию обычно определяют как науку о взаимоотношениях организмов с окружающей средой. Важно отметить, что сейчас любая отрасль биологии рассматривает изучаемый объект в тесной связи с внешними условиями, т. е. такие науки, как физиология, биохимия и др., являются «экологическими». Собственно экология рассматривает в качестве элементарной целостной единицы особь (индивид), и взаимодействие особей друг с другом и косной средой изучает в целях выяснения законов, управляющих *распределением и обилием* организмов.

Каждая из биологических наук имеет свой объект исследования, представляющий более или менее целостную систему процессов или структур, причем в центре внимания находится обычно живая система или ее компоненты. Особенность экологии

¹ *К. М. Хайлов.* Биологическая организация и информация.— «Журнал общей биологии», 1966, т. 27, № 4.

состоит в том, что здесь объект исследования представляет собой систему, в которой живые организмы являются только одним из компонентов; вторым компонентом является среда.

Эта особенность проявляется скорее как тенденция, нежели правило: экологические работы можно расположить в ряд, где на одном конце будут исследования, в которых организмы и среда рассматриваются как две взаимодействующие системы; на другом конце ряда будут исследования, в которых организмы и среда явно рассматриваются как компоненты единой системы. Такой системе дано специальное название: *экосистема*. Анализируя экологические работы, появившиеся в последние 15—20 лет, можно убедиться, что доля статей, посвященных экосистемам, относительно невелика, но постепенно возрастает.

Экология изучает взаимоотношения со средой живых систем различной сложности. Соответственно различают экологию особей, популяций и сообществ. Можно отметить, что об экосистемах пишут преимущественно в работах, посвященных экологии сообществ.

По нашему представлению, выбор объекта исследования производится (иногда интуитивно) таким образом, чтобы в центре внимания оказывались интересующие исследователя субстраты или процессы; система выбирается такая, чтобы эти субстраты или процессы были *внутренними*, или преимущественно внутренними по отношению к данной системе. Именно это обстоятельство и заставляет экологов, изучающих взаимоотношения живых и косных систем, выбирать в качестве объектов исследования системы, включающие живые и косные компоненты в виде подсистем. Нечто подобное наблюдается в тех случаях, когда объектом исследования избирается система «человек — машина».

В экологии наблюдается тенденция рассматривать системы все большего размера. Это объясняется усиливающейся опасностью катастрофических разрушений природного равновесия вследствие деятельности человека. На многих горьких примерах пришлось убедиться в том, что изучение отдельного вида в его взаимоотношениях со средой не всегда приводит к верной оценке полезности или вредности данного вида для человека.

Когда изучается система «популяция (=видовая популяция) — среда», ее связи со всеми другими видами организмов рассматриваются как связи с «биотическими факторами» среды, причем, как правило, анализируются лишь взаимодействия других видов с изучаемым, но не между собой, так как взаимные связи других видов заведомо находятся вне изучаемой системы. Именно при таком подходе возможны ошибочные заключения об абсолютной вредности воробьев или хищников и, как следствие, широко поставленные «эксперименты» по борьбе с животными, дорогой ценой убеждающие в необходимости более всестороннего изучения больших экосистем.

При исследовании систем типа «сообщество — среда» все взаимоотношения организмов, входящих в данное сообщество, рассматриваются как *внутренние* связи, т. е. включаются в объект исследования. Тем самым эколог обязывает себя анализировать всю сеть отношений между всеми (или, по крайней мере, основными) представителями сообщества, и соотношения каждого из видов с косной средой. Разумеется, такой объект гораздо сложнее, и исследование его обычно производится по-этапно, так что изучение подсистем типа «популяция — среда» не исключается, а составляет большую часть общей задачи. Однако в данном случае изучение подсистем не считается законченным, пока не будет исследована вся система, поскольку лишь в этом случае достигается наиболее полное знание о каждой частной подсистеме.

Попытаемся теперь сопоставить подход экологов с мнениями философов и системников об объектах системного исследования. Наряду с представлением, что любой объект возможно рассматривать как систему, высказываются пожелания ограничить системные исследования изучением органически целостных объектов. Какое бы содержание не вкладывалось в понятие целого, целостного или органически целостного, нетрудно доказать, что резкой грани между целостными и нецелостными объектами не существует. Можно, вероятно, построить ряд, в котором объекты будут расположены в зависимости от степени целостности, и если понятие система закрепить лишь за наиболее целостными объектами, то все прочие выпадут из сферы системных исследований. Анализ положения в отдельных науках, в том числе в экологии, показывает, что фактически объекты исследования часто бывают в малой степени целостными. Получается, что в этих случаях не придется ждать помощи от системного подхода и от использования сегодняшних и грядущих достижений общей теории систем. Такое положение значительно снизило бы роль системных исследований.

С нашей точки зрения, экологам должно импонировать представление о том, что системой можно считать любой объект. При этом следует признать, что существуют принципиально различные классы систем, а следовательно, необходима классификация систем, в частности, по степени целостности. Последнее требует выработки меры целостности. Вероятно, полезно было бы использовать также понятие *степени изоморфизма* систем: системы одного класса (например, в отношении целостности) должны считаться более изоморфными.

Разбив системы на классы по комплексу признаков, мы обнаружим, что различия между основными классами существенны, т. е. системы различаются не только количественно. С этим придется считаться и в рамках общей теории систем: системы, относящиеся к отдельному классу, имеют как общие для всех систем признаки, так и особые признаки систем данного класса. Соответ-

ственно и способы исследования систем должны подразделяться на две группы: общие принципы, касающиеся всех систем, и более конкретные методы (показатели, способы их измерения), имеющие силу при изучении систем одного класса. Означает ли подобный подход «растворение» системных исследований в специально-научных? Думается, что нет, поскольку в каждый из классов попадут подобные в системном отношении объекты, но совершенно различные по тому, какие субстраты или процессы составляют фактически данную систему. Другими словами, изоморфными могут быть системы, изучаемые в разных областях науки, и, следовательно, системные исследования остаются, в соответствии с замыслом, межотраслевыми.

Таким образом, сопоставляя подход к выбору объектов исследования, осуществляемый экологами, с позицией философов, решающих, какими объектами следует ограничиваться при проведении системных исследований, мы приходим к следующему заключению: сначала было подмечено, что многие объекты исследования представляют собой изоморфные системы, и возникло стремление разработать общую теорию систем. Далее обнаружилось, что объекты исследования могут существенно различаться, в частности, в отношении целостности. Это привело к дилемме: либо признавать системами только целостные объекты (но тогда останутся за бортом все прочие объекты), либо считать системами любые объекты (но в этом случае системы предстают лишь относительно изоморфными, следовательно, системные исследования усложняются). Поскольку исследовательская активность в различных областях науки распространяется на любые объекты, желателен второй вариант решения вопроса. При этом вопрос об изоморфизме систем можно рассматривать в такой плоскости: все системы в некоторой степени изоморфны, причем более изоморфны системы одного класса. В частности, изоморфизм в пределах классов целостных и суммативных систем больше, нежели изоморфизм всех систем вообще.

Теперь я хочу рассмотреть вопрос: целостны ли объекты исследования экологии? В ряде работ, посвященных системному подходу, большое значение придается категории целого. Нередко философы ссылаются на объекты экологии, как на примеры органически целостных систем. Попытаемся описать объекты, изучаемые экологией, под таким углом зрения, чтобы логики, философы, системники могли более детально использовать экологический материал при изучении целого.

Общепризнанным примером (и причиной возникновения категории) органически целого является организм (живая особь, индивид). Какие бы различия не существовали в подходе отдельных авторов к определению системы, все единодушно признают организм системой. Рассматривая систему «особь» как объект исследования, можно изучать структуру, организацию, поведе-

ние, развитие особи и т. д.— все эти вопросы обращены, по существу, *внутрь* системы. При изучении поведения организма мы ближе подходим к оценке его взаимодействия со средой, но среда здесь рассматривается только как источник сигналов или помех, так что поведение организма всецело определяется внутренней организацией и состоянием самой особи.

Обращаясь к экологии особи, мы встречаемся с иной ситуацией, хотя это не всегда ясно осознается. В общем случае экология особи изучает взаимоотношения особи со средой, т. е. происходит перемещение внимания с внутренних для организма связей и процессов на внешние, так что объектом исследования становится система «организм — среда». В этом случае затруднительно представить всю систему как вещественный объект: границы «среды», как вещественного компонента системы, оказываются расплывчатыми. Для эколога это не имеет большого значения, поскольку исследуются прежде всего процессы, а *субстраты* учитываются в той мере, в какой это необходимо в связи с неразрывностью существования субстратов и процессов.

В некоторых упрощенных ситуациях «среда» может иметь и конкретное вещественное выражение. Например, эколог экспериментально исследует процесс питания организма, предложив ему определенное количество корма. Здесь изучается система «организм — пища», причем пища предстает в виде конкретного вещественного компонента системы.

Организм, популяция, сообщество суть живые системы. Экология исследует объекты типа «живая система — среда». Кроме того, экология изучает и некоторые объекты типа «живая система» (причем как самостоятельные объекты). Такими являются сообщества различной сложности. Эта двойственность объектов исследования в экологии объясняется следующими причинами: в исходном определении «экология изучает взаимоотношения организмов со средой» понятие организм допускает двойное толкование.

1. Можно принять, что речь идет о живых системах любой сложности (от особи до сообщества), тогда объектами экологии нужно считать системы типа «живая система — среда» (т. е. экосистемы).

2. Можно принять, что речь идет прежде всего об особи. В этом случае взаимоотношения данной особи с другими толкуются как отношения со средой (с «биотическими факторами» среды). Отсюда легко вывести следствие, что и взаимоотношения популяций, составляющих сообщество, также суть объект экологии. Практически экология охватывает и структуру сообществ, поскольку эта сторона, необходимая для понимания взаимодействия компонентов сообщества, остается в большой мере вне поля зрения других биологических наук. Оба пути выбора объектов исследования были фактически реализованы, что и привело к описанной ситуации.

Возникает вопрос: какие из объектов, изучаемых экологией, можно считать целостными? Эколог (вообще — биолог), привыкший иметь дело с дискретными единицами живой материи — особями, основным критерием целостности склонен считать наличие вещественных *границ*. Этот подход совпадает с обычным, «житейским» представлением о целом, согласно которому куча камней (излюбленный в философии пример суммативной системы) — целое, хотя бы потому, что имеется в виду *вся* куча камней, в ее естественных границах. Песчаная дюна — целое, но участок ровного пляжа — не целое, потому что этот участок не имеет естественных границ. Подобное «житейское» представление о целом, по-видимому, отвергнуто философами, но используется в специальных науках.

Исследуя явление или процесс, его стремятся охватить «в целом», т. е. в естественных границах. Как этот подход реализуется в экологии сообществ? Прежде всего физическая среда (поверхность земли, толща вод и т. п.) делится на качественно различные участки (биотопы), выделяемые в их естественных границах. Каждый из биотопов представляет, с позиции эколога, целое. Все живые организмы, населяющие биотоп, являются *пространственно целым* объектом — сообществом. Заметим, что выделенное таким способом сообщество ни в коем случае нельзя считать суммативной системой.

Исследуется структура выделенного сообщества и существенные связи между его компонентами (существенными считаются связи, влияющие на распределение и обилие данного компонента). Наконец, оценка структуры, функционирования и, отчасти, развития сообщества завершается. После этого эколог определяет, в каких взаимоотношениях данное сообщество находится с соседними сообществами. Это дает возможность установить границы *функционально целого* сообщества — биоценоза, т. е. относительно автономной живой системы, которая существует за счет энергии солнца и не нуждается в поступлении извне энергии в виде органического вещества. Таким образом, система считается целостной не вообще, а в определенном отношении. Границы функционально целых и пространственно целых сообществ могут не совпадать. К примеру, пространственно целое сообщество троглобионтов (население пещеры) обязательно окажется компонентом какого-либо биоценоза (функционально целого), поскольку троглобионты нуждаются в поступлении извне органического вещества. Большая целостность функционально целых сообществ очевидна, но отказаться на этом основании от исследования пространственно целых сообществ нецелесообразно, да и невозможно по методическим причинам и потому, что априорно невозможно оценить границы функционально целостных сообществ — биоценозов.

Мы уже упоминали о том, что с позиции примитивного понимания целого определение вещественных границ системы типа

«живая система — среда» представляется затруднительным, и потому такие объекты не представляются вещественно целостными. Но теоретически возможно при изучении подобного объекта охватить *все виды связи* живой системы со средой и тем самым достигнуть целостности в исследовании *процессов*.

Мы пытались показать, что бытующие у философов представления об организмической целостности объектов экологии несколько преувеличены. С одной стороны, многие объекты экологии невозможно считать органически целыми (за исключением живых систем типа популяции, биоценозов и, вероятно, экосистем типа биогеоценоза). С другой стороны, все объекты исследования эколога рассматривает в определенном отношении (и в определенной степени) целостными. Таким образом, решение проблемы соотношения понятий: *целое — система — объекты системных исследований* будет иметь серьезное значение для экологии, в том смысле, что будет установлено, насколько системные исследования затрагивают экологию.

Комментарий

Развитие системного подхода в экологии началось в несколько иных формах и позже, чем в других областях биологии. Однако мотивы, вызывающие это развитие и, насколько сейчас можно судить, его основные черты, были теми же, что и в других отраслях знания. Черты сходства в развитии системного подхода в классической биологии и экологии определялись в первую очередь тем, что экологические объекты, как и большинство других в биологии, представляют собой множества взаимосвязанных элементов. Поэтому системные модели, как правило, развивались по мере выявления и исследования все новых и новых элементов и связей. Это сопровождалось движением науки, с одной стороны, в глубь объектов, на нижележащие уровни организации, а с другой — вверх по лестнице организации, на более высокие уровни.

В качестве примера сходного развития системной картины объекта в классической биологии и экологии сравним возникновение модели вида и биоценоза.

Вид первоначально представлялся простым множеством, состоящим из совершенно одинаковых и как будто бы никак между собой не связанных элементов — организмов. С появлением в биологии идеи развития пришло понимание того, что организмы вида связаны между собой историческими связями — общностью происхождения. Так возникла первая системная модель вида как множества взаимосвязанных элементов. Однако исторические связи — это реликт когда-то протекавших процессов. Сами эти процессы в такой историко-генетической модели вида отражены не были. Следующая системная модель того же множества организмов появилась благодаря тому, что в поле зрения попали актуальные генетические связи между организмами — половое скрещивание. Эта первая актуально-генетическая модель «живого» вида отражала не только идею историзма, но и действующий механизм эволюции.

Необходимость системного подхода к виду диктовалась тем, что, в отличие от организма, он не выделен самой природой в непосредственно видимой и четко отграниченной от среды форме физического тела. Трудность построения системной картины вида определялась тем, что внутривидовые

связи далеко не были очевидны и требовали для их выявления и анализа методов и средств довольно развитой науки.

Необходимость применения системного подхода в экологии обусловлена теми же причинами, что и в случае с видом. Главные экологические системы — биоценозы и биогеоценозы — не даны исследователю непосредственно в виде зримых и хорошо оформленных тел, подобно организму. Хотя они столь же реальны, как и организм, в отличие от организма их можно «видеть» лишь концептуально. Поэтому системный подход был по сути дела единственно возможным средством изучения экологических объектов.

Трудности, возникающие при их выделении и описании, в принципе те же, что при выделении и описании вида. После того, как стали известны элементы этих экологических множеств, построение соответствующих системных изображений зависело от обнаружения и анализа связей между их элементами — организмами разных видов и организмами и факторами абиотической среды. Но именно связи организмов друг с другом и окружающей средой и были наименее доступны исследованию. Естественно поэтому, что недостающие прямые сведения о связях восполнялись сначала косвенными сведениями. Таковые можно получить, наблюдая одно из внешних проявлений связи — совместную встречаемость («сопряженность») тех или иных экологических элементов. Наибольшее развитие получили косвенные методы регистрации связи при анализе сообществ организмов. Для этого были разработаны и соответствующие методы — показатели «сопряженности». Одним из таких методов является сопоставление ожидаемой встречаемости, которая принимается равной случайному распределению видов, и реально наблюдаемой встречаемости разных видов сообщества.

Однако оценка межорганизменных связей на основе фактора совместной встречаемости безусловно является косвенным и потому недостаточным методом. Действительно, регистрация совместной встречаемости в более или менее сложных системах ничего не говорит о том, как именно осуществляется связь друг с другом, т. е. ничего не говорит о структуре этого сложного единства, тогда как именно это и имеет наибольшее значение для построения системной схемы объекта. Поясним это следующей схемой. Пусть на одном и том же субстрате (С) обнаружены одновременно два разных организма — А и В. Если триада элементов $A \leftrightarrow B \leftrightarrow C$ встречается постоянно, то можно предположить существование по меньшей мере четырех вариантов их связи друг с другом (см. на стр. 130 рис. 1, I — IV).

Поскольку речь идет о двух принципиально разных группах элементов — организмах и абиотических факторах, то какова именно схема их связи друг с другом, имеет первостепенное значение для построения модели такой системы.

В начале своего пути экология строила модели биоценозов в основном на базе единства «организм — среда»: в биоценозе объединялись организмы, совместно занимающие и использующие выделение донных биоценозов как группировок, обитающих на разных грунтах. Однако анализ таких сообществ показал, что они подбираются не столько благодаря действительным связям друг с другом (рис. 2, I), сколько по принципу наименьших помех друг другу, т. е. в общем безотносительно к межорганизменным связям (рис. 2, II — стр. 130).

Поскольку организмы, входящие в состав таких групп, связаны с определенным субстратом (D), их можно считать реально существующими системами, в которые естественно входит и соответствующий субстрат. Однако возникал вопрос: являются ли такие системы единственными или хотя бы основными реальностями, представляющими интерес для экологии?

Развитие экологии ответило на этот вопрос отрицательно. Как только внимание исследователей было обращено на действительные связи между организмами, биоценозы стали вырисовываться в другой системной плоскости: $A \rightleftharpoons B \rightleftharpoons C$, а их единство стали называть биогеоценозом (или экосистемой). В дальнейшем, по мере того как расширялись исследования собст-

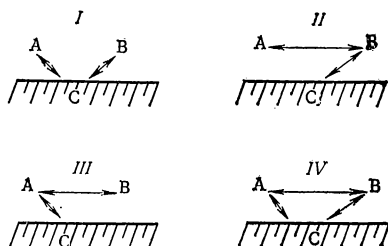


Рис. 1

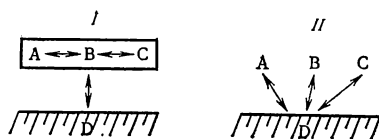


Рис. 2

венно процессов связи, т. е. переноса вещества, энергии или информации в сообществах, представления об их структуре и функционировании существенно изменились и конкретизировались, приобретая все большую общность с системными представлениями организменной биологии.

Среди многих известных сейчас межорганизменных связей в сообществах наиболее очевидной и доступной исследованию была группа связей типа «хищник — жертва», т. е. поедание одних другими. Эти связи были замечены и стали изучаться прежде остальных. На основе их анализа в экологии сформировался и стал одним из центральных так называемый трофодинамический подход. Он дал представление сначала об отдельных трофических связях между парами организмов, а затем позволил описывать все более и более сложные схемы связей такого типа. В результате с неизбежностью обнаружили такие важнейшие свойства экологических систем, как целостность, устойчивость, способность к целесообразному реагированию на внешние воздействия. Хотя системные свойства биоценозов, основанные на связях «хищник — жертва», описаны далеко недостаточно, и развитие трофодинамики, несомненно, будет продолжаться, сейчас уже вполне отчетливо обнаружилась теоретическая ограниченность картины, которую может дать такой подход. Об этом говорил в своем выступлении Я. И. Старобогатов. По его мнению, наступающий кризис трофодинамического подхода в экологии определяется тем, что он охватывает далеко не все типы межорганизменных связей. Особенно это относится к связям нетрофическим (например, сенсорным). Однако до самого последнего времени трофодинамика не рассматривала также весьма обширную группу «нехищных» трофических связей, основанных на передаче через среду растворенных и газообразных метаболитов. Связи такого рода особенно существуют в водных сообществах, где они образуют весьма сложные и разветвленные сети, в принципе подобные сетям, в основе которых лежит связь «хищник — жертва».

Таким образом, системная модель биоценоза, а соответственно и биогеоценоза, начавшая формироваться в рамках трофодинамического подхода на основе анализа отношений типа «хищник — жертва», дополняется постепенно новыми системными изображениями, и этот процесс, по-видимому, будет продолжаться. В частности, к трофическим системам должны быть добавлены системы, построенные на сенсорных связях.

Очевидно, что развитие системной интенции в экологии не является чем-либо уникальным. Оно напоминает аналогичные движения в других областях знания. В этой связи уместен вопрос: разработала ли экология собственную логику и методологию системного подхода к своим объектам и в какой мере она может использовать сейчас опыт других дисциплин, в том числе небологических, ставящих аналогичные системные задачи?

Что касается первой части вопроса, то приходится признать, что, следуя биоценозы и биогеоценозы, экология следовала и продолжает сле-

довать своей уже сложившейся логике и методологии. Не исключено, что при этом непроизвольно вырабатываются и используются элементы некой новой *собственно системной* методологии. Однако в осознанном виде такого движения еще не существует. В то же время опыт общесистемных исследований еще недостаточен, чтобы он мог быть эффективен в экологии. Общей теории систем в собственном смысле не существует. Разрабатываемые сейчас методы формального описания систем далеки от того, что необходимо экологии на нынешнем этапе ее развития.

Почти несомненно, что по мере решения этих частных проблем в экологии должны появиться и более общие системные задачи, требующие особой методологии. Что же касается ближайших системных задач, то они в принципе довольно просты и, по-видимому, могут решаться на основе уже имеющегося в экологии опыта. В рамках любой трофодинамики первой задачей такого рода является качественное описание конкретных систем связей в биоценозах. Аналогичная проблема существует и в биогеоценологии. А. А. Малиновский не случайно подчеркивал, что, по его мнению, качественный анализ биологических систем остается пока важнейшей целью исследования. Действительно, если иметь в виду хотя бы одни только биоценозы, то придется признать, что качественное описание систем межорганизменных связей в них все еще очень неполно, а некоторые типы систем не описаны даже приблизительно.

Вторая задача, возникающая по мере качественного анализа экологических связей, — их количественное описание в понятиях переноса вещества энергии или информации. Отдельные отношения типа «хищник — жертва» в сообществах уже давно рассматриваются количественно. Однако удовлетворительного количественного анализа сложных систем связей пока еще нет, и серьезные попытки провести его еще только начинаются. Что касается отношений нехищного типа, то они изучены с количественной стороны гораздо меньше, а сенсорные связи практически не изучены.

Третья задача связана с описанием структуры экологических систем (за неимением лучшего определения мы будем понимать под структурой единство элементов и связей). Структура биоценозов выражается количественно пока в основном в категориях биомасс разных видов, что далеко не отвечает требованиям функционального подхода к структурам. Такое положение в экологии соответствует общему отставанию количественной структурной биологии. Характерно, что и в терминологии, касающейся структуры, до сих пор существует большая неопределенность: даже основные понятия — «структура», «строение», «организация» — определяются разными исследователями по-разному или не определяются вообще. Это показала и настоящая дискуссия.

Поскольку экология не решила еще перечисленных задач первого плана, она, естественно, не занималась разработкой аппаратов для формализованного описания своих объектов как со стороны функции, так и тем более со стороны структуры. Существует, правда, несколько попыток выразить количество организации в сообществе на языке теории информации. Однако количественный анализ, не сопровождаемый качественным описанием связей в изучаемых сообществах, дает сравнительно скромные результаты. Интуитивно ясно, что при одном и том же количестве организации в системах степень их организованности (удельная организованность) может быть различной; и наоборот, при одной и той же степени организованности двух или нескольких систем они могут иметь разное общее количество организации. Поскольку критерий удельной организованности отсутствует (нет даже ясного различия «степени» и «высоты» организации), вопрос о сравнении систем остается открытым, так как путем сравнения одного только общего количества организации разных объектов трудно получить достаточно интересные выводы.

Э. Г. Юдин. Мы исчерпали намеченную программу. В каких-то пунктах она оказалась перевыполненной, хотя в других, быть может, подтвердились не все первоначальные ожидания. Не торопясь с анализом результатов нашей работы по существу — для этого нужно более основательно познакомиться с материалами нашей встречи, — мне бы хотелось уже сейчас сформулировать самую общую предварительную оценку этого совещания.

По-видимому, эта оценка не может быть однородной. В самом деле, с одной стороны, мы заслушали целый ряд интересных выступлений и получили богатейший материал для размышления о том, что такое системный подход в биологии, в каких направлениях его обязательно нужно развивать, в каких — желательно, а в каких — не нужно или даже бесполезно развивать. С другой стороны, нужно признать, что мы, по-видимому, не сделали какого-то решающего шага в приобретении ясности относительно самого существа системного подхода в биологии. Все были согласны в том, что этот подход необходим, что он открывает для биологии новые возможности. Но что он представляет или по крайней мере должен представлять как таковой — на этот счет мы пока получили лишь пищу для ума.

Вероятно, было бы наивным рассчитывать на иной результат в этом отношении, точно так же, как наивно полагать, будто на каком-то совещании, пусть даже самого высокого уровня, непосредственно создаются конструктивные идеи глобального характера и будто именно в этом и состоит задача таких совещаний. Наверное, самая большая польза от самого хорошего совещания определяется прежде всего тем, что его участники вдруг осознают, что точка зрения каждого из них вовсе не так естественна и безусловна, как ему казалось, что можно находить иные очень интересные пути к решению и даже постановке тех же проблем, отправляясь при этом от других исходных предпосылок. В этом смысле наша работа вполне заслуживает положительной оценки.

Мне кажется, что один из важнейших моментов нашей встречи состоит в последовательном проведении, я бы сказал, самой высокой методологической позиции. Правда, в некоторых выступлениях улавливалось стремление толковать систему как нечто абсолютное: дескать, есть система «как таковая», и задача исследователя — узнать, какова она «на самом деле». Однако в подавляющем большинстве случаев подчеркивалось, что эффективное исследование системного объекта невозможно без осознания и учета позиции исследователя и его специфической задачи. Наиболее четко этот методологически очень важный тезис был сформулирован в определении системы, данном Л. А. Блюменфельдом. Развитие этого тезиса приводит к выводу, что при исследовании сложного объекта перед нами находится не одна реальность, то

есть не только сам по себе изучаемый объект: мы не просто должны получить анатомию системы, или ее морфологию, или ее функциональное описание, или даже знание о структуре системы; перед нами находится и другая действительность — исследователь и имеющиеся у него логические, понятийные, инструментальные и прочие средства. Если принять это во внимание, то исследование такой сложной реальности, какой является биологическая реальность, — это проблема, успех в решении которой зависит в равной мере от того, насколько удачно схватываем мы сам объект, и от того, насколько мы осознаем зависимость этого схватывания от имеющихся у нас понятийных и других средств. Если говорить на языке философии, то здесь важны как онтологическая, так и теоретико-познавательная стороны проблемы.

Эту сторону дела имеет смысл подчеркнуть, потому что в настоящее время — и это хорошо было видно на фоне нашего совещания — основным препятствием на пути к тому, чтобы мы от смутных представлений о системном подходе перешли к какому-то эксплицитно выраженному представлению, опирающемуся на необходимое богатство понятийных средств, — является как раз отсутствие таких средств. Именно поэтому системный подход на нынешней стадии его развития в биологии — это скорее совокупность хороших устремлений, чем то, что можно было бы назвать в собственном смысле теорией биологических систем.

Я намеренно формулирую тезисы так резко. Здесь, как мне кажется, никто не склонен обольщаться тем, что достигнуто. Все мы понимаем, что сейчас идет работа, так сказать, заготовительного порядка, и такой ее характер был очень полно выявлен нашей встречей. Но тем более важно подчеркнуть это обстоятельство: раз мы собрались для постановки проблем, то надо делать это с максимальной резкостью. К этому есть и еще одно основание. Я имею в виду тот факт, что иногда проявляется тенденция называть системными именами вещи, которые в общем-то давно устоялись в биологии и за ее пределами; при такой позиции системный подход легко может выступить как форма пустозвонства около науки, а не средство реального развития самой науки. К счастью, на нашей встрече такая позиция почти не получила выражения, и это можно занести всем нам в актив.

Я полагаю, что сам по себе положительный характер общей оценки этой встречи позволяет глядеть в будущее если и без слишком большого оптимизма, то с некоторой надеждой. Мне думается, что такие локальные встречи можно было бы сделать некоей системой — не слишком назойливой, но и не слишком спорадической.

В заключение я хотел бы от имени участников встречи поблагодарить всех, кто помогал ее подготовить и провести. Прежде всего я имею в виду А. А. Малиновского и Н. В. Тимофеева-Ресовского, сделавших глубокие и содержательные доклады.

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

В выступлениях участников встречи-дискуссии было поставлено много самых разных вопросов. Не претендуя на какое-то окончательное суждение по ним, нам хотелось бы провести хотя бы предварительную систематизацию и попытаться наметить ближайшие перспективы развития системных исследований в биологии.

Одним из центральных пунктов обсуждения явилось понятие биологической системы и возможные подходы к его определению. Сопоставляя определение системы, данное Л. А. Блюменфельдом (читатель легко заметит, что это определение явилось продуктом предшествующего обсуждения проблемы), с многочисленными другими определениями этого понятия, имеющимися в литературе, нам хотелось обратить особое внимание на два весьма существенных момента. Это, во-первых, указание на неделимость элементов в рамках *данной* системы, во-вторых, введение в это определение параметра времени.

Первый из этих признаков очень важен в том отношении, что он переводит в иной план проблему общего подхода к системе. Принцип неделимости элемента в рамках данной системы рельефно подчеркивает беспочвенность поиска единой, универсальной для всех случаев и задач системы с абсолютно неделимыми, простыми элементами. Иными словами, он разрушает возможность чисто онтологического подхода к системным объектам: то, что выступает в качестве элемента на одном уровне рассмотрения, т. е. применительно к вполне определенной системе, на другом уровне (т. е. в других связях) и при других задачах само может быть рассмотрено как система. В общепhilософском плане такой подход еще раз показывает неосновательность классического атомизма, опирающегося на постулат абсолютной неделимости исходных элементов — «кирпичиков» мироздания. С точки зрения стратегии научного исследования этот принцип очень важен практически: как подчеркнул Н. В. Тимофеев-Ресовский, именно фиксация неделимости является условием строгости исследования.

Значительный интерес представляет и введение временных параметров в определение системы. Важно подчеркнуть, что речь

при этом идет не о специфически биологическом времени, которому в последние годы посвящается огромная литература, а о той разновидности времени, которая, пожалуй, еще не была предметом сколько-нибудь обстоятельного обсуждения и которую можно назвать *системным временем*. Обсуждение показало, что без учета временных характеристик невозможен анализ по крайней мере некоторых проблем системного подхода в биологии. Однако эта новая и важная область исследования еще ждет своей разработки. О том, какие возможности таятся здесь, свидетельствует выступление А. М. Молчанова.

К вопросу об определении системы тесно примыкает проблема принципов выделения некоторого объекта или множества объектов в качестве системы. По-видимому, эта проблема не является общебиологической, во всяком случае, на уровне организма как системы она вряд ли возникает (хотя и здесь возможны предельные случаи, когда проблема приобретает значительную сложность, например, при анализе явлений симбиоза). На всех же других уровнях проблема выделения объекта в качестве системы становится одной из центральных. В частности, в экологии, даже когда мы имеем дело с относительно простыми связями, выделить систему в некоторой реальности — дело довольно сложное. Здесь завязывается большой узел интересных проблем, от решения которых в значительной мере зависит успех системного исследования.

Естественно, что обсуждение системной проблематики оказалось связанным с вопросом о структурных уровнях биологических систем. Для системных исследований этот вопрос не нов. Может быть, некоторый новый свет на него проливает подход с точки зрения неделимости элементов системы, который имплицитно предполагает не только множественность уровней системного рассмотрения, но и определенную их иерархию. В то же время еще ждет обстоятельного обсуждения вопрос о критериях, на основе которых осуществляется выделение уровней, поскольку все предложенные до сих пор схемы отмечены известной печатью произвольности.

В ряде выступлений обсуждалась крайне важная для системного подхода проблема связей. Дело в том, что большинство понятий системного подхода на нынешнем уровне их развития таковы, что их трудно подвергнуть внутреннему расчленению, без которого они не могут выполнять роль эффективного орудия исследования. Таковы, например, понятия функционирования, развития, целостности системы. Хотя все они в той или иной мере применяются при характеристике систем, однако очень быстро обнаруживается, что у них не очень велик запас конструктивных возможностей, обеспечивающих движение по предмету исследования. Вместе с тем не очень ясно, по крайней мере сейчас, каким образом разворачивать эти понятия, вычленивая такие их компо-

ненты, которые позволили бы использовать их хотя бы в сравнительно-сопоставительном анализе, не говоря уже об использовании их в процедурах количественного анализа. В этом отношении выгодно отличается понятие связи. В нескольких выступлениях было показано, что оперирование этим понятием открывает достаточно богатые возможности для анализа биологических систем. Это связано с тем, что понятие связи допускает возможность внутреннего расчленения и построения определенной типологии связей.

Один из вариантов такой типологии был предложен А. А. Малиновским. Ю. М. Свиричев очень удачно выделил основание этой типологии, показав, что связи здесь различаются по их «силе». А. А. Малиновский вводил это различие в контексте разрабатываемой им теории структур. В этой связи возникает еще одна сложная и интересная проблема, частично уже затронутая в комментарии к соответствующему разделу стенограммы. По-видимому, предстоит не только более точно определить то место, которое занимает теория структур в системных исследованиях, но и внести ясность в соотношение таких понятий, как «система», «структура», «организация», «упорядоченность» и им подобных. Как показало обсуждение, сейчас до такой ясности еще далеко.

Наконец, последнее. Проблематика системного подхода разрабатывается не только в биологии. Системные исследования все шире развертываются в психологии, лингвистике, социальных исследованиях, в различных областях техники. Обобщенные представления о системах и принципах их исследования с позиций диалектического материализма разрабатываются в сфере философского и логико-методологического анализа. Это ставит вопрос о взаимосвязи соответствующих исследований. Материалы встречи-дискуссии показывают, что развитие системных исследований в биологии с необходимостью приводит к постановке общенаучных проблем системного подхода и в то же время является одним из плодотворных путей решения этих проблем. В этом смысле едва ли можно согласиться с тезисом, согласно которому теория систем должна строиться отдельно и независимо для каждой дисциплины, изучающей сложные объекты. По-видимому, гораздо ближе к истине те, кто считает, что первостепенное значение имеет разработка общенаучных методов и принципов исследования систем и структур.

По нашему убеждению, разработка всех этих вопросов и определяет ближайшие перспективы развития системных исследований как в биологии, так и в других «заинтересованных» науках.

ТЕОРИЯ СИСТЕМ И БИОЛОГИЯ

(переводы с английского)

ТЕОРИЯ СИСТЕМ И БИОЛОГИЯ: ТОЧКА ЗРЕНИЯ ТЕОРЕТИКА¹

М. МЕСАРОВИЧ

Введение

Существует значительное расхождение во мнениях относительно того, что представляет собой системный подход в биологии. Одни усматривают суть этого подхода в применении определенной методики и средств для измерения и анализа сигналов (так называемая био-инструментация), что непосредственно связано с биотехникой, занимающейся применением «инженерных принципов» для изучения биологических проблем. Для других системный подход есть поиск некоторых общих биологических законов, которые управляют поведением и развитием живой материи, — аналогично тому, как это происходит с физическими законами и неживой материей. (Иногда считают, что последняя точка зрения выражает позицию философии науки [1, 2].)

Мы будем рассматривать системный подход как использование теории систем для изучения и объяснения биологических явлений. Поэтому предметом рассмотрения этой статьи будет теория систем, а более точно, способность теории систем выработать концептуальные основы и методы объяснения биологических явлений.

Основные предпосылки и принципы теории систем в их отношении к биологии

Мы обсудим некоторые аспекты теории систем, представляющие особый интерес для биологии. В частности, мы рассмотрим основания теории (общую теорию систем), проблему телеологического

¹ *Mihajlo D. Mesarović. Systems Theory and Biology—View of a Theoretician.— «Systems Theory and Biology». Ed. by M. Mesarović. N. Y., 1968, p. 59—87. (Сокращенный перевод Б. Г. Юдина).*

объяснения (целенаправленное поведение) и вопрос об иерархичности, или многоуровневости систем.

Что такое теория систем? Существует два подхода к объяснению того, что такое теория систем. В первом случае имеют в виду различные ветви теории систем, которые разработаны в настоящее время в достаточной степени, — такие, как теория систем управления, теория автоматов, теория информационных систем и обработки информации, теория игр и т. д. Другой, более прямой путь состоит в построении возникшей сравнительно недавно общей математической теории систем, лежащей в основе этих дисциплин [3—5]. Мы пойдем по второму пути, поскольку для оценки как потенциальных возможностей, так и ограниченности теории систем в ее приложении к биологии, необходимо прежде всего уяснить основы данной теории. Возможность создания на основе этой теории понятийного аппарата и рабочей методологии биологических исследований можно оценить, лишь сделав предметом рассмотрения общую теорию систем.

Можно предложить следующее краткое определение теории систем: *теория систем есть теория формальных (математических) моделей реально существующих (или концептуальных) систем.*

Следует отметить две важные особенности приложения теории систем, прежде всего к биологическим проблемам: а) при построении моделей систем обычно (но не обязательно) используют понятия: «информация», «обработка и передача сигналов», а также «принятие решений» («управление», «целенаправленность»), т. е., иначе говоря, такие, которые относятся к организационным аспектам биологических явлений (это означает, что теория систем смыкается с кибернетикой, или теорией связи и управления [6, 7]); б) свойства формальных моделей систем могут исследоваться с помощью математической дедукции или путем моделирования их на вычислительных машинах.

Концептуальную основу теории систем можно охарактеризовать следующим образом. Изучение любого реального явления проводится в двух аспектах — неформальном, имеющем дело со значением, интерпретацией, пониманием, целями, ценностями и т. п., — и формальном, рассматривающем форму (структуру), в котором существенно лишь соотношение между атрибутами. Теория систем имеет дело со вторым, формальным аспектом исследования. Очевидно, что формальные соотношения инвариантны к природе рассматриваемых явлений.

Теория систем основывается, кроме того, на следующих фундаментальных предпосылках: *в основе теории любого реального явления (биологического и иной природы) лежит некоторый образ, называемый моделью; формальные инвариантные аспекты модели, если для них не устанавливаются какие-либо ограничения, представляют собой математическое отношение. Это отношение бу-*

дем называть системой. Обоснование этих предпосылок дано в приложении I.

Система (т. е. математическая модель реального явления) описывается обычно посредством системы уравнений, например, разностных уравнений, дифференциальных уравнений и т. д. Для того чтобы понять сущность основ теории систем, важно учесть, что система уравнений только описывает данную систему и что между системой и системой уравнений, используемых для ее (конструктивной) спецификации (описания), можно провести четкое различие.

Рассмотрим простой пример. Предположим, что измеряются два атрибута A_1 и A_2 . Предположим, что наблюдение показало, что A_1 принимает значения из множества $V_1 = \{0, 1, 2, 4, 7\}$, а A_2 — из множества $V_2 = \{2, 5, 8, 14, 23\}$. Для построения модели, связывающей эти два атрибута, недостаточно раздельного измерения переменных: нужно также знать, какие значения величин появляются одновременно, т. е. в любом данном эксперименте. Предположим, что в рассматриваемом примере наблюдаются следующие пары значений:

$$(2.1) \quad \begin{aligned} s_1 &= (0,2); & s_2 &= (1,5); & s_3 &= (2,8); & s_4 &= (4,14); \\ & & & & & & & s_5 &= (7,23). \end{aligned}$$

Каждая из этих пар полностью описывает эксперимент в отношении выбранных атрибутов A_1 и A_2 . Явление же в целом представляет собой совокупность всех пар, т. е.

$$(2.2) \quad S = \{s_1, \dots, s_5\}.$$

S является математической моделью, которая характеризует рассматриваемую систему. Для того чтобы понятие системы S оказывалось полезным средством исследования, необходимо построить конструктивную процедуру (алгоритм), которая позволяет получить описание более эффективное, чем простое перечисление всех пар значений анализируемых переменных. Рассмотрим уравнение

$$(2.3) \quad x_2 = 3x_1 + 2,$$

которое определено для любого действительного значения x_1 . Сопоставив (2.1) и (2.3), мы приходим к очевидному выводу, что уравнение (2.3) может быть использовано для конструктивной спецификации системы S ; если переменная x_1 принимает любое значение атрибута A_1 , то значение x_2 , полученное из уравнения (2.3), дает значение атрибута A_2 .

Этот пример показывает два важных достоинства теории систем, поскольку речь идет о ее применении в научном исследовании.

1. Для того чтобы построить систему (математическое отношение), которая описывает (является моделью) рассматриваемое явление, необходимо: (α) выбрать наблюдаемые атрибуты A_1, \dots, A_n ; (β) определить (путем экспериментов или с помощью допущений) значения, которые могут принимать эти атрибуты, т. е. задать соответствующие атрибутивные множества V_1, \dots, V_n ; (γ) указать комбинации значений атрибутов, которые наблюдаются в любом эксперименте; (δ) соединить воедино все эти комбинации (для всех проведенных экспериментов), для того чтобы представить рассматриваемое явление как систему. Говоря математическим языком, система S является отношением, определенным на множествах V_1, \dots, V_n , т. е. S есть (собственное) подмножество декартова произведения множеств

$$(2.4) \quad S \subset V_1 \times \dots \times V_n.$$

Из выражения (2.4) видно, что система является совокупностью упорядоченных n -к из множеств V_1, \dots, V_n .

2. Для того чтобы система, полученная в результате применения процедур, указанных в (I), была полезным инструментом научного исследования, необходимо иметь (эффективную) конструктивную спецификацию (конструктивный анализ) S . Такая спецификация обычно имеет такой вид, что по некоторым заданным ее атрибутам (входам, причинам) можно легко определить некоторые другие атрибуты системы (выходы, следствия).

Спецификация такого типа называется входной-выходной (терминальной) спецификацией системы; она моделирует поведение биологических систем, в основе которого лежит схема стимул — реакция. Более сложным типом конструктивной спецификации системы является целенаправленная спецификация, которую мы коротко рассмотрим в следующем разделе.

Необходимо провести четкое различие между системой и ее конструктивной спецификацией. В рассмотренном примере конструктивная спецификация задается в виде численного (разностного) уравнения. Таков действительно наиболее часто используемый, традиционный тип конструктивной спецификации. Однако очевидно, что спецификация может осуществляться также и другими путями, например, с помощью нечисленных процедур, алгоритмов или даже путем моделирования на вычислительных машинах. Таким образом, для любой данной системы может существовать большое число различных конструктивных спецификаций. Например, выше рассмотренная система может быть также конструктивно описана с помощью многозначных логических функций (хотя это описание и является более сложным). Некоторые примеры построения моделей в биологии приведены в приложении II.

После того как система (математическая модель) создана и дана ее конструктивная спецификация, задача теории систем заклю-

чается в изучении свойств данной системы (путем математической дедукции или с помощью моделирования). Методология системного подхода в биологии состоит из следующих этапов: а) формализация (абстракция) — построение системы S и получение конструктивной спецификации для S ; б) дедукция — исследование свойств системы S с использованием дедуктивных методов; в) интерпретация — изучение значений полученных (дедуктивно) свойств системы в их отношении к рассматриваемому биологическому явлению.

Описанный процесс применения теории систем в общем случае является, конечно, скорее рекурсивным, чем задающим строгую однозначную и единственную последовательность действий. Действительно, в исследовании часто интересуются лишь определенными типами свойств биологических систем и поэтому атрибуты выбирают таким образом, чтобы существование этих свойств можно было анализировать наиболее удобным образом. С другой стороны, часто выбирают (если возможны варианты) такую конструктивную спецификацию для системы, которая облегчает дедуктивное исследование интересующего свойства. Иначе говоря, на практике процедура использования теории систем предполагает ряд изменений в исходных предположениях (число атрибутивных множеств, типы конструктивной спецификации и т. д.), причем окончательный выбор формального каркаса определяется не только экспериментальными условиями, но также и возможностью получения в рамках теории систем нетривиальных результатов, которые могут быть использованы для описания интересующего нас свойства реальной системы. Например, если для исследователя представляют интерес вопросы стабильности системы, то чрезвычайно полезным оказывается ее описание с помощью дифференциальных уравнений; с другой стороны, если интерес представляют проблемы нахождения подсистем и декомпозиции системы, то более предпочтительными могут быть некоторые алгебраические модели.

Для того чтобы этому краткому обсуждению теории систем придать более точный смысл (особенно в связи с ее отношением к биологии), следует сделать некоторые дополнительные замечания.

1. По традиции для конструктивной спецификации систем принято использовать почти исключительно численные алгоритмы. Однако следует ожидать, что в ближайшем будущем для этой цели будут широко применяться нечисленные формальные средства. В основе этого лежат следующие причины. (а) Сложность. В силу исключительно большой сложности биологических систем математические модели, используемые для их системной спецификации, охватывают только важнейшие свойства биологических явлений, а многими специфическими деталями приходится пренебрегать. Для построения таких моделей можно использовать

алгебраические и топологические математические структуры. (б) *Индивидуальные вариации*. Хотя основная форма взаимоотношений между атрибутами, используемая в системном анализе, является, как правило, инвариантной к любому элементу из рассматриваемых множеств (популяций), фактические значения параметров в этих соотношениях зависят от индивидуальных характеристик каждого элемента. Если эта зависимость резко выражена, то нечисленные структуры особенно полезны для описания исходных причинно-следственных отношений, которые инвариантны для рассматриваемых популяций в целом.

2. Система может иметь много различных конструктивных спецификаций. Некоторые из них могут выявлять важные аспекты «специфически биологических механизмов», ответственных за наблюдаемое поведение. Однако более часто конструктивные спецификации выступают лишь как средства для эффективного описания экспериментальных данных, поэтому необходимо проявлять особую осторожность, чтобы избежать нежелательных биологических обобщений, сделанных на основе выбранной конструктивной спецификации.

3. Конструктивная спецификация может быть также задана с помощью понятий целенаправленного поведения. Этот подход более детально будет обсужден в следующем разделе.

4. Теория систем как теория математических отношений является, конечно, разделом прикладной математики. Отличие теории систем как дедуктивной дисциплины от чистой математики заключается в том, что в теории систем используются лишь определенные типы понятий, такие, как стабильность, адаптация, управление, обработка информации, самоорганизация и т. д., которые обладают определенным значением и имеют отношение к реальным (неабстрактным) системам. Отношение между теорией систем и биологией в этом смысле аналогично отношению между математической физикой и самой физикой.

5. Следует различать два аспекта теории систем: а) общая теория систем, которая имеет дело с процессом формализации, т. е. с введением формальных понятий — аналогов неформальных понятий, представляющих интерес в данной научной дисциплине, и с установлением базисных отношений между такими формализованными понятиями; б) различные специальные разделы теории систем (такие, как теория линейного управления, теория автоматов, теория оценок и т. д.), которые обладают более богатыми математическими структурами и используются в основном при осуществлении процессов дедукции.

В сфере прикладной теории систем общая теория систем может выполнять следующие важные методологические функции.

А. Модели, создаваемые на основе общей теории систем, могут быть использованы как первый шаг для получения детального представления реальной биологической системы. Общая теория

систем использует слабые математические структуры, которые близки к интуитивному значению используемых понятий. Такая модель может непосредственно вытекать из вербального описания экспериментальных данных. Этот тип исследования может преследовать две цели. Он дает возможность получить реальную оценку предположений, которые должны быть введены, если возникает необходимость использовать более структурированную математическую модель. Он также позволяет предложить новые эксперименты, чтобы решить, какая другая, более глубокая математическая структура адекватна рассматриваемой биологической системе.

Б. Общая теория систем способна создать основания для установления связей между различными научными областями, так как формальные понятия поведения (такие, как адаптация, эволюция и т. д.) определяются в ее рамках математически строгим образом и с использованием минимальных математических структур, и поэтому эта теория в наименьшей степени отражает специфические особенности реальных систем, от которых абстрагированы эти формальные понятия. Однако в настоящее время общую теорию систем нельзя еще считать достаточно разработанной. Информацию о прогрессе в этой науке можно найти в работах [8—12].

Роль специальных разделов теории систем заключается в обеспечении более глубокого понимания наблюдаемых явлений. Можно показать, что степень эффективности применения теории систем соответствует глубине нашего понимания рассматриваемых явлений, а следовательно, и глубине понимания теории систем.

Наконец, следует отметить, что приложения теории систем являются особенно эффективными, если они комбинируются с использованием методов моделирования. В этом случае грубая структура анализируемого явления задается в терминах общей теории систем, а детали поведения системы определяются с помощью моделирующих экспериментов. Здесь используется такая же методология, как и в системотехнике.

Теория систем и телеологический подход в биологии. Споры о роли и допустимости телеологического объяснения в биологии очень стары и все еще не решены. Фон Бруке (как свидетельствует В. Дэвис [13]) заметил, что «телеология — это леги, без которой ни один биолог не может жить, но стыдится показываться с ней на людях». Чтобы подчеркнуть, что телеологическое объяснение в биологии должно основываться на научной, а не на философской почве, Дэвис поддержал предложение К. Питендрая [14] использовать для обозначения телеологического подхода термин «телеонмия».

Теория систем проливает определенный свет на эти споры. Ее вклад касается формальных аспектов проблемы, что вытекает из математической природы этой теории. Как уже говорилось,

одной из важных проблем теории систем является построение конструктивной процедуры для системы (формальной модели), которая дает возможность при заданном входе (и состоянии) системы получить (или предсказать, если система не наблюдалась при этих условиях) ее выход. Для этого надо иметь такую конструктивную спецификацию системы (или даже вычислительный алгоритм), которая позволяет считать полученную модель системы удовлетворительной. Теперь сформулируем одну важную предпосылку теории систем:

Для целого класса ситуаций эффективная конструктивная спецификация систем может быть построена только в терминах целенаправленного (т. е. телеологического) описания; при таком описании базисный характер системы как математического отношения не меняется.

Целенаправленное описание предполагает использование всей гаммы системных понятий, выражающих цель поведения систем, таких, как адаптация, эволюция, управление, гомеостазис и т. д. Для обоснования сформулированной предпосылки рассмотрим лишь некоторые простые примеры. Прежде всего остановимся на формальных (математических) проблемах.

Пусть S — система со входом U и выходом M , такая, что элементы из U и M являются временными функциями, определенными на интервале (t_1, t_2) .

Пусть для любого $u(t) \in U$, $m(t)$ является такой, что интеграл \in

$$(2.5) \quad q = \int_{t_1}^{t_2} [m^2(t) + y^2(t)] dt$$

имеет наименьшее значение, и $m(t)$ связано с $y(t)$ заданным дифференциальным уравнением

$$(2.6) \quad \frac{dy}{dt} = f(y, m, u); \quad y(t_1) = a.$$

Если для данного начального условия $(y(t_1) = a)$ существует единственный минимум для каждого элемента данного множества U , то система S , очевидно, представляется функцией $S: U \rightarrow M$, так как для любого $u \in U$, m однозначно определено. Если решение этой вариационной задачи отсутствует в явном виде (например, если f есть нелинейная функция), то вариационная проблема *per se* является единственной конструктивной спецификацией для S . Если обратиться к представлению системы в терминах вход — выход, стимул — реакция, то мы вновь сталкиваемся с отображением U в M , т. е. характер данной системы как математического отношения не меняется. Однако все это имеет место только в том случае, если конструктивная спецификация S задается в терминах вариационного (целенаправленного) описания.

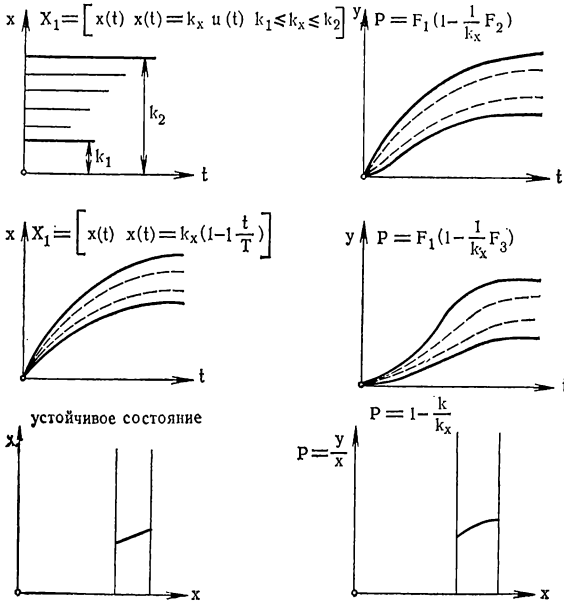
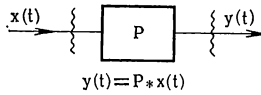


Рис. 1

В качестве другого примера рассмотрим некоторое явление с одной причиной (входом, стимулом) и одним следствием (выходом, реакцией) и попытаемся представить его в виде системы, т. е. посредством некоторой математической модели. Приложим вначале к системе множество шаговых воздействий X_1' (рис. 1) с амплитудами, заключенными в пределах от k_1 до k_2 . Пусть полный выход для любого данного воздействия из X_1' получается с помощью передаточной функции

$$(2.7) \quad P' = F_1 \left(1 - \frac{1}{k_x} F_2 \right),$$

где k_x — амплитуда входа, а F_1 и F_2 — линейные операторы. Очевидно, что эта система является линейной, однако ее реальная передаточная функция зависит от входа, точнее от его амплитуды k_x .

Приложим теперь к рассматриваемому явлению другое множество стимулов X_1'' , которые являются экспоненциальными.

функциями с временной константой T и с амплитудами, лежащими в пределах той же области (k_1, k_2). Предположим далее, что полный выход системы определяется передаточной функцией

$$(2.8) \quad P'' = F_1 \left(1 - \frac{1}{k_x} F_3 \right),$$

где F_3 отлична от F_2 . В этом случае зависимость поведения системы от входной амплитуды остается такой же, как и для класса стимулов X'_1 , однако динамика системы изменяется, хотя и остается линейной. Рассмотрим, наконец, условия устойчивого состояния. Входная-выходная характеристика системы является линейной, но смещенной от начала координат, так что характеристика роста оказывается экспоненциальной

$$(2.9) \quad P = \left(1 - \frac{k}{k_x} \right),$$

где k — константа.

На основе этих трех примеров можно сделать вывод, что поведение рассматриваемой системы оказывается зависящим от входа, т. е. отношение вход — выход зависит от вида входной функции (типов стимулов), а также от амплитуды входа. Для иного класса входных функций можно ожидать появления (и в действительности можно получить) передаточной функции другого типа. Создается впечатление, что полное описание характеристики стимул — реакция в данном случае невозможно и что можно получить лишь альтернативное описание различных классов стимулов. (Следует отметить, что это заключение как будто подтверждается в реальных экспериментальных ситуациях, где наблюдение «полного выхода» является невозможным, в частности из-за шумов и побочных воздействий, вследствие чего приходится иметь дело с аппроксимациями передаточных функций P, P', P'' и т. д., и, следовательно, природа зависимости этих функций от амплитуды и формы входа не может быть точно определена.)

Теперь мы можем сформулировать некоторые вполне резонные вопросы: какова структура внутреннего механизма, связывающего переменные стимулов и реакций, которая приводит к такому сложному и изменчивому поведению системы? Можно ли упростить описание характеристик стимул — реакция путем «открытия» соответствующей структуры внутреннего механизма системы?

Ответы на эти вопросы можно получить, используя представление о целенаправленной системе. Рассмотрим простой пример. Предположим, что некоторая система обладает структурой с обратной связью, как это показано на рис. 2, и ее поведение определяется следующими тремя условиями: процессом F_1 ; регулятором F_2 ; контрольной (базисной) переменной (целью) $r(t)$.

Реакция всей системы полностью описывается этими тремя условиями. Более того, такая спецификация является точной для

любого возможного входа (стимула), вне зависимости от его амплитуды или формы. Отсюда следует, что определив целенаправленную структуру (с обратной связью) «внутреннего механизма» системы и установив ее внутреннюю «цель» $r(t)$, можно заменить большое количество изменчивых характеристик связи стимул — реакция относительно простой спецификацией системы.

Нетрудно найти примеры в биологии, которые подтверждают это утверждение. Наиболее показательно в этом отношении изучение зрительной системы лягушки, проведенное Леттвином и др. [15]. Эти исследователи обнаружили, что наиболее эффективным способом описания физиологических данных является использование понятий, относящихся к выживанию, или, что более точно для данного случая, к поиску пищи. Они, в частности, установили, что срабатывание нейронных волокон прямо связано с такими параметрами, как размер объекта, находящегося в видимой области, перемещение объекта и т. д. Аналогичные примеры содержатся в работе фон Бекези [16], а также в ряде современных психофизических исследований. Такой же способ рассуждения может быть использован для объяснения того, почему исследование функций мозга на основе нейронных цепей не является пока достаточно обнадеживающим. Даже в том случае, когда отдельные нейроны могут быть смоделированы довольно точно (путем описания их непрерывного поведения, или посредством указания состояний «включен — выключен», или через отражение их электрической и химической деятельности), чрезмерно большое число нейронов и сложный характер их взаимодействия не дают возможности использовать описание системы в терминах входа и выхода (стимула и реакции) для построения достаточной конструктивной спецификации системы. В этом случае мы вновь вынуждены воспользоваться целенаправленным описанием системы (т. е. в терминах функций, а не структуры).

Рассматривая нервные системы как системы связи и управления, П. Вейс [17] отметил, что если «считать, что промежуточные состояния», которые передают сигналы, «не являются прямыми преобразователями входа в выход, то они сами наделяют себя автоматической деятельностью, присущей им вне зависимости от входа, — в этом непосредственно проявляется проблема координации во всей ее сложности».

Ситуации, аналогичные тем, которые были рассмотрены в этих примерах, достаточно часто имеют место при изучении биологических систем. Очевидно, что сказанное может оказаться особенно важным для сложных систем. В таких случаях целена-

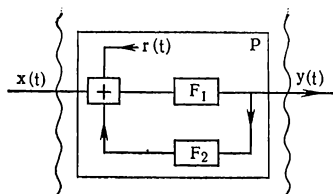


Рис. 2

правленный подход может представлять собой единственный путь, приводящий к конструктивной спецификации. В результате мы можем сформулировать вывод о том, что *причины, по которым в биологическом исследовании прибегают к телеологии, могут быть описаны чисто формальным образом.*

При использовании телеологического подхода, необходимость в котором вызывается чисто формальными причинами, в частности требованиями получения эффективного описания системы, необходимо иметь в виду также следующие соображения.

Прежде всего, целенаправленная структура, согласующаяся с имеющимися значениями стимулов и реакций, может не соответствовать биологическим компонентам и подсистемам, или во всяком случае не обязательно легко интерпретироваться в их терминах. Часто это происходит потому, что эти компоненты и подсистемы описываются на более низком биологическом уровне, чем тот, к которому принадлежит рассматриваемая система. В таких случаях необходимо быть исключительно осторожным, чтобы не использовать применяемую модель для нежелательных обобщений, особенно при биологической интерпретации формальных свойств этой модели. С другой стороны, при разработке *целенаправленного* описания системы нет необходимости исходить из известного описания ее компонентов и подсистем. Это описание может не отражать тех аспектов подсистем, которые относятся к поведению и важны при осуществлении целенаправленного описания системы в целом.

Структура целенаправленных систем. Аргументы, используемые для доказательства необходимости *целенаправленного* описания систем, могут быть применены и для обоснования важности детального (а потому и более сложного) представления внутренней структуры целенаправленных систем.

В последнее десятилетие управляющие системы с обратной связью использовались для описания ряда биологических систем. (Исследования подобного рода обсуждаются в статье Йетса и др. [18].) Модели этого типа обычно относятся к кибернетическим моделям. В большинстве случаев использовалось представление об однозначной обратной связи, хотя применялись также и некоторые относительно простые представления о системах с многопеременной обратной связью. При этом взаимодействие между подсистемами (контуры обратной связи) рассматривалось лишь в редких случаях, а цели и управляющие воздействия подсистем анализировались независимо друг от друга. Однако в общем случае в сложной целенаправленной системе существует иерархическая взаимосвязь между целями и подсистемами. Естественно, это относится прежде всего к биологии. Биологические системы являются, вообще говоря, многоуровневыми, многоцелевыми системами, и попытки представить их одноуровневыми (хотя и многопеременными) системами (или даже как системы с входом

и выходом) могут привести к модели, которая имеет смысл лишь для очень узкого диапазона условий. Ситуация здесь оказывается совершенно аналогичной дилемме представления системы через ее целенаправленное описание или с помощью описания через вход и выход. Если сложная иерархическая система представляется с помощью слишком упрощенной модели с однозначной обратной связью, то эта модель оказывается точной в весьма узких рамках.

Хорошим примером, показывающим необходимость представления системы с помощью многоуровневой целенаправленной модели, является изучение системы визуального слежения человека. Эта система может функционировать и как система с непрерывной обратной связью, и как дискретная система упреждающего типа, зависящая от окружающих условий (т. е. от типа входного сигнала, или стимула). Действительно, зрительная система может часто изменять свой способ действия в ходе данного эксперимента. Хотя обе эти модели в отдельности могут быть описаны довольно точно, более полное описание рассматриваемого явления (даже единственного эксперимента) требует введения двухуровневой целенаправленной подсистемы, функция которой определяется в основном характером действия подсистем более низкого уровня [19]. Аналогичное явление наблюдалось и при изучении слуховой системы человека [16].

Применение теории систем в биологии — прошлое и будущее

Возможности применения теории систем в биологии можно анализировать с различных точек зрения. Мы кратко рассмотрим лишь некоторые из них.

А. Тип биологических явлений. Этот аспект рассмотрения является основным в других статьях настоящей книги.

Б. Проблемы функций и структуры в биологических системах. Для решения вопроса о том, насколько полно используется теория систем в биологии, необходимо охарактеризовать тип рассматриваемых здесь проблем. В этой связи важными являются следующие типы исследований.

Изучение поведения (т. е. функции) биологической системы при изменяющихся условиях путем использования понятий и атрибутов, относящихся к одному и тому же биологическому уровню. Лучшим примером использования теории систем для анализа проблем этого типа является область физиологического управления. В этом типе исследований применение теории систем оказалось, по-видимому, наиболее плодотворным. Этому способствовали некоторые факторы: (α) Вопросы поведения (функций) биологической системы обычно формулируются для класса изменяющихся

экспериментальных условий, что представляет собой тип исследования, в наибольшей степени поддающегося рассмотрению с системной точки зрения. Действительно, если биологическое явление рассматривается в полной изоляции, то проводимые при этом эксперименты таковы, что все получаемые атрибутивные множества имеют лишь один-единственный элемент, а полученная в результате модель системы S состоит из единственного элемента, описывающего лишь связь между собой атрибутов данного единственного проявления (способа поведения) системы. Очевидно, что такой тип исследования не может извлечь никакой пользы из теории систем. С другой стороны, если биологическая система наблюдается при разнообразных условиях, то формальная система S достаточно богата для того, чтобы гарантировать успех применения к ней понятий теории систем. (β) Во втором типе исследований большую роль играет применение теории динамических систем управления, которая разработана лучше, чем другие разделы теории систем. (γ) Наконец, использование переменных, относящихся к тому же самому биологическому уровню, значительно облегчает биологическую интерпретацию полученных результатов.

Объяснение функционирования биологической системы, исходя из ее описания на уровне подсистем. Типичным примером подобного типа исследований являются попытки анализа функционирования мозга с помощью нейронных сетей. По сути дела здесь пытаются перейти от одного биологического уровня к другому, т. е. объяснить общее поведение системы в терминах поведения ее компонентов. При проведении таких исследований возникает сильный соблазн (который не всегда находит противодействие) интерпретировать полученные теоретические результаты таким образом, что это приводит к нежелательным обобщениям и к экстраполяции биологического значения и смысла на теоретические результаты, выходящие за рамки экспериментальных данных. Конечно, не только использование теории систем ответственно за это. Проблемы, которые требуют для своего анализа рассмотрения переходов между биологическими уровнями, являются наиболее трудными, и поэтому до сих пор мы практически почти совершенно не знаем, как должен совершаться переход с одного биологического уровня на другой (интересный анализ этой проблемы дает Брэдли [20]).

Более успешные попытки анализа переходов между биологическими уровнями содержатся в тех работах, где стремились найти прямые ответы на специфические, частные биологические вопросы и не занимались поисками общих принципов (см., например, исследование фон Бекези [16]).

Использование понятий теорий систем косвенным образом как определенного понятийного каркаса — для построения детального описания структуры биологической системы. Например, при изу-

чении образования ферментов понятие управления с помощью отрицательной обратной связи использовалось исключительно с методологической целью для получения понятия конечно-точечного торможения (end-point inhibition). В ходе исследования процесса образования ферментов в понятиях «вход — выход» четко проявилось наличие в этом процессе свойства саморегулирования. Таким образом, понятие отрицательной (и положительной) обратной связи оказалось здесь полезным инструментом для обнаружения структуры конечно-точечного торможения [21]. В последнее время для описания структуры механизмов управления ферментами предлагается более сложная модель обратной связи [22]. В некотором смысле понятия теории систем играют в приведенных примерах лишь роль своеобразного катализатора, однако при этом получают весьма значительные результаты.

В. Тип математических структур, используемых в моделировании. При изучении физиологических систем наиболее широко используются дифференциальные и разностные уравнения; при моделировании нейронных цепей — булева алгебра (логика). В последнее время, как мы указывали ранее, возрастает роль нечисленных методов моделирования; в этой связи следует приложить большие усилия для построения моделей, использующих алгебраические и общие топологические средства (по этому поводу см. [23]).

Б. Представление внутренней структуры системы. Многочисленные применения теории систем в биологии опираются на представление систем с помощью понятий «вход» и «выход» или посредством одноуровневой обратной связи. Хотя такой подход является вполне допустимым (особенно, когда он успешен), следует ожидать (как это было предположено нами ранее, что достаточно сложные биологические явления требуют более разработанного представления о их внутренней структуре (если мы стремимся получить более эффективное описание). В частности, может потребоваться многоуровневое (иерархическое) представление внутреннего механизма системы (см., в частности [24]).

Д. Математические модели и моделирование с помощью вычислительных машин. Моделирование явлений с помощью вычислительных машин является важной составной частью системного подхода в биологии. Такое моделирование не противостоит, а скорее дополняет использование в исследовании математических понятий. В предыдущем разделе мы провели различие между формальной системой S , которая является моделью биологического явления (и абстрактным математическим конструктом), и конструктивной спецификацией (т. е. алгоритмом), которая используется как для эффективного описания, так и для изучения свойств системы S (см. также [18, 25]). Моделирование с помощью вычислительных машин дает возможность строить богатые

конструктивные спецификации, далеко выходящие за пределы возможностей формальной математики. Общая методология прикладной теории систем включает следующие этапы: словесное описание экспериментов; создание модели на основе общей теории систем; детализация и развитие модели, построенной на основе общей теории систем, для более точного структурного математического описания рассматриваемого явления или для составления машинной программы и моделирования этого явления с помощью вычислительных машин (обе эти возможности могут с успехом рассматриваться как дополняющие друг друга пути более глубокого понимания рассматриваемого явления).

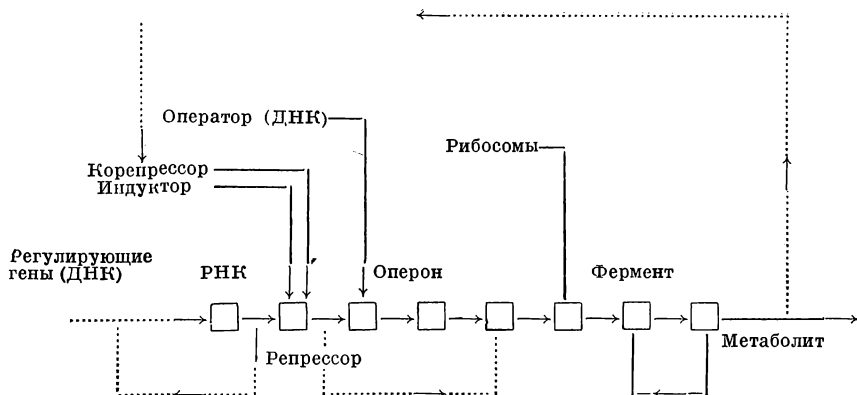
Отсутствующие связи между теорией систем и биологией

Несмотря на значительный интерес, который вызывает у биологов теория систем, и большие усилия, приложенные в этом направлении, применение теории систем в биологии все еще не соответствует нашим ожиданиям. Я хотел бы предложить на этом симпозиуме анализ причин такого положения дел и рассмотреть некоторые возможные пути дальнейшего развития.

А. Со стороны теории систем. Слишком часто говорится, но в действительности очень редко принимается во внимание, что теория и практика теснейшим образом связаны между собой, и ни одна из них не может успешно развиваться в отрыве от другой. Так, теоретики системного исследования склонны игнорировать это и обычно считают, что вся проблема заключается лишь в том, чтобы биологи знали и использовали теорию систем. Но я хочу подчеркнуть, что одна из основных причин разрыва между теорией систем и биологией заключается в том, что *теория систем не связана непосредственно с некоторыми из наиболее жизненных проблем биологии.*

Наиболее ярко это проявляется, как мне представляется, в хорошо известной проблеме сложности. Для иллюстрации проблемы сложности в биологических системах остановимся сначала на примере, взятом из низшего биологического уровня. Образование ферментов, протеинов и других веществ в клетке регулируется с помощью управляющих систем, аналогичных изображенной на схеме системе.

В этой системе корепрессоры или индукторы действуют как прямые сигналы; в то же время здесь существуют и сигналы отрицательной обратной связи от продуктов системы (так называемое конечно-точечное торможение). Эти два воздействия (прямой связи и отрицательной обратной связи) имеют, вообще говоря, различные скорости реакции. Рассматриваемая система, конечно, не находится в изоляции. Прежде всего следует отметить, что суще-



ствуют межклеточные взаимодействия. В обычной клетке имеется до 1000 систем, управляющих образованием различных ферментов; между этими системами существует множество взаимодействий (сильных и слабых) типа прямой связи (обычные индукторы или корепрессоры) или отрицательной обратной связи. Кроме того, те же самые управляющие процессы подвержены межклеточным воздействиям через такие явления, как контактное торможение и т. п. Таким образом, одни и те же ткани и органы соединяют управление функциями тысяч клеток (рис. 3, стр. 154). Полное поведение таких органов может быть описано с помощью управляющих (целенаправленных) систем (как это имеет место, например, в физиологическом управлении) на различных биологических уровнях. В результате оказывается, что биологическая система состоит из чрезвычайно большого семейства взаимосвязанных целенаправленных подсистем, компоненты которых также состоят из семейства взаимосвязанных целенаправленных систем, которые, в свою очередь, имеют целенаправленные компоненты, и т. д. вплоть до предельных единиц данного биологического уровня.

Очевидно, что при изучении таких систем огромную важность представляют следующие проблемы.

Взаимодействия. Возникающие в этой связи вопросы можно сформулировать следующим образом: как рассматривать взаимодействия между подсистемами одного биологического уровня и, кроме того, как учитывать эти взаимодействия, если система берется в изоляции. Конечно, биологи хорошо осознают важность этих взаимодействий. Цитируем Л. Полинга: «Жизнь есть взаимосвязь молекул, а не свойство какой-либо одной молекулы». К этому можно лишь добавить, что эти связи или взаимодействия необходимо наблюдать как во времени, так и в пространстве.

Многоуровневые (иерархические) организации целенаправленных подсистем. Биологи по традиции стремятся игнорировать воздействия на рассматриваемую систему подсистем более высоких и более низких уровней. Они делают это из-за опасности, хорошо известной многим из них. В то же время К. Гробстайн [26] утверждает: «Очарование, сила и будущее биологии заключается в исследовании

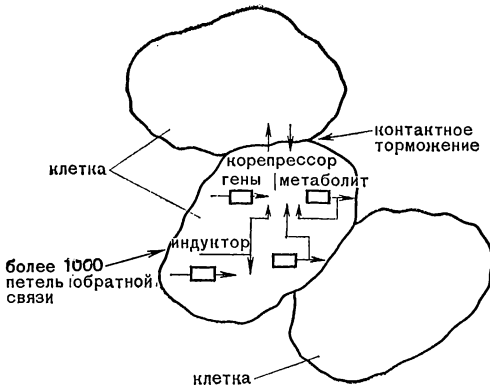


Рис. 3

перехода от молекул к их сообществам с апелляцией к средствам многоуровневого анализа», и дальше: «важнейшая теоретическая проблема биологии в ее точном смысле состоит в понимании процесса превращения свойств одного уровня в свойства следующего уровня; простая экстраполяция от уровня к уровню является логически несостоятельной». Следует подчеркнуть (см. [20]), что для прогресса в понимании сложных биологических организаций использование теории многоуровневых систем является совершенно необходимым.

Внутренние цели и эталоны. Выше мы говорили о важности целенаправленного представления биологических систем. Хотя в теории систем и существуют различные методы конструирования (в математическом смысле) отображений, описывающих преобразования входов системы в ее выходы, проблема определения внутренних эталонов, или целей, системы на основе внешних данных не поставлена еще полностью на формальную основу.

Названные три важные биологические проблемы не привлекли еще достаточного внимания теоретиков системного анализа. Несмотря на то, что в теории систем имеются значительные успехи при решении вопросов о том, как точным способом высчитать оптимальную траекторию некоторой системы, как на статистической основе определить лучшие значения параметров для линейных систем или какие функции поддаются вычислению с помощью определенных типов дискретных систем, перерабатывающих символы, и т. д., существует очень мало системных понятий и результатов теории систем, которые относятся к проблемам взаимодействий и многоуровневости и которые были бы достаточно сильными и важными для их использования в биологических объяснениях.

Что касается проблемы взаимодействия, то к настоящему времени проведены лишь предварительные теоретические исследова-

дования на этот счет [27, 28]. Необходимо сконцентрировать в этом направлении исследований большие усилия.

В области описания сложных биологических управляющих систем были сделаны попытки использовать статистические методы для описания совокупностей взаимодействующих управляющих систем [29]. Однако биологических аналогов для полученных в ходе такого исследования макроскопических переменных установить не удалось. Имеются некоторые намеки на то, что здесь может найти применение разрабатываемая в рамках общей топологии теория открытых систем [4, 8].

В самое последнее время достигнут некоторый прогресс в области теории многоуровневых систем. На основе детальных математических разработок теперь стало возможным сформулировать некоторые общие принципы организации многоуровневых систем. Некоторые из этих результатов и их биологические следствия рассматриваются в приложении IV. Конечно, степень полезности этих результатов для биологии нуждается в экспериментальном подтверждении.

Б. Со стороны биологии. Что является причиной разрыва между потребностями биологии и теорией систем, который характерен для настоящего времени? Ответ на этот вопрос достаточно прост: теория систем имеет дело в основном с проблемами, представляющими интерес для других наук (прежде всего для различных разделов техники), которые принципиально отличны от проблем, важных для биологии.

Прогресс может быть достигнут только путем более прямого и тесного сотрудничества между биологами и теоретиками, работающими в области теории систем. Реальный шаг на пути применения теории систем в биологии может быть сделан тогда, когда биологи начнут *задавать вопросы*, в основании которых лежат понятия теории систем, а не будут ограничиваться только использованием этих понятий для представления иным способом явлений, уже объясненных в терминах биофизических или биохимических принципов. *Фундаментальным для биологов является вопрос — можно ли рассматривать объяснение на базе теоретико-системных принципов как действительно научное объяснение в биологическом исследовании.* Рассмотрение этого вопроса влечет за собой следующие два важных утверждения:

1) научное объяснение может быть дано в терминах формальной математической модели, которая отражает в некоторой системе причинные соотношения, при этом нет необходимости использовать (или прямо ссылаться на) какие-либо физические законы или химические принципы (иногда этот тип объяснения формулируется в терминах обработки информации); 2) укоренившееся мнение о том, что научное объяснение должно быть обязательно количественным (и поэтому любая теория несовершенна, если она не является количественной) следует понимать таким образом, что в

научном объяснении вполне приемлемыми являются и просто точные математические соотношения, хотя и не выраженные в численном виде. Поэтому мнение о том, что факт в науке устанавливается только тогда, когда он основан на измерениях, означает лишь то, что для установления факта необходимо отождествить альтернативные проявления наблюдаемых атрибутов, а отношения между ними установить на формальной точной, но не обязательно числовой основе. Короче говоря, в научном объяснении нечисленные модели и отношения имеют равный статус с классическими численными моделями и понятиями.

Поскольку ответ на вопрос о применимости теоретико-системных объяснений в биологии является положительным (как я считаю), постольку биологам следует приложить больше усилий как для лучшего ознакомления с теорией систем (аналогично тому, как они знакомятся с физикой и химией), так и для формулирования своих вопросов в рамках этой теории. Тогда мы будем иметь дело не с «применением инженерных принципов к биологическим проблемам» (или биотехникой), а с *системной биологией*, имеющей свой определенный круг вопросов и право на самостоятельное существование.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Формальная теория и модели. Теорию систем мы представили в этой статье как дисциплину, имеющую дело в основном с определенными математическими структурами. Биолог (или любой другой специалист по естествознанию) может непосредственно проверить, не формулирует ли такая теория недопустимых ограничений, не подтверждаемых экспериментальными данными. Из-за недостатка места мы не будем специально рассматривать здесь данный вопрос. Однако он слишком важен, чтобы совсем его игнорировать. В качестве компромисса отметим лишь некоторые из наиболее важных моментов, которые необходимо учитывать при ответе на данный вопрос. Мы будем рассматривать эту проблему в более широком контексте, т. е. коснемся роли математической теории в науке в целом.

Мы попытаемся показать справедливость двух следующих утверждений.

1. Научной теории любого типа можно поставить в соответствие некоторую формальную (математическую) модель.

2. Представление такой формальной модели как некоторого математического отношения не накладывает каких-либо дополнительных ограничений на рассматриваемую теорию кроме тех, которые уже имеются в ее высказываниях, относящихся к экспериментальным данным. Поэтому правильное использование математических моделей не накладывает никаких дополнительных ограничений. (Конечно, степень полезности формальной модели для понимания рассматриваемых явлений зависит от того, какие выводы могут быть сделаны на ее основе, т. е. от «глубины» математической модели.)

Для подтверждения этих утверждений мы сначала выясним, какой смысл следует вкладывать в понятие теории. Наиболее подходящим определением понятия теории применительно к естественным наукам можно считать следующее: *теория представляет собой множество высказываний о данном, интересующем нас объекте* (т. е. о рассматриваемом явлении [30, 31]). (В естественнонаучные теории принято включать только такие высказывания, которые верифицируются экспериментальными наблюдениями, хотя

в них, как правило, включаются также некоторые высказывания, которые постулируются или принимаются без доказательства. Это делается для того, чтобы дополнить в некотором смысле множество высказываний, выводимых из экспериментов. В дальнейших наших рассуждениях мы предполагаем, что нам дано множество высказываний, составляющих рассматриваемую теорию, и не будем касаться вопроса об их верификации.)

Морфологический анализ понятия «высказывание» как лингвистической категории [31, 32] показывает, что основными составляющими высказывания являются *имена* и *функторы*; имена используются для обозначения объектов, а функторы — для образования высказываний путем комбинирования имен. В контексте биологического эксперимента данное имя обозначает некоторое проявление данного атрибута, и существует определенное множество имен во всем множестве высказываний, образующих теорию, которое обозначает все различные проявления данного атрибута. Очевидно, что такое множество имен соответствует множеству V_j , которое мы будем называть атрибутивным множеством. Это множество V_j рассматривается в общей теории систем как формальный объект [5]. Оно определяет все формы, в которых выступает некоторый атрибут данного объекта. Функторы в таком случае определяют взаимозависимость между атрибутивными множествами; иначе говоря, они определяют некоторую систему (т. е. отношение) формальных объектов. *Каждому множеству высказываний (т. е. каждой теории) соответствует (по крайней мере) одна формальная система.* Другими словами, если $V = \{V_1, \dots, V_n\}$ является семейством атрибутивных множеств, используемых в высказываниях, составляющих теорию, то сами эти высказывания определяют отношение

$$S \subseteq V_1 \times \dots \times V_n.$$

Чтобы показать обоснованность нашего второго утверждения, достаточно отметить, что формальная система обладает в общем случае такой структурой, которая определена высказываниями теории, и поэтому представление этих высказываний в форме математического отношения не накладывает никаких дополнительных условий или ограничений, которые не содержались бы в самой теории. Все, что теория систем способна дать, это — сделать явным формальное отношение (т. е. саму систему), которое имплицитно уже содержится в высказываниях теории. Польза, получаемая нами при осуществлении этой процедуры, заключается, несомненно, в тех выводах, которые оказываются возможны в рамках формальной системы и которые трудно получить, если иметь дело только с высказываниями самими по себе.

Таким образом, роль, которую общая теория систем играет для развития теорий реальных живых систем (даже слабо структурированных), может быть сопоставлена со значением введения булевой алгебры в классическую логику: хотя исследуемое содержание при этом не подвергалось изменению, эффективный новый формализм позволил провести более глубокий анализ и добиться более глубокого понимания проблемы дедукции.

Таким образом, применение теории систем начинается с формулирования высказываний о поведении реальной системы, затем вводится формальная система, фактически содержащаяся в этих высказываниях, и путем анализа поведения такой системы устанавливаются свойства реальных явлений, которые нас интересуют.

ПРИЛОЖЕНИЕ II

Процесс построения моделей в биологии. Мы коротко рассмотрим два пути построения понятия системы для описания биологических явлений. В первом случае речь пойдет о конечной системе, во втором, более традиционном примере, будет использовано понятие непрерывной во времени системы,

А. Для исследования цикла роста гидры выберем следующие атрибуты, имеющие значение для анализа этого процесса: A_1 — пища, A_2 — снабжение кислородом, A_3 — температура, A_4 — продолжительность дня, A_5 — состоящие животное.

Для каждого атрибута можно ввести атрибутивное множество, которое отражает экспериментальные условия. Например, предположим, что атрибутивное множество A_1 имеет только два элемента $V_1 = \{v_{11}, v_{12}\}$, где v_{11} означает, что количество пищи является достаточным, а v_{12} — что количество пищи недостаточно. Аналогично, V_2 может состоять также из двух элементов $V_2 = \{v_{21}, v_{22}\}$, обозначающих разные уровни снабжения кислородом. Для некоторых других атрибутов выбор соответствующих атрибутивных множеств не является таким произвольным. Например, атрибут A_5 имеет четыре следующих элемента $V_5 = \{v_{51}, v_{52}, v_{53}, v_{54}\}$, где v_{51} означает, что животное мертво, v_{52} — что размножение является бесполом, v_{53} обозначает самку и v_{54} — самца. Аналогично, для A_3 и A_4 мы имеем: $V_3 = \{v_{31}, v_{32}, v_{33}\}$; $V_4 = \{v_{41}, v_{42}, v_{43}\}$.

Теперь некоторый эксперимент можно описывать пятеркой элементов, по одному из каждого атрибутивного множества, например, $s_1 = (v_{11}, v_{22}, v_{31}, v_{42}, v_{52})$ или $s_2 = (v_{12}, v_{21}, v_{33}, v_{41}, v_{51})$. В результате мы можем ввести понятие системы S как множества всех пятерок элементов, описывающих один эксперимент, т. е.

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n, \dots\}.$$

Следует отметить, что существует много пятерок элементов, которые отсутствуют в S (например, v_{11} и v_{51} никогда не входят в S одновременно).

Б. В качестве другого примера рассмотрим систему, получаемую при моделировании некоторых аспектов управления дыханием.

Пусть выбранными атрибутами являются: A_1 — альвеолярная концентрация CO_2 ; A_2 — входной поток CO_2 ; A_3 — выдыхаемый выходной поток; A_4 — венозный отток; A_5 — артериальный отток. Для каждого из этих атрибутов предположим, что соответствующими атрибутивными множествами являются множества временных функций с временным интервалом на всем протяжении эксперимента $T = \{t: t_1 \leq t \leq t_2\}$, т. е.

$$V = \{v: v = x(t); t \in T\}.$$

В результате система S связывает между собой пять функций: $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$, $x_4(t)$ и $x_5(t)$, по одной для каждой наблюдаемой в эксперименте переменной. Таким образом, эксперимент описывается пятеркой наблюдаемых функций

$$s = (x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t), x_5(t)),$$

а система представляет собой отношение

$$S \subset V \times V \times V \times V \times V.$$

Конечно, для того чтобы сделать эту модель практически полезной, необходимо построить конструктивную спецификацию, т. е. алгоритм, указывающий, как можно конструктивно получить значения некоторых системных переменных, когда даны значения других системных переменных. Для рассматриваемого случая конструктивная спецификация задается уравнением

$$\frac{dx_1}{dt} = k_1(k_2 x_2 + x_4 - x_3 - x_5),$$

где k_1 и k_2 — постоянные. Если даны значения $x_2 \in V_2$, $x_3 \in V_3$, $x_4 \in V_4$ и $x_5 \in V_5$, то эта спецификация определяет элемент x_1 .

Следует отметить, что более развернутое представление системы требует более точной спецификации соответствующих атрибутивных множеств. В атрибутивных множествах присутствует, очевидно, много абстрактных временных функций, которые никогда не наблюдаются. Поэтому конструктивная спецификация не является самой системой, хотя между ними существует определенная связь. Обычно различие между ними не вызывает каких-либо трудностей, так как исследователь прекрасно понимает, что он занимается анализом реальной биологической системы и легко отличает ее от соответствующей спецификации. Но когда об этом различии забывают, возможны серьезные ошибки в интерпретации результатов экспериментов.

ПРИЛОЖЕНИЕ III

Некоторые основные понятия общей теории систем. Модели, создаваемые на основе общей теории систем, представляют собой первый шаг в процессе построения математических моделей экспериментальных данных. Они преследуют в основном две цели: а) создать возможность математического исследования экспериментальных наблюдений определенных явлений, которые в данный момент или плохо поняты, или слишком сложны для моделирования их посредством классических (достаточно богатых) математических структур; для явлений такого типа возможно построение моделей только со слабой математической структурой; б) способствовать построению точного языка, который может быть использован в диалоге между учеными на стыке классических дисциплин, использующих по традиции в качестве своей теоретической основы различные математические структуры.

В целях иллюстрации дадим определения некоторых понятий общей теории систем, представляющих особый интерес для биологии (более детальный анализ этих понятий дан в работах [4, 5]).

Состояние системы. Система есть отношение, т. е. $S \subset V_1 \times \dots \times V_n$ и в общем случае она может быть представлена также в виде двух сложных объектов — входа X и выхода Y , т. е. $S \subset X \times Y$.

Поскольку S является, вообще говоря, собственным отношением, то для данного ее входа может существовать несколько выходов. Это обстоятельство, как представляется, нарушает причинно-следственную связь, и для того, чтобы ввести ее вновь, прибегают к понятию состояния. Имеется несколько понятий состояния. Простейшее из них — так называемое глобальное (global) состояние. Задачей глобального состояния является преобразование отношения S в функцию, т. е. $S_z : Z \times X \rightarrow Y$, такое, что для каждого z и x , если $S_z(z, x) = y$, то (x, y) является парой в S .

Более специализированные понятия состояния (такие, как состояние в данный момент времени, пространство состояний и т. д.) требуют для своего введения дополнительных условий, налагаемых на множества X , Y и Z [5, 12].

Целенаправленные системы. Пусть S — система с двумя входными объектами M и U , т. е. $S \subset M \times U \times Y$. Такая система является целенаправленной (или, точнее, имеет целенаправленное описание), если заданы два отображения — функция достижения цели: $G : X \times Y \rightarrow Q$; функция удовлетворения: $T : U \rightarrow \pi(Q)$ и для каждого $u' \in U$, другой вход $x' \in X$ является таким, что значение функции достижения цели $G\{x', y'\} = q'$ есть элемент области удовлетворения T , т. е. $q' \in T(u')$.

Другими словами, для каждого $u' \in U$ система ведет себя таким образом, что ее деятельность, оцениваемая посредством G , удовлетворительна в смысле, заданном T .

Адаптивные системы. Существуют два способа введения понятия адаптивной системы. Первый из них использует описание системы через понятия входа и выхода (стимула и реакции), второй — целенаправленное описание.

Пусть S — описание системы в терминах входа и выхода, т. е. $S : X \rightarrow Y$. Для простоты предположим, что S — функция. Пусть A является так называемой адаптивной функцией $A : X \rightarrow \pi(Y)$, где $\pi(Y)$ обозначает мощность множества Y . Система S является адаптивной, если для каждого $x' \in X$ выход $y' = S(x')$ является элементом $A(x')$, $y' \in A(x')$. Другими словами, система адаптивна, если для каждого входа $x' \in X$ реакция системы находится в пределах, которые определены мерой адаптации.

Понятие адаптивной системы, выраженной в терминах целенаправленного описания, требует большего числа дополнительных условий; интересующийся читатель может обратиться к работам [33, 34].

ПРИЛОЖЕНИЕ IV

Некоторые направления развития теории многоуровневых систем. В последнее время проводится интенсивная разработка теории многоуровневых систем. Работы [11, 28, 36—38] дают возможность ознакомиться с этими исследованиями.

Эти исследования проводились в следующих направлениях: а) концептуальные проблемы реальных, живых многоуровневых систем [35, 28]; б) теория многоуровневых систем, создаваемая на основе общей теории систем [11]; в) методы вычислений с использованием теории многоуровневых систем (декомпозиция в математическом программировании [39]); г) динамические многоуровневые системы в неизвестной среде [38].

Разрабатываемая теория является в основном математической по своей природе, а основные мотивы ее построения вытекают из инженерных проблем и проблем человеческой организации. В то же время были предприняты попытки получения некоторых общих организационных принципов в терминах структуры многоуровневых систем. Есть надежда, что некоторые из этих принципов могут быть использованы при моделировании биологических систем, аналогично применению принципов отрицательной обратной связи для построения одноуровневых моделей. В частности, такие организационные принципы могут задавать систему гипотез относительно структуры многоуровневых систем, которые возможно использовать для проектирования экспериментов по разработке моделей сложных биологических систем.

Ниже мы коротко опишем только два таких принципа и отметим возможности их биологических применений.

Принцип избытка (недостаточности) взаимодействий. Рассмотрим двухуровневую систему (рис. 4), которая состоит из взаимодействующих целенаправленных (управляющих) систем на первом уровне, и одной целенаправленной системы на втором уровне. Нас будет интересовать следующая проблема: каким образом должны быть связаны два эти уровня, чтобы вся система в целом являлась гармоническим целым. Говоря более специально, мы рассмотрим следующую ключевую проблему: какая информация о поведении первого уровня необходима второму уровню для того, чтобы координировать деятельность на более низком уровне, и как осуществляется эта координация.

Для ответа на сформулированные вопросы необходимо принять некоторые специальные предположения. Из соображений простоты предположим, что цели на двух уровнях не находятся в конфликте, а дополняют друг друга в том смысле, что если все цели на первом уровне достигнуты, то тем самым обеспечено удовлетворение цели второго уровня (гармоническая взаимозависимость уровней [37]). В силу этого существует основа для гармонического поведения всей системы, и основным препятствием для совершенствования ее функционирования является незнание системами первого уровня будущего взаимодействия между элементами этого же уровня: элементы первого уровня не могут полностью предвидеть, какое действие на них могут оказать

другие элементы того же уровня, ибо в противном случае это потребовало бы немислимых по масштабам процессов принятия решений и гигантских вычислений. Для того чтобы достигнуть гармонического поведения всей системы, необходимо организовать процесс обмена информацией между уровнями системы следующим образом.

Система второго уровня воздействует на цель каждой из подсистем первого уровня, изменяя соответствующим образом выбранный координационный параметр (в рассматриваемом случае координационные параметры входят в характеристические функции систем первого уровня).

Решение о соответствующих значениях координационных параметров система второго уровня принимает на основе информации о взаимодействиях, получаемой от систем первого уровня. Говоря более точно, система второго уровня получает от элементов первого уровня запрос о «количестве» взаимодействий, которое хотели бы иметь элементы первого уровня. Это осуществляется следующим образом. Стремясь достичь свои собственные цели, каждая система первого уровня (дополнительно к своей собственной локальной управляемой переменной) рассматривает также и переменные взаимодействия как изменяющийся объект. Таким образом, решение проблемы целенаправленности для элементов первого уровня состоит в определении того, желательно ли увеличить или уменьшить имеющиеся в данное время взаимодействия. Эти запросы затем сообщаются элементу второго уровня и используются на втором уровне как основа для выбора значений координационных параметров. Более точно, система второго уровня регулирует координационные параметры в целевых функциях первого уровня таким образом (если не происходят дальнейшие изменения в окружающей среде), что запросы на увеличение взаимодействия уравновесились запросами на его уменьшение; взаимодействия на первом уровне балансируются в том смысле, что элементы, находящиеся на обоих концах данного канала взаимодействия, взаимодействуют в соответствии с их потребностями, как это обуславливается данными значениями координационных параметров.

Поэтому для того, чтобы система второго уровня была способна координировать поведение систем первого уровня, ей необходима лишь информация двух типов: а) запрос на изменение во взаимодействиях; б) зависимость целевых параметров от изменений во взаимодействиях. Это, конечно, значительно меньший объем информации, чем было бы необходимо для полного управления системой со стороны второго уровня. Детальное математическое исследование только что описанной двухуровневой структуры [37, 38] показало, что предлагаемая процедура координации приводит к достижению полной цели второго уровня. Этот математический анализ проводился в предположении, что цели обоих уровней описываются как стремящиеся к оптимуму. Можно ожидать, что для биологических многоуровневых систем характерны менее жесткие (строгие) требования, например, что координация в них имеет место только тогда, когда расхождение между запрошенными взаимодействиями выше определенного порога, и, следовательно, элементы второго уровня имеют своей задачей поддерживать баланс взаимодействий в определенных границах. Из этого вытекает следующее утверждение. *Гармоническое функционирование двухуровневых систем может быть достигнуто при наличии: а) множества переменных (или свойств) элементов первого*

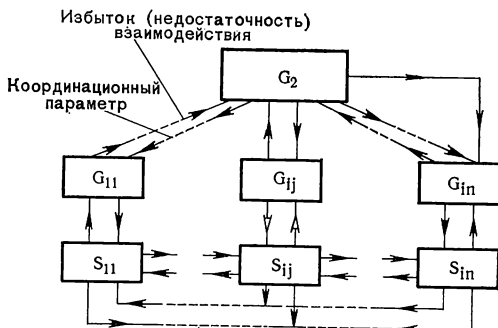


Рис. 4

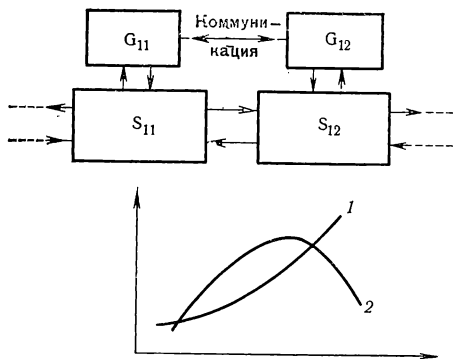


Рис. 5

уровня, которые указывают количество избытка или недостаточности взаимодействий (измеряемых степенью достижения локальных целей); б) механизма (по возможности распределенного по всей системе), который изменяет функции достижения цели элементов первого уровня (например, путем регулирования «точечного множества») таким образом, чтобы баланс взаимодействия сохранялся в данных границах.

Принцип оптимального уровня коммуникации. Другой пример обобщенного принципа, который формулируется на основе некоторых специфических системно-теоретических исследований, относится к проблеме коммуникации

между системами на одном и том же уровне. Вряд ли стоит подчеркивать важность проблемы коммуникации для сложных биологических систем. Как хорошо известно, существует определенная связь некоторых типов рака с нарушением коммуникации между клетками. Коммуникация между клетками осуществляется, вероятно, через специфическую ткань (или орган), при этом важная проблема заключается в том, насколько активной должна быть коммуникация для нормального функционирования сообщества клеток. Недавние исследования этой проблемы в рамках теории систем показали, что для определенных структур многоуровневых систем существует «оптимальное» количество коммуникации между подсистемами одного и того же уровня — оптимальное в том смысле, что дальнейшее увеличение в уровне коммуникации может ухудшить организацию всей системы в целом, т. е. общее функционирование станет хуже (рис. 5: 1 — первый уровень; 2 — второй уровень; ось абсцисс — уровень коммуникации; ось ординат — функционирование); в этом может проявиться тенденция к дезинтеграции системы. Из этого следует:

Избыточный уровень коммуникации, как и разрыв каналов коммуникации может приводить к дезинтеграции многоуровневой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bertalanffy L. An outline of general systems theory.—«The British Journal 2. for the Philosophy of Science», 1950, v. 1, No. 2.
2. Bertalanffy L. Problems of Life. N.Y., 1952.
3. Mesarović M.D., Eckman D. P. On some basic concepts of the general systems theory.—«SRC Report 1-A-61-1». Case Institute of Technology, 1961.
4. Mesarović M. D. Views on General Systems Theory. N.Y., 1964.
5. Mesarović M. D. On the Auxiliary Functions and Constructive Specification of the General Time Systems.—«SRC Report 85-A-66-33». 1966.
6. Wiener N. Cybernetics. N.Y., 1948 (Винер Н. Кибернетика. М., 1958).
7. Ashby W. R. Introduction to Cybernetics. N.Y., 1956 (Эшби У. Введение в кибернетику. М., 1959).
8. Mesarović M. D. New Directions in General Theory of Systems.—«Proceedings of Conference on Computer and Systems Science». London, 1965.
9. Birta L. A Formal Approach to Concepts of Interaction. Ph. D. thesis. Case Institute of Technology, 1965.

10. *Mesarović M. D., Birta L.* Synthesis of interaction in multivariable control systems.—«Journal of Automatica», 1963.
11. *Macko D.* General Systems Theory Approach to Multilevel Systems. Ph. D. thesis. Case Institute of Technology, 1967.
12. *Windeknecht T. G.* Mathematical Systems Theory: Causality.—«Mathematical Systems Theory». N.Y., 1967.
13. *Davis B. D.* The Teleonomic Significance of Biosynthetic Control Mechanisms.—«Cold Spring Symposium on Quantitative Biology», 1961.
14. *Pittendrigh G. S.* Behavior and Evolution. Yale University Press, 1958.
15. *Lettvin Y., Maturano H. R., McCulloch W. S., Pitts W. H.* What the frog's eye tells the frog's brain.—«Proceedings IRE», 1959, v. 47.
16. *Behesy von G.* Experiments in Hearing. N.Y., 1960.
17. *Weiss P. A.* Specificity in the Neurosciences.—«Neurosciences Research Symposium Summaries», MIT Press, 1966.
18. *Yates F. E., Brennan R. D., Urquhart G., Li C. C., Halpern W.* A Continuous Systems Model of Adrenocortical Function.—«Systems Theory and Biology». N.Y., 1968.
19. *Vossius G.* Die Vorhersageeigenschaften des Systems der Willkurbewegung.—«Neuere Ergebnisse der Kybernetik», R. Oldenbourg, 1967.
20. *Bradley D. F.* Multilevel Systems and Biology—View of a Submolecular Biologist.—«Systems Theory and Biology». N.Y., 1968.
21. *Jacob F., Monod J.* Genetic regulatory mechanisms in the synthesis of proteins.—«Journal of Molecular Biology», 1961, v. 3.
22. *Jacob F.* Teleonomic Mechanisms in Cellular Metabolism, Growth and Differentiation.—«Cold Spring Symposium on Quantitative Biology», 1961.
23. *Gann D., Schoeffler G. D., Ostrander Lee.* A Finite State Model for the Control of Adrenal Cortical Steroid Secretion.—«Systems Theory and Biology». N.Y., 1968.
24. *Mesarović M. D., Fleming D. G., Goodman L.* Multi-Level, Multi-Goal Approach the Living Organism.—«Proceedings of German Cybernetic Society». Karlsruhe, 1963.
25. *Kilmer W. L., McCulloch W. S., Blum G.* Some Mechanisms for a Theory of the Reticular Formation.—«Systems Theory and Biology». N.Y., 1968.
26. *Grobstein C.* Levels of Ontogeny.—«American Scientist», 1962, v. 50.
27. *Mesarović M. D.* Control of Multivariable Systems. N.Y., 1960.
28. *Mesarović M. D.* A Conceptual Framework for the Studies of Multi-Level Multi-Goal Systems.—«SRC Report 101-A-66-43», 1966.
29. *Goodwin B. C.* Temporal Organisation in Cells. N.Y., 1963.
30. *Curry H. B.* Outlines of a Formalist Philosophy of Mathematics. Amsterdam, 1951.
31. *Curry H. B.* Foundation of Mathematical Logic. N.Y., 1963 (русский перевод — Карпу Х. Основание математической логики. М., 1969).
32. *Church A.* Introduction to Mathematical Logic. Princeton, 1956 (русский перевод — Черч А. Введение в математическую логику. М., 1961).
33. *Mesarović M. D.* On self-organizing control systems.—«Proceedings of Symposium on Discrete Adaptive Systems», N. Y., 1962.
34. *Mesarović M. D.* A Unified Theory of Learning and Information.—«Proc. of 1 Computer and Information Science Sympos.», Washington, 1963.
35. *Mesarović M. D., Sanders J., Sprague C.* An Axiomatic Approach to Organizations From a General Systems Viewpoint.—«New Perspectives in Organization Research», N.Y., 1965.
36. *Mesarović M. D., Pearson J. D., Macko D., Takahara Y.* On the synthesis of dynamic multilevel systems.—«IFAC Conference», London, 1966.
37. *Brosilow C. B., Lasdon L., Macko D., Pearson J. D., Takahara Y.* Papers on multilevel control systems.—«SRC Report 70-A-65-25», 1965.
38. *Takahara Y.* Multi-Level Systems and Uncertainties. Ph. D. thesis. Case Institute of Technology, 1966.
39. *Lasdon L., Schoeffler J. D.* A Multi-Level Technique for Optimization. «Joint Automatic Control Conference». N. Y., 1965.

ТЕОРИЯ СИСТЕМ И БИОЛОГИЯ: ТОЧКА ЗРЕНИЯ БИОЛОГА¹

Т. Г. УОТЕРМАН

Введение

Определяя отношение биологии к другим естественным наукам, Уоррен Уивер однажды охарактеризовал предмет классической физики как организованную простоту, статистической механики — как хаотическую сложность, и биологии — как организованную сложность [60]. Из-за наличия многосторонней и высоко взаимосвязанной организации живые объекты требуют для эффективного изучения некоторой общей стратегии типа системного анализа.

Организмы представляют собой саморегулирующиеся, адаптивные системы, способные к самовоспроизведению. При этом они потребляют энергию из окружающей среды и используют ее для биологической работы. Термодинамически живые объекты действуют как необратимые химические машины. Но так как они саморегулирующиеся и адаптивные, важную роль играют управление и информация. Поэтому кибернетические механизмы должны обеспечить одновременно как основу для устойчивости организмов и динамических характеристик, так и адаптивность, необходимую для их выживания [56].

Вследствие этого для понимания биологических систем мы должны произвести анализ двух основных компонентов. Один из них включает в себя все элементы, связанные с потреблением, передачей и утилизацией энергии. Они позволяют организму расти, двигаться, в общем — производить работу. Другой компонент объединяет все элементы, обеспечивающие извлечение, обработку, хранение и использование информации. Это позволяет контролировать, что именно и как быстро должен делать организм. Оба компонента существенны для поддержания жизни и находятся в тесной взаимосвязи, совместно поддерживая устойчивое состояние.

¹ Talbot H. Waterman. Systems Theory and Biology—View of a Biologist.— «Systems Theory and Biology». N.Y., 1968, p. 1—37. Печатается с некоторыми сокращениями. (Перевод В. Е. Заики).

Хотя этот очерк касается в основном информационной стороны, однако для понимания всего кибернетического механизма существенно важен краткий анализ элементов, связанных с энергией, в силу того, что специфическая организация энергетического компонента сама по себе составляет основную часть управляющей системы. Более того, смысл существования кибернетического механизма заключается в стабилизации и сохранении энергетического компонента. Таким образом, адаптивность, управление, выживаемость и устойчивость являются различными сторонами одной и той же основной биологической характеристики.

Энергетический компонент. Рассматривая организм просто как химическую машину, можно воспользоваться редукционистским подходом, при котором способность живых систем к преобразованиям энергии объясняется в терминах термодинамики и химической кинетики [13]. Наиболее подходящей функцией состояния при таком анализе является свободная энергия (G) Гиббса, которая дает ключ к нахождению нескольких наиболее важных характеристик метаболической системы.

Например, направление спонтанного потока энергии в любой макроскопической химической реакции (включая подобные реакции в живых системах) зависит от отрицательного изменения G , согласно второму закону термодинамики:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (\text{при постоянном давлении и объеме}),$$

где Δ — изменение функции состояния, наблюдаемое в рассматриваемом процессе, H — энтальпия; S — энтропия; T — абсолютная температура. Размерность G и H — *кал/моль·град*. Такие спонтанные реакции являются экзэргическими и для протекания в обратном направлении требуют внешней работы. Таким образом, когда происходит эндэргическая реакция, сумма ее положительного ΔG и экзэргического отрицательного ΔG должна быть меньше нуля, чтобы реакция шла спонтанно.

Кроме того, G очень просто связывается с условием химического равновесия, при котором отсутствует направленный поток энергии, так как

$$\Delta G = -RT \log_e K,$$

где R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; K — константа равновесия. Более того, ΔG прямо определяет максимальную работу (W_{\max}), которую можно получить при спонтанной реакции, так как

$$\Delta G = -W_{\max} \quad (\text{при равновесии}).$$

Скорость потока энергии при реакции связана с удельной скоростью реакции k , которая в свою очередь зависит от ΔG^{\ddagger} , потребного для образования активированного комплекса, промежуточного между исходными веществами и продуктами реакции.

Более точно

$$k = \frac{RT}{Nh} \exp\{-\Delta G_{\ddagger}^{\ddagger} / RT\},$$

где N — число Авогадро; h — постоянная Планка. Каталитическое действие энзимов сильно воздействует на общую скорость реакции, уменьшая $\Delta G_{\ddagger}^{\ddagger}$, но не оказывая влияния на ΔG .

Хотя эти элементарные соотношения из химической кинетики и классической термодинамики обеспечивают хорошую основу для моделирования макроэнергетических процессов в организмах, они не приложимы полностью к системам, не находящимся в равновесии. Так как организмы являются фактически необратимыми системами, здесь должна использоваться неравновесная термодинамика, хотя эта область еще нуждается в глубокой разработке, подобной классическим работам Больцмана и Гиббса [30, 54, 41].

В рамках общего физико-химического анализа было найдено, что направление потока энергии через организм задается, главным образом, с помощью синтеза, накопления и использования высокоэнергетических фосфатных связей [29]. Действительно, основным достижением биологии и биохимии в первой половине XX в. было открытие этих явлений, обеспечивающих передачу энергии с помощью гликолиза, цикла трикарбоновой кислоты и системы переноса электронов. Основная схема этих процессов одинакова в ряду от аэробных микроорганизмов до высших растений и животных.

Кибернетический компонент. Обратимся теперь к кибернетическому компоненту, управляющие механизмы которого, очевидно, должны воздействовать на энергетический компонент жизни на всех уровнях организации от молекулярного до глобального. Понимание того, где и как действуют такие регулирующие системы, сегодня, несомненно, является главным вызовом биологии. Ниже будут рассматриваться, главным образом, физиологические управляющие механизмы у животных. Однако важно понимать, что полная биологическая система включает в себя генетические (включая, вероятно, регуляторы развития), синэкологические, а также эволюционные регуляторы. Хотя управление во всех этих четырех (или пяти) областях обнаруживает некоторые черты сходства, физиологическая регуляция имеет как наименьший масштаб времени, так и собственные специфические механизмы. Физиологическое управление включает и поддержание равновесия (гомеостаз, в понимании Уолтера Кеннона [7]), и обеспечение динамического серво-управления, проявляющегося в преследовании добычи или в адаптивной синхронизации периодов питания и спячки с сезонами года.

Но сам гомеостаз по природе динамичен, несмотря на его видимые отличия от серво-управления, при котором на входящий

сигнал следует ответ. Это связано с тем, что физиологическое равновесие не является ни простым пассивным сопротивлением изменению, ни простым следованием за внешними сигналами. В основном это получается из-за наличия компенсаторных приспособлений, активно программируемых в организме в ответ на общую поступающую информацию. Таким образом, несмотря на исключительную чувствительность к разнотипным изменениям, организмы поддерживают свое равновесие с замечательной тщательностью и точностью. Их выживаемость связана также с гибкостью общей регуляции, проявляющейся при повреждениях или ошибках в отдельных частях системы [9].

Системный анализ. Мощную методологию для разрешения такого кажущегося парадокса обеспечивает системный анализ. Не только в биологии, но и в инженерных и других приложениях системный анализ можно в самом общем виде определить как применение единой аналитической и моделирующей методики для объяснения сложных систем с многими переменными, многие функциональные компоненты которых могут быть вначале измерены недостаточно или даже почти не изучены. В зависимости от имеющихся данных и целей анализа может использоваться любой (или одновременно несколько) из широкого круга специальных методов, от использования теории информации и кибернетики до моделирования на вычислительных машинах и мультивариационного статистического анализа.

Хотя это может казаться слишком вольным определением путей продвижения науки, фактически при этом создается эффективный и усиливающийся ряд взаимосвязанных дисциплин, идущих своими путями к решению обсуждаемой грандиозной проблемы [46, 59, 57].

Исходя из самых общих соображений, можно дать следующее определение элементам, подлежащим управлению в биологической системе. Это переменные, существенные для непрерывной устойчивости системы, и в то же время переменные, которые могут быть вынужденно доведены при изменениях среды или других биологических факторов [1] до субоптимальных, а в более критических ситуациях — до недопустимых величин.

Для различных переменных, различных организмов и даже для различных состояний одного организма ширина оптимального пика значений существенных переменных и допустимая область изменений рассматриваемого «вынужденного» параметра могут изменяться в исключительно широких пределах. Кроме того, динамическая реакция переменных на принуждение может обнаружить большие и характерные различия, описываемые соответствующими кривыми или графиками Боуда (Bode) [38, 40]. Следовательно, и динамические реакции, и реакции устойчивости отличаются специфически не только по их отношению к входу, но также по последствиям для организма.

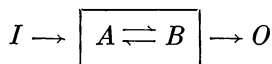
Чтобы эффективно сочетаться с контролируемой системой, обладающей такими чертами, необходимое управляющее устройство должно обладать соответствующей чувствительностью, скоростью реакции, точностью и стабильностью. При оценке общей характеристики такой системы, которая создается путем естественного отбора, определяющими факторами могут быть ее метаболическая и онтогенетическая «стоимость», а также филогенетическая вероятность ее существования. Хотя это обобщение кажется несомненным уже сейчас, измерение и даже идентификация важнейших параметров остается делом будущего.

Биологическое управление

При более детальном рассмотрении биологического управления становится ясным, что минимальным требованием является необходимость воздействия на контролируемую переменную двух антагонистических процессов, один из которых увеличивает или активирует элемент, а другой — уменьшает или подавляет его. В роли антагонистов могут выступать прямая или обратная реакция обратимого метаболического этапа или другие воздействия на тот же компонент, действующие в противоположных направлениях. На других уровнях антагонистами могут быть возбуждающие или тормозящие нейроны, соединенные в нервном поле центральной нервной системы, или сгибающие и разгибающие мышцы, противоположно воздействующие на соединение, подобное коленному суставу.

В зависимости от того, возникает ли регулирующее действие внутри самой контролируемой системы, или оно производится специальными механизмами, отличными от контролируемого компонента, но воздействующими на него, различаются два механизма управления. Их можно назвать, соответственно, внутренним (эндогенным) и внешним (экзогенным) управлением и иллюстрировать следующим образом.

Внутреннее управление. Рассмотрим сначала организм как элементарную открытую систему в устойчивом состоянии (A, B) с входом (I) и выходом (O):



Организм (A, B) как открытая система (вход I , выход O), поддерживающая себя в квази-стационарном состоянии. Эта минимальная модель показывает, как внутреннее управление определяется структурой системы. В ответ на возмущения непосредственно следуют реакции, возникающие в силу закона действия масс, принципа Ле-Шателье и т. д. В этом смысле внутреннее управление является встроенным, пассивным регулированием.

Само существование организма, организованного описанным способом, наделяет его определенными важными управляющими свойствами, которые являются внутренними. Это подтверждается законом действия масс и принципом Ле-Шателье. Последний гласит, что если в равновесной системе претерпевают изменения какие-либо рабочие параметры, подобные температуре и давлению, то вся система реагирует таким образом, чтобы уменьшить или свести к нулю результирующее смещение переменных в системе. В терминах действия масс вышеуказанная модель отвечает на увеличение скорости реакции $I \rightarrow A$ (которое вначале увеличивает A) увеличением скорости реакции $A \rightarrow B$ и снижением $B \rightarrow A$, что влечет за собой ускорение процесса $B \rightarrow O$.

Конечно, в любой реальной биологической системе каналы метаболических реакций значительно более сложны, имеют многоэтапов, пересекающихся, параллельных и расходящихся ветвей, а также петель положительной и отрицательной обратной связи [10]. Но даже в таких функциональных сетях скорости и направления гомогенных биохимических реакций определяются, в первом приближении, в соответствии с законом действия масс [8]. Действительно, очень хорошая модель поведения сложных метаболических систем, таких как гликолиз, была получена при решении на ЭВМ дифференциальных уравнений, основанных на законе действия масс [16]. Внутренние ответы на смещение системы практически контролируются механизмом этого закона, а также принципом Ле-Шателье.

Внутреннее управление не только включено в регулируемую систему, но может быть охарактеризовано как пассивное управление, в том смысле, что при данной физической и химической природе вселенной, плюс компоненты (включая $-\Delta G$ за счет субстрата или солнечной радиации) и организация живой системы [22, 42], нет необходимости в метаболической работе для поддержания устойчивости или возникновения характерных реакций системы. Хотя мы упоминали лишь о примерах внутреннего управления, связанных с термодинамикой и химической кинетикой, аналогичные пассивные регуляторные механизмы важны на многих уровнях.

Интересно, что на противоположном краю биологической размерной шкалы, а именно в синэкологии популяций [59], для объяснения внутренних управляющих механизмов были предложены модели, аналогичные закону масс [49, 16, 17], и статической механики [31]. Можно указать многочисленные примеры, относящиеся к промежуточным уровням, однако мы ограничимся двумя биомеханическими управляющими системами.

У водных животных нормальная пространственная ориентация может пассивно осуществляться внутренним управляющим механизмом, основанным на следующих морфологических свойствах. Центр плавучести и центр тяжести этих животных не совпадают,

но лежат на линии пересечения сагиттальной плоскости с некоторой вертикальной плоскостью, почти всегда дорзо-вентральной, идущей перпендикулярно оси тела [35, 12]. Аналогично этому при полете насекомых с фибриллярными летными мышцами частота взмахов крыла пассивно определяется механическими свойствами всей колеблющейся летящей системы [44].

Внешнее управление. Несомненно, пассивное внутреннее управление, если его механизм дифференцируется, требует от организма дополнительной метаболической работы. Этот расход энергии необходим для обеспечения целостности живого существа и требуемого уровня функциональной организации. Так, система полета насекомого управляется генетическими механизмами, действие которых проявляется в процессе развития, сохранения и восстановления. Все эти процессы включают в себя активные кибернетические компоненты, которые должны приводиться в действие метаболической работой и которые являются внешними, так как не входят в регулируемую систему.

Любой реальный организм имеет пространственную и временную иерархию взаимосвязанных механизмов управления, состоящую из замкнутых петель обратной связи, обычно с дополнительными замкнутыми петлями внутри основных, и связанную с контролируемой переменной. Элементы, связанные с биосинтезом, являются ключевыми в генетической системе и системе, управляющей развитием, а на молекулярном уровне таковыми являются нуклеиновые кислоты и энзимо-протеины. Молекулы ДНК способны к самокопированию, и в случае структурных генов могут также передавать содержащуюся в них закодированную информацию через РНК, чем достигается исключительно точный и специфический синтез ферментов. В свою очередь эти протеины в большой степени определяют, какие метаболические пути приемлемы для организма и какими могут быть скорости их специфических реакций (например, [61]).

Хотя этот прямой путь генетического контроля определяет внутренние функциональные свойства энергетического компонента, мы понимаем, что структурный ген управляется другими внешними механизмами, образующими кибернетические петли обратной связи вокруг него. С одной стороны, управляющий ген ДНК производит подавляющие или индуцирующие вещества, которые регулируют скорость транскрипции структурного гена [27], с другой стороны, известны субстраты или конечные продукты, соответственно индуцирующие или подавляющие специфический синтез энзимов. Ключ к механизму этих кибернетических молекулярных систем может находиться в протеинах, реакции которых изменяются посредством химической стимуляции [43]. Это ставит регуляторные механизмы биосинтеза, находящиеся в центре генетического контроля и управления развитием, в один ряд с другими внешними механизмами, взаимодействующими с

клеточными регуляторами, с нервной системой, нейросекрецией, эндокринной регуляцией [61] и поведением. Отношение всех таких внешних управляющих механизмов к энергетическому компоненту можно предположительно рассматривать как наложение внешних кибернетических элементов на внутренние элементы метаболической системы, где одна петля обратной связи включает другую.

На рис. 1 показано соотношение между внутренним и внешним механизмами управления. Последний представляет собой динамический регулятор, который реагирует на возмущение I , действующее на контролируемую переменную, и рождает корректирующую реакцию R , которая, в свою очередь, возвращает переменную к контрольному уровню. I_1 — вход субстрата; O_1 — выход метаболических отходов; I_2 — вход окружающей среды, вызывающий возмущение D , влияющее на реакцию $A \rightarrow B$; S — чувствительный механизм (сенсор), регистрирующий D ; M — интегратор, связывающий S с эффектором R , который рождает ответ, влияющий на реакцию $A \rightarrow B$, и определяет выход O_2 .

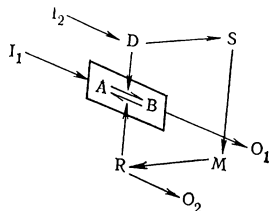


Рис. 1

Внешний механизм здесь организован таким образом, что любое изменение, действующее извне (I_2) на энергетическую систему, вызывает возмущение (D), которое воздействует на реакцию $A \rightarrow B$. Чтобы внешняя система управления функционировала, она должна обнаруживать D (или какое-либо воздействие D), что осуществляется с помощью чувствительного устройства (S). Последнее, в свою очередь, посылает сигналы в интегрирующий механизм (M), ответ (R) которого действует на реакцию $B \rightarrow A$ таким образом, чтобы уравновесить влияние D на реакцию $A \rightarrow B$.

В случае управления с помощью нервной системы чувствительный орган (S) может измерять D , передавать эту информацию в некоторую часть центральной нервной системы (M), где входящий сигнал сравнивается с нормальным, или стандартным, уровнем. Если есть различия, то возникают моторные команды, порождающие соответствующий ответ (R), который противодействует D до тех пор, пока входной сигнал чувствительного устройства не вернется к норме.

При управлении биосинтезом D может представлять собой увеличение субстрата i (D_i); D_i может обнаружить свое присутствие, изменяя уровень определенного протеина (S_i), который снимет депрессию транскрипции соответствующего структурного гена (M_i). В свою очередь это может вызвать или ускорить синтез катаболического энзима E_i , действующего на i так, что его утилизация (R_i) возрастает, тем самым уравнивая D_i .

Информационный поток. Выше мы видели, что энергетический компонент живых организмов можно лучше всего понять в терминах потока отрицательной свободной энергии Гиббса через систему. Аналогично, кибернетический компонент выявляется при рассмотрении потока информации. Наиболее подходящей для этого термодинамической функцией состояния является не G , а энтропия (S), что становится ясным из технического определения информации.

В 1948 г. Шеннон дал вероятностное определение информации (H), формально схожее с таковым Уилларда Гиббса в отношении статистической механики (см. [48]). Для данного ансамбля возможных сообщений, содержание информации в любом отдельном сообщении прямо связано с числом двоичных выборов, необходимым для отбора его из ансамбля. Таким образом, если имеется n равновероятных выборов, то содержание информации в каждом таком выборе есть $H = \log_2 n$, причем $1/p = n$, где p — вероятность выбора. Здесь среднее содержание информации в сообщении максимальное. Если же n выборов не являются равновероятными, то взвешенная средняя информация одного сообщения меньше и в битах определяется по формуле:

$$H = \sum_{i=1}^n p_i \log_2 \frac{1}{p_i} = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i,$$

где p_i — вероятность сообщения i , а $\log_2 \frac{1}{p_i}$ — информация, связанная с частным выбором².

В соответствии с определением энтропии p_i представляет собой вероятность нахождения системы в i -м состоянии:

$$S = -k \sum_{i=1}^n p_i \log_e p_i,$$

где k — постоянная Больцмана.

Таким образом, информация Шеннона является абстрактной мерой неопределенности или свободы выбора, независимо от объекта выбора, будь то сообщение или физическая система. Следовательно, она противоположна повседневному использованию слова информация, так как обычно имеют в виду скорее определенность, чем неопределенность. Информация в указанном смысле также четко отличается от информации, содержащейся в дифференцированной биологической структуре, такой как ген, или в

² Заметим, что знак минус в правой части уравнения используется лишь для того, чтобы получить положительное H , так как $p_i \leq 1$ ($\log p_i \leq 0$) и $p_i = 1$, и не имеет отношения к различию между свободной и связанной информацией, которое обсуждается ниже.

импульсных свойствах нервной системы, так как здесь она является результатом выборов, уже произведенных в физических системах.

Сцилард [51], Бриллиен [5] и другие показали, что когда выбор осуществляется среди возможных альтернатив при синтезе специфических нуклеиновых кислот или при генерировании цепи нервных импульсов, то использованная при этом информация формально аналогична негэнтропии ($-S$), или избыточности³. Поэтому такой тип информации есть мера свойств, ограничения выбора, организации, или симметрии [48, 47, 2]. Таким образом, мы видели, что биологическая работа зависит от потока $-\Delta G$ через организм, а теперь должны также уяснить, что аналогичная функция состояния для биологического информационного потока есть $-\Delta S$.

Энтропия и энергия. Описанная аналогия и соотношение между G и S , согласно второму закону, дает возможность оценивать метаболическую стоимость информации, а следовательно, рассматривать область внутреннего взаимодействия энергетического и кибернетического компонентов. Всякий раз, когда наблюдение приводит к получению информации, энтропия снижается в системе сбора и возрастает в источнике информации [5, 20]. Поэтому информационная негэнтропия должна возмещаться эквивалентным изменением термодинамической энтропии в некоторой части физической системы, так же как эндэргическая реакция сопровождается экзэргической, уравнивающей первую.

Изменение термодинамической энтропии на $1 \text{ кал} \cdot \text{моль} \cdot \text{град}$ эквивалентно 10^{23} бит [33, глава 42], или $1 \text{ бит} = 10^{-23} \text{ кал/моль} \cdot \text{град}$. Это может показаться метаболически незначительной величиной, но количество информации в организме может быть настолько большим, что общая ее стоимость может оказаться значительной. Так, одна крошечная бактериальная клетка содержит 10^{12} бит информации [33], и при обычной скорости роста, соответствующей одному клеточному делению в каждые 20 мин., требуется скорость развития 10^9 бит/сек ⁴. Большой сложный многоклеточный организм может иметь около 10^{12} клеток и, соответственно, в стационарном состоянии вся его организация оценивается величиной порядка 10^{24} бит .

Суммарный сенсорный поток от всех органов внешнего восприятия к центральной нервной системе человека оценивается величиной 10^7 бит/сек [45]; за период жизни продолжительностью 10^9 сек этот входной поток информации составит около 10^{16} бит . Скорость

³ Избыточность (C) определяется как $C = 1 - H/H_{\max}$, где H — взвешенная средняя информация, H_{\max} — информация, содержащаяся в одном сообщении, если все сообщения равновероятны; отсюда $H_{\max} = \log_2 n$, где n — число альтернатив.

⁴ 10 бит приблизительно соответствует информации, содержащейся в томе энциклопедии с мелким шрифтом, объемом 1000 стр.



Рис. 2

моторных реакций меньше этой величины примерно на $6 \log_{10}$ ед., но тем не менее может за время жизни составить большую величину. Возможный максимум информационной емкости человеческого мозга, имеющего приблизительно 10^{10} нервных клеток в коре полушарий, оценивается величинами порядка $10^9 - 10^{11}$ бит. Хотя эти количественные оценки весьма приближенные, ясно выявляется астрономический характер задач по обработке информации, решаемых живыми организмами.

Управляющая иерархия. Из четырех или пяти типов внешних кибернетических систем, управляющих энергетическим компонентом, первое место нужно отдать нуклеиновой кислоте, роль которой велика и в процессе происхождения жизни, и в процессах размножения и развития [3, 46].

На рис. 2 показаны основные пути потока энергии ($-\Delta G$, сплошные стрелки) и потока информации ($-\Delta S$, прерывистые стрелки) в организме животного. Все части нуждаются в энергии, которую поставляет метаболическая система. Выходные реакции, например, могут потреблять существенную долю от общего потока энергии. Поток информации в индивидуальном организме начинается с генетических механизмов управления, которые наследуются от родителей (P_1) и переходят к потомкам (F_1). Поэтому требуются свойства нуклеиновой кислоты для синтеза и сохранения энзимов и всех других компонентов организма, относящихся к метаболической системе, физиологическим механизмам управления и эффекторам. Отметим, что реципрокные действия и петли обратной связи характерны для информационной системы управления. Управляющие взаимодействия между организмом

и окружающей его средой представлены еще более упрощенно, чем внутриорганизменные компоненты.

Начальным событием в передаче биологической информации, возможно, является синтез специфичного полинуклеотида, с использованием имеющейся спирали нуклеиновой кислоты в качестве образца. Это требует энергии и, следовательно, наличия энергетической системы. Первичный контроль над протеиновым комплексом может быть установлен с помощью генетического механизма, который поддерживает постоянное функционирование внутренней кибернетической системы, обеспечивающей $-\Delta G$.

Следующим решающим регуляторным элементом, характерным для живого на клеточном и, несомненно, на доклеточном уровне, является мембрана плазмы, которая требовалась вначале для обособления протобиологической живой системы от среды. Эта липопротеиновая структура функционирует как (1) высоко селективный барьер для ионов и молекул, перемещающихся спонтанно вдоль электро-химических градиентов и (2) как метаболический насос, активно переносящий нужные частицы против таких градиентов [24].

Вследствие этого мембрана плазмы принципиально создает специфические свойства потока вещества и энергии внутрь организма и из него, т. е. его свойства как открытой системы. Другие цитоплазматические структурные образования несут в известной мере сходные, хотя и менее общие функции управления, регулирующие клеточную систему. Такими являются, например, митохондрии, центриоли, рибосомы, оболочка ядра, пиноцитотические пузырьки и эндоплазматические сети. Важные регуляторные функции могут возникнуть, например, в силу того, что такие цитоплазматические структуры создают специфические поверхности, на которых должны происходить те или иные реакции. Таким образом, эти цитоплазматические границы и поверхности обеспечивают первичный уровень биологической гетерогенности. Отметим, что как и во всех внешних управляющих механизмах, строение, сохранение и действие этих клеточных регуляторов связано с постоянной подачей энергии от энергетического компонента.

На молекулярном уровне внешнее управление наделено, в частности, регуляторными механизмами, подобными гормонам или нейросекретам, которые при интегральном действии нервной системы связывают органы чувств и эффекторы⁵. Наконец, ак-

⁵ Замежим, что если метаболит типа CO_2 оказывает прямое парагормональное действие на другие компоненты энергетической системы, то это, по определению, внутреннее управление; но если CO_2 стимулирует дыхательные рецепторы, или если управляющая молекула представляет собой специально синтезированное вещество, то химический управляющий механизм — внешний, по крайней мере частично. Такая неопределенность показывает, что резкое разграничение внешних и внутренних управляющих механизмов в пограничных случаях может быть неоправданным.

тивное управление на уровне многих организмов зависит от поведенческого взаимодействия особей или популяций одного вида, либо между представителями разных видов.

Внешнее управление на всех уровнях, от молекулярного до синэкологического и эволюционного, можно концептуализировать на основе выделения основных черт такого управления. Ядро организма составляет энергетический, внутренне управляемый компонент. Он окружен двумя или более «слоями» внешних регулирующих механизмов, начиная с генетических механизмов синтеза, управляющих развитием и размножением. У простейших организмов в следующем и, одновременно, крайнем слое могут быть заключены эволюционные управляющие механизмы, основанные на генетической стабильности, мутациях, взаимодействиях организма со средой и естественном отборе.

У более сложных объектов этот слой также может быть внешним, но между ним и первым слоем заключены одна или несколько дополнительных систем: клеточная, многоклеточная (тканевая), организменная, социальная и, вероятно, другие уровни управления. Отметим, что временные и пространственные взаимодействия между различными уровнями, так же как почти повсеместные случаи саморегулирования (представлены на рис. 2 обратными связями) внутри любого уровня управления значительно увеличивают адаптивность и сложность организма,

Кибернетическая модель

Регулирование с помощью обратной связи. Здесь уместно ограничиться рассмотрением физиологических управляющих механизмов и описать эту узкую область более детально. Особенно полезны в этом отношении две модели, которые общеизвестны, но ценны тем, что привлекают внимание к некоторым важным аспектам анализа биологических систем. Одна из моделей использует язык техники управления и кибернетики, в определении Винера [64], другая представляет собой модель программирования для ЭВМ.

Простейшая кибернетическая модель содержит по меньшей мере два компонента: управляемая, или регулируемая, система и управляющий механизм. Концептуально это черные ящики, и связаны они последовательно, а вся система имеет выход, состоящий из моторного акта или другой биологической переменной, которая подлжет управлению. Вход указывает контрольный уровень, который должен поддерживаться у выходной переменной. Поскольку любая сложная реальная система подвержена непредсказуемым помехам, «шуму» и искажению, то эффективные управляющие механизмы должны, прежде всего, иметь средство регистрации различия между действительным выходом и величиной выхода, заложенной в контрольный уровень. Затем любое расхождение между ними должно использоваться для того, чтобы информиро-

вать управляющий механизм. Последний, в свою очередь, выдает команды, управляющие соответствующими корректирующими реакциями управляемой системы.

Символически это действие может быть представлено петлей отрицательной обратной связи и компаратором, который определяет наличие, знак и величину любой ошибки между выходом системы и контрольной величиной выхода. Если контрольная величина остается постоянной в течение периода, сравнимого с масштабом времени для рассматриваемого процесса, то такой механизм действует как регулятор, или гомеостат. Если же контрольные величины варьируют в пределах такого масштаба времени, тогда система действует как серво-механизм, который следует (в определенных пределах) за изменениями входного сигнала, как хищник в погоне за жертвой. Та же схема и передаточная функция (связь между входом и выходом) соответствуют и другим типам действия.

Контрольные величины, о которых зашла речь при обсуждении кибернетической модели, интересны по нескольким причинам. Начнем с того, что они определяют заданную точку уровня функционирования системы и, следовательно, являются решающими в регуляции [21]. Впрочем, информация, заключенная в контрольных величинах, как и возмущения, накладываемые на них, рождаются вне системы, состоящей из управляющей и управляемой частей [46].

Например, механизмы, посредством которых теплокровные регулируют температуру своего тела, в нормальных условиях решают относительно простые физиологические проблемы производства, переноса и рассеивания тепла. Система управления надлежащим образом активирует соответствующие компоненты этого механизма способом, зависящим от знака и величины температурной ошибки [4, 50]. Однако выбираемая для поддержания температура, а отсюда и определение ошибки, связаны очень сложным путем со стратегией выживания организма. Чтобы проникнуть в эти связи контрольной точки, необходимо дополнительное обсуждение проблемы биологической информации.

Источники информации. Мы уже видели, что информация, рассматриваемая как негэнтропия, включает в себя организацию, симметрию, свойства или, в общем, любое отклонение от макроскопического состояния максимальной энтропии. Соответственно, внутри организма информация включает в себя особенности структуры или активности, основанные на взаимодействиях со средой (в самом широком смысле). Эти свойства могут быть преходящими, подобно рецепторным потенциалам и нервным импульсам, или длительно сохраняющимися, подобно характерным видовым особенностям морфологии.

В зависимости от отношения к шкале времени, свойства могут быть: 1) текущей информацией, непосредственно полученной от

органов чувств; 2) информацией из недавнего прошлого, хранящейся в памяти; 3) информацией, касающейся более или менее далекого прошлого, хранящейся в геноме и выраженной в действительной (или воспроизводимой) структурно-функциональной системе организма⁶. Очевидно, что контрольные уровни, связанные с заданными точками для биологических систем управления, могут быть получены из любого из перечисленных источников, или сразу из нескольких.

При более широком рассмотрении, заданная точка аналогична коэффициенту равновесия (K) обратимой химической реакции. Равновесие достигается, когда разница скоростей прямой и обратной реакций равна нулю, причем положение равновесия определяется отношением удельных скоростей этих двух реакций (соответственно k_1 и k_2) $K = k_1/k_2$.

Как указывалось, внутреннее управление гомогенных элементов энергетического компонента достаточно эффективно описывается с помощью закона действия масс. Важнейшим следствием этого факта, в данном контексте, является то, что контрольный уровень, определяющий положение адаптивного равновесия, встроен в саму систему. Любое изменение концентрации исходных или конечных для реакции веществ прямо порождает компенсирующее изменение скоростей реакции, что восстанавливает равновесие. Это справедливо для факторов, которые следуют принципу Ле-Шателье. Для всех других факторов измененная переменная, если она подлежит контролю, вызывает корректирующую реакцию посредством менее прямых, специальных промежуточных механизмов, типичных для внешнего управления.

Так, заданная точка гравитационных реакций у рыб устанавливается прежде всего анатомическим положением слухового пятна во внутреннем лабиринте уха. В типичных случаях его рецепторная поверхность лежит параллельно продольной и поперечной осям животного. При нормальном положении тела в пространстве это определяет горизонтальную плоскость, и отолит поддерживается симметрично чувствительными волосовидными клетками слухового пятна таким образом, что на эти чувствительные клетки оказывается максимальное давление, обязанное влиянию гравитации на отолит. В то же время отолит не оказывает смещающего действия на чувствительные волоски этих клеток.

Однако Хольст [26] доказал поведенческими экспериментами на костистых рыбах, что фактически существует смещающее действие со стороны отолита, которое стимулирует механорецепторы

⁶ Отметим, что информация любой из этих категорий может быть двух типов: 1) команды типа пуск — остановка и 2) подробные программы для продолжительного действия эффектора. Этот тип аналогичен освобождающему действию сигнального раздражителя и врожденным актам потребления пищи, описанным этологами [23, 37]. Как указывается ниже, этот тип напоминает также части программы для цифровых ЭВМ.

слухового пятна. Давление на них не действует эффективно. Таким образом, рабочий стимул для коррекции смещений от нормального вертикального направления дорзо-вентральной оси представляет собой синусоидальную функцию угла Θ между этой осью тела и направлением силы тяжести. Отсюда, максимальная стимуляция достигается при отклонении на 90° , а при нормальном (контрольном) положении стимуляция отсутствует.

Было показано, что чувствительность изолированного нервного волокна в слуховом пятне поляризована для отдельных направлений действия смещающей силы на соответствующие волосовидные клетки. Так, у ската (*Raja clavata*) имеется два класса рецепторных элементов, в виде маленьких пучков в слуховом пятне — половина с одной ориентацией и половина с максимальной чувствительностью, ориентированной под углом 180° по отношению к первой группе [36]. Электронно-микроскопическое изучение показало, что функциональная поляризация прямо связана с ориентацией тонких структурных черт киноцилий и стереоцилий на поверхности отдельных волосовидных клеток [63]. Хотя действительное распределение этих клеточных поляризаций для всего пятна является сложным [14], почти любое отклонение от нормального положения тела приводит к возбуждению одной части механорецепторов и торможению противоположных. Таким образом, если фазовые различия в 180° имеют место в центральной и периферической, или передней и задней областях слухового пятна налима (*Lota*), то сенсорный вход, порождаемый любым угловым смещением, вызовет по крайней мере две противоположные реакции.

Хольст сумел показать, что смещающая сила, действующая на слуховое пятно, вызывает, через соответствующие нервные соединения, поворачивающие тенденции плавников и мускулатуры тела, что восстанавливает нормальное положение (когда отолит производит нулевое смещающее действие). Количественно эти компенсационные моменты также варьируют по интенсивности пропорционально $\sin \Theta$ [26]. Таким образом, контрольная точка для этой системы определяется функциональной анатомией соответствующих органов чувств, а также соотношением между интенсивностью исправляющего рефлекса и отклонением от нормального положения, регистрируемым слуховым пятном.

Даже в значительно более сложных случаях, чем описанный гравитационный рефлекс, аналогия между контрольной заданной точкой и коэффициентом равновесия может оказаться ценной. Например, можно рассмотреть терморегуляцию человека более подробно: потение, дрожь, сосудистые изменения, необходимые изменения в теплообмене через поверхность, несколько чувствительных к температуре участков с соответствующими нервными цепями — все это функционирует для поддержания нормальной температуры. Тем не менее суммарно эту систему

можно охарактеризовать, в операционном отношении, как автоматическое движение к температурному равновесию, при котором сумма всех производящих и сохраняющих тепло процессов точно равна сумме всех процессов рассеяния тепла [50].

В этом терморегуляторном механизме контрольный уровень, очевидно, не определяется просто прямым физико-химическим действием температурных изменений на энергетическую систему. В действительности этот уровень зависит прежде всего от величины порога, по меньшей мере, двух типов терморепцепторов, возбуждение которых соответственно стимулирует несколько продуцирующих и рассеивающих тепло эффекторов. Эти пороги, в свою очередь, могут зависеть от уровня специфических нейрогуморальных веществ в теплочувствительных участках [4]. Таким образом, информация, содержащаяся в температурных изменениях, не является сама по себе выходом управляющего устройства, но сначала преобразуется с помощью чувствительных устройств со специфическими термальными порогами и затем кодируется в цепь нервных импульсов, которые интегрируются и используются для активации соответствующих мышечных, вазомоторных и glandулярных реакций.

Дальнейшее усложнение гомойотермии заключается в том, что система управления становится разветвленной. Действительная достигаемая температура и специфические регулирующие механизмы варьируют радиально от центральной части тела до покровов и существенно различаются в голове, туловище, конечностях [50]. Тем не менее, заданная точка регулятора в целом представляет собой коэффициент равновесия для системы «чувствительное устройство — эффектор» и имеет антагонистические компенсаторные выходы.

Это заключение, по-видимому, может быть обобщено для всех внешних управляющих механизмов, в которых состояние контролируемой переменной преобразуется в биологически закодированные сигналы, по меньшей мере, в двух каналах, нулевая точка которых является эффективным контрольным уровнем.

Специфичность входа. Сделаем прежде два замечания о системах внешнего управления и еще об одной модели управления. Первое замечание относится к средствам, с помощью которых отбираются соответствующие стимулы для активации любого отдельного канала сенсорно-эффекторного управления. Это зависит, в первую очередь, от высокой степени специфичности биологических рецепторов, что составляет еще одно присущее организму свойство сортировщика воздействий. Другими словами, функциональная структура живой системы такова, что реакции, соответствующие, к примеру, визуальным стимулам, связываются прежде всего с чувствительными устройствами, отвечающими только на свет. Степень внешней фильтрации такого рода может достигать исключительной детальности и сложности (например, [34, 58, 65]).

У животных с высокоразвитой центральной нервной системой это свойство усиливается сложной внутренней способностью распознавать образы, превосходящей такую способность периферических систем. Когда речь идет об обучении и памяти, временные структурные изменения добавляются к существующей продолжительное время функциональной организации нервной системы, которая является следствием развития особи. Несмотря на их интерес и важность, многое необходимо еще изучить в этих вопросах, и их дальнейшее обсуждение выходило бы за рамки нашей основной темы, касающейся относительно элементарных механизмов управления.

Саморегулирующее управление. Ввиду того, что внешние биологические системы управления могут поддерживать контролируемые переменные на постоянном заданном уровне, независимо от случайных помех и флуктуаций в среде, они являются адаптивными. Второе обычное их свойство — способность к саморегуляции. Выше мы ссылались на это свойство в связи с генами-операторами и регуляторами, но оно достаточно общее во всей иерархии биологических управлений. Саморегуляция требует одну или более дополнительных замкнутых петель связи, которые позволяют поддерживать на соответствующем контрольном уровне важные параметры самого регулятора. Этот механизм может быть как внутренним, так и внешним.

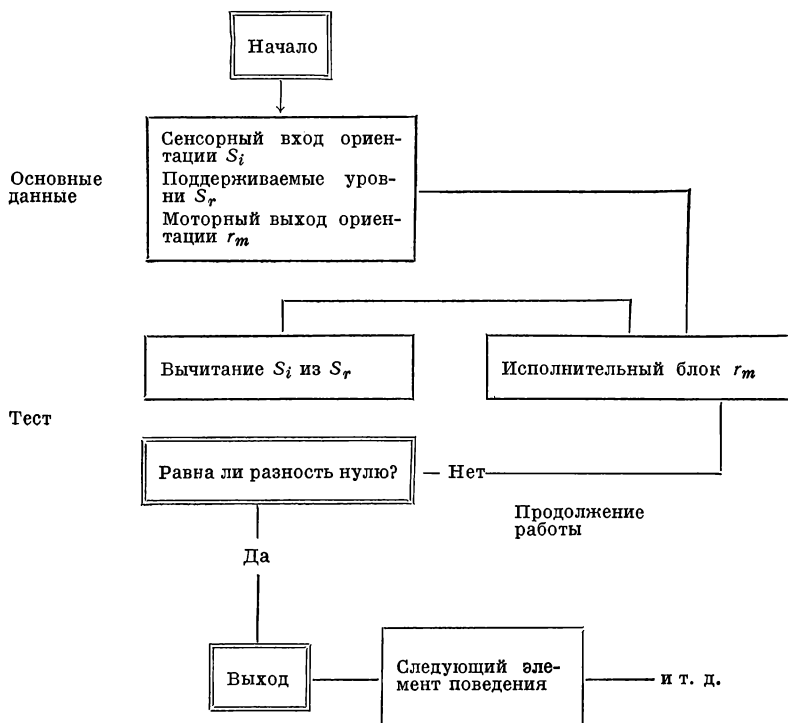
Примитивная проприоцептивная система животных, включая мышечные окончания у позвоночных и хордотональные органы членистоногих, функционирует непосредственно при координации движений [44]. Например, движение при преследовании жертвы модулируется этой системой таким образом, что оно остается эффективным, несмотря на неровности местности, изменения нагрузок на тело, например, при резких спусках, и даже при умеренной усталости. Ориентация хищника на жертву составляет главную петлю управления, тогда как петля моторного управления является вспомогательной. Как часть этой моторной системы, генерация и регулирование сложно координированного моторного выхода, происходящие при работе типа передвижений, также составляют важные петли внутри петель, охватывающих некоторые спонтанные врожденные свойства [25, 18, 61].

Модель программы для вычислительной машины

В то время как кибернетические модели неоднократно использовались при объяснении биологических механизмов управления (например, [19, 66, 28, 38, 40]), второй тип моделей, упоминаемый здесь, а именно, модель программы для вычислительных машин, использован относительно мало. Тем не менее имеется достаточно данных, говорящих о его потенциальной важности. Например, Миллер, Галантер и Прибрам [39] показали, что вместо простого

рефлекс типа вход—выход, неадекватного в качестве элементарной единицы поведения, требуется нечто подобное программирующей последовательности ТОТЭ (Test—Operate—Test—Exit).

Такая единица поведения состоит из одной или более эффекторных операций, которые могут выполняться, контрольного уровня для некоторого параметра, испытывающего значительное воздействие отдельной операции, и метода сравнения результатов операции с эталоном. При различии рождается единичный ответ эффектора. Если этот начальный ответ не уничтожает ошибку, единичная операция повторяется до тех пор, пока расхождение не исчезнет или не минимизируется. Эта модель, таким образом, является количественной в том смысле, что и выборка данных является прерывистой (состоит из ряда последовательных тестов), и корректирующие операции состоят из серии единичных ответов. Ясно, что ТОТЭ похожа на элементарную петлю типичной программы ЭВМ [32].



На схеме представлена модель программы для вычислительной машины, отражающая простую поведенческую реакцию, подобную пространственной ориентации. Программа начинается с использования трех групп данных в регистраторе. Команды для

подходящего единичного действия моторного выхода (r_m): контрольный уровень для контролируемой переменной (S_r) и сенсорный вход, отражающий текущую ориентацию (S_i). Затем программа включает тесты, выявляющие разность между S_r и S_i . Если она не равна нулю, единичная моторная реакция r_m приводится в действие. Теперь новое S_i сравнивается с S_r ; если разность все еще не равна нулю, цикл повторяется, пока это условие не будет достигнуто. Затем действие выходит из петли. Если вся программа включает последовательные поведенческие цепи, то начинается следующий ТОТЕ и т. д., вплоть до завершения последнего шага.

Распространение этого типа модели для охвата наблюдаемых иерархий биологических механизмов управления (например, в поведении [52]), открывает многообещающие возможности [15]. Компоненты такой модели обнаруживают близкую аналогию с элементами многих биологических механизмов управления. Например, пусть имеется необходимость запустить всю систему (в частности, путем редепрессии гена, или прямой сенсорной стимуляцией, а также побуждением или принуждением). В этом случае в программе должны содержаться: 1) информация (главным образом, подобная сенсорной) о текущем состоянии системы (S_i); 2) контрольный уровень (генетический, мнемонический или сенсорный по происхождению) того состояния, которое должно поддерживаться (S_r); 3) инструкция для того действующего свойства, которое может привести текущее состояние к контрольному состоянию.

До тех пор пока $S_r - S_i \neq 0$, петля ТОТЕ будет продолжать повторение; когда же $S_r = S_i$, «внимание» системы выходит из этой цепи и сдвигается к следующему управляющему элементу общей программы. По выполнении самой последней инструкции программа выполнена и должна быть остановлена. Очевидно переключение контроля или внимания с одной задачи на другую, как это делается в расширенных программах для ЭВМ, является важной, но еще плохо понимаемой функцией центральной нервной системы.

Хотя некоторые свойства модели, например, ее вычислительные и количественные операции, могут казаться не соответствующими по крайней мере некоторым биологическим управляющим системам [6], реальная эффективность рассмотрения физиологического и других типов регуляции в живых системах под этим углом зрения не была еще адекватно проверена и испытана. Однако эта модель имеет очевидные мощные преимущества, поскольку непосредственно ведет к аналоговым экспериментам для проверки общности, широты применения и других особенностей модели. Действительно, независимо от того, будет ли развит дальше этот тип модели, использование вычислительных машин для модельных биологических экспериментов само по себе является важным научным инструментом.

Выводы

Живые организмы содержат многопеременные системы с сильными взаимными связями, приспособленные для поддержания равновесия, и потому для своего эффективного изучения требуют системного аналитического подхода. Как показали исследования, живое содержит центральный энергетический компонент, дающий энергию для выполнения биологической работы, плюс более или менее экстенсивную иерархию кибернетических элементов, обрабатывающих информацию, определяющих и контролирующих заданные точки и программы энергетической системы. Управление подразумевает и наличие источника информации, который может быть внутренним или внешним. Внутреннее управление встроено в систему подобно тому, как регулирующее действие закона масс и принципа Ле-Шателье функционирует в первичном метаболическом управлении энергетического компонента. Внешнее управление накладывается на эту энергетическую систему, первоначально через функции нуклеиновой кислоты, а на более высоких уровнях в виде внутриклеточных, нейросенсорно-эффektorных, эндокринных и других химически действующих управляющих факторов, а также социальных, экологических и эволюционных регуляторов.

Можно выделить четыре типа информации, обрабатываемой этими кибернетическими элементами: один внутренний (структурный) и три внешних — генетический, мнемонический и текущая сенсорная стимуляция. Полезные модели биологических систем управления могут быть созданы на основе технических и кибернетических систем, или путем программирования и исследования специальных задач с помощью ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ashby W. R.* Introduction to Cybernetics. N.Y., 1955 (русский перевод — *Эшби У. Росс.* Введение в кибернетику. М., 1959).
2. *Attneave F.* Applications of Information Theory to Psychology. N.Y., 1959.
3. *Bernal J. D.* Molecular structure, biochemical function, and evolution.—«Theoretical and Mathematical Biology». N.Y., 1965.
4. *Bligh J.* Thermosensitivity of the hypothalamus and thermoregulation in mammals.—«Biological Review of Cambridge Philosophical Society», 1966, v. 41.
5. *Brillouin L.* Science and Information Theory. 2nd ed., N.Y., 1962 (русский перевод — *Бриллюэн Л.* Наука и информация. М., 1960).
6. *Bullock T. H.* The neuron doctrine and electrophysiology.—«Science», 1959, v. 129.
7. *Cannon W. B.* The Wisdom of the Body. N.Y., 1932.
8. «Control of Energy Metabolism». N.Y., 1965.
9. *Cowan J. D.* The Problem of Organismic Reliability.—Cybernetics of the nervous system.—«Progress in Brain Research», 1965, v. 17.

10. *Dean A. C., Hinshelwood C.* Growth, Function and Regulation in Bacterial Cells. London, 1966.
11. *Denton E. J.* The contributions of the orientated photosensitive and other molecules to the absorption of the whole retina.—«Proceedings of Royal Society London B», 1959, v. 150.
12. *Denton E. J.* The buoyancy of fish and cephalopods.—«Progress in Biophysics, Biochemistry, Chemistry», 1961, v. 11.
13. *Eyring H.* Untangling biological reactions.—«Science», 1966, v. 154.
14. *Flock A.* Structure of the macula utriculi with special reference to directional interplay of sensory responses as revealed by morphological polarization.—«Journal of Cellular Biology», 1964, v. 22.
15. *Friedman L.* Instinctive behavior and its computer synthesis.—«Behavioral Science», 1967, v. 12.
16. *Garfinkel D.* Computer simulation in biochemistry and ecology.—«Theoretical and Mathematical Biology». N.Y., 1965.
17. *Garfinkel D.* A simulation study of the effect on simple ecological systems of making rate of increase of population density dependent.—«Journal of Theoretical Biology», 1967, v. 14.
18. *Gray J.* The role of peripheral sense organs during locomotion in the vertebrates.—«Physiological Mechanisms in Animal Behaviour». «Symposium of Societe of Experimental Biology», 1950, v. 4.
19. *Grodins F. S.* Control Theory and Biological Systems. N.Y., 1963.
20. *Hagins W. A.* Electrical sings of information flow in photoreceptors.—«Sensory Receptors». «Cold Spring Harbor Symposium», 1966, v. 30.
21. *Hardy J. D.* The «set—point» concept in physiological temperature regulation.—«Physiological Control and Regulation». Philadelphia, 1965.
22. *Henderson L. J.* The Fitness of the Environment. N.Y., 1913.
23. *Hinde R. A.* Animal Behaviour. N.Y., 1966.
24. «The Cellular Functions of Membrane Transport».—«Symposium of Society of General Physiologists, Woods Hole, 1963». N.Y., 1964.
25. *Holst E. von* Die relative Koordination als Phänomen und als Methode zentralnervöser Funktionsanalyse.—«Ergebnisse der Physiologie, Biologie, Chemie, Experimentale Pharmakologie», 1939, t. 42.
26. *Holst E. von* Quantitative Messung von Stimmungen in Verhalten der Fische.—«Physiological Mechanisms in Animal Behaviour». «Symposium of Experimental Biologie», 1950, v. 4.
27. *Jakob F., Monod J.* Genetic regulatory mechanisms in the synthesis of proteins.—«Journal of Molecular Biology», 1961, v. 3.
28. «Regulation and Control in Living Systems». London, 1966.
29. «Current Aspects of Biochemical Energetics». N.Y., 1966.
30. *Katchalsky A., Curran P. E.* Nonequilibrium Thermodynamics in Biophysics. Cambridge, Massachusetts, 1965.
31. *Kerner E. H.* Gibbs ensemble and biological ensemble.—«Annals of the New York Academy of Sciences», 1962, v. 96.
32. *Ledley R. S.* Scope of computer applications.—«Theoretical and Mathematical Biology». N.Y., 1965.
33. *Lehninger A. L.* Bioenergetics. N.Y., 1965.
34. *Lettvin J. Y., Maturana H. R., McCulloch, Pitts W. H.* What the frog's eye tells the frog's brain.—«Proceedings IRE», 1959, v. 47.
35. *Lockhead J. H.* Locomotion.—«The Physiology of Crustacea», II. N.Y., 1961.
36. *Lowenstein O., Osborne M. P., Wersäll J.* Structure and innervation of the sensory epithelia of the labyrinth in the thornback ray (*Raja clavata*).—«Proceedings of Royal Society London B», 1964, v. 160.
37. *Marler P. R., Hamilton W. J.* Mechanisms of Animal Behavior. N.Y., 1966.
38. *Milhorn H. T.* The Application of Control Theory to Physiological Systems. Philadelphia, 1966.

39. *Miller G. A., Galanter E., Pribram K. H.* Plans and the Structure of Behavior. N.Y., 1960 (русский перевод — *Миллер Д., Галантер Ю., Прибрам К.* Планы и структура поведения. М., 1965).
40. *Milsum J. H.* Biological Control Systems Analysis. N.Y., 1966 (русский перевод — *Милсум Дж.* Анализ биологических систем управления. М., 1968).
41. *Morowitz H. J.* Energy Flow in Biology. N.Y., 1968.
42. *Needham A. E.* The Uniqueness of Biological Materials. Oxford, 1965.
43. *Perutz M. F.* Some molecular controls in biology.—«*Endeavour*», 1967, v. 26.
44. *Pringle J. W. S.* The excitation and contraction of the flight muscles of insects.—«*Journal of Physiology*», 1949, v. 108.
45. *Quastler H.* Studies of human channel capacity.—«*Information Theory*». «*London Symposium on Information Theory, 1955*», N.Y., 1956.
46. *Quastler H.* General principles of systems analysis.—«*Theoretical and Mathematical Biology*», N.Y., 1965.
47. *Reichenbach H.* The Direction of Time. Berkeley, 1956 (русский перевод — *Рейзенбах Г.* Направление времени. М., 1962).
48. *Shannon C. E., Weaver W.* The Mathematical Theory of Communication. Urbana, 1949 (русский перевод — *Шеннон К, Э.* Работы по теории информации и кибернетике. М., 1963).
49. *Slobodkin L. B.* Growth and Regulation of Animal Populations. N.Y., 1961.
50. *Stolwijk J. A. J., Hardy J. D.* Temperature regulation in man—A theoretical study.—«*Pflügers Archiv der Gesammelte Physiologie*», t. 291, 1966.
51. *Szillard L.* Über die Entropieverminderung in einem thermodynamischen System bei Eingriffen intelligenter Wesen.—«*Zeitschrift für Physik*», N 53, 1929.
52. *Tinbergen N.* The Study of Instinct. London, 1951.
53. *Trimmer J. D.* Response of Physical Systems. N. Y., 1950.
54. *Tykodi R. J.* Thermodynamics of Steady States. N. Y., 1967.
55. *Waterman T. H.* Light sensitivity and vision.—«*The Physiology of Crustacea*», II, N. Y., 1961.
56. *Waterman T. H.* Comparative physiology.—«*The Physiology of Crustacea*», II, N. Y., 1961.
57. *Waterman T. H.* Systems analysis and the visual orientation of animals.—«*American Scientist*», v. 54, 1966.
58. *Waterman T. H., Wiersma C. A. G., Bush B. M. H.* Afferent visual responses in the optic nerve of the crab, *Podophthalmus*.—«*Journal of Cellular Comparative Physiology*», v. 63, 1964.
59. *Systems Analysis in Ecology.* N.Y., 1966.
60. *Weaver W.* Science and complexity.—«*American Scientist*», v. 36, 1948.
61. *Weber G., Singhal R. L., Stamm N. B., Lea M. A., Fisher E. A.* Synchronous behavior pattern of key glycolytic enzymes: Glucokinase, phosphofruktokinase, and pyruvate kinase.—«*Advances in Enzyme Regulation*», v. 4, Oxford, 1966.
62. *Weis-Fogh T.* Control of basic movements in flying insects.—«*Homeostasis and Feedback Mechanisms*». «*Symposium of Society of Experimental Biology*», v. 18, 1964.
63. *Wersäll J., Flock A., Lundquist P.-G.* Structural basis for directional sensitivity in cochlear and vestibular sensory receptors.—«*Sensory Receptors*». «*Cold Spring Harbor Symposium*», v. 30, 1966.
64. *Wiener N.* Cybernetics. N. Y., 1948 (русский перевод — *Винер Н.* Кибернетика. М., 1958).
65. *Wiersma C.A.G., Yamaguchi T.* The neuronal components of the optic nerve of the crayfish as studied by single unit analysis.—«*Journal of Comparative Neurology*», v. 128, 1966.
66. *Young L. R., Stark L.* Biological Control Systems—A Critical Review and Evaluation. Washington, NASA Report No. CR-190, 1965.

МНОГОУРОВНЕВЫЕ СИСТЕМЫ И БИОЛОГИЯ: ТОЧКА ЗРЕНИЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЯ СУБМОЛЕКУЛЯРНОЙ БИОЛОГИИ¹

Д. Ф. БРЭДЛИ

Введение

Большинство биологических явлений можно исследовать при разных «увеличениях». При каждом увеличении могут быть сделаны интересные и полезные наблюдения, а часто и предсказания дальнейшего поведения или даже коррекция неправильного функционирования объекта. Это довольно удивительно, ибо существуют самые убедительные основания считать, что макроскопическое биологическое поведение представляет собой сумму бесконечного числа межмолекулярных реакций и взаимодействий, каждое из которых следует физическим законам, действующим на уровне ангстремов. Уяснив это, некое взвешенное существо может логически предположить, что изучение земной жизни должно начинаться с субмолекулярного уровня и продвигаться вперед шажками в сторону все больших и больших групп индивидуальных реакций, пока не будет достигнут метровый уровень. Однако наши науки не развивались исторически в такой логической последовательности. Социология, экономика и политические науки, психология и психиатрия, анатомия, физиология, биохимия, химия и физика развивались скорее параллельно, чем последовательно, и нередко при незначительных взаимосвязях. В ходе этого развития мы научились лечить болезни целостного существа, например, душевные заболевания, не касаясь или даже не зная многого из физиологических, биохимических, химических или физических процессов, лежащих в основе нормального и болезненного состояний. Мендель многое понял в наследственности и мог предсказывать поведение еще не родившихся организмов, не зная о существовании дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК), а тем более о том, что она несет генетическую информацию.

¹ D. F. Bradley. Multilevel Systems and Biology—View of a Submolecular Biologist.—«Systems Theory and Biology». N.Y., 1968, p. 38—58. Печатается с некоторыми сокращениями. (Перевод В. Е. Заики).

До тех пор, пока не возникает желания привлечь для объяснения организации или поведения в биологии другие типы сил, нежели те, которые могут быть найдены в репертуаре молекулярного физика, придется принять, что и при малых увеличениях можно выявить регулярные, предсказуемые события там, где бесчисленное количество молекулярных событий происходит в условиях, созданных генетической информацией и средой. Так, законы термодинамики являются предсказуемыми свойствами поведения, наблюдаемыми во всех макроскопических системах, независимо от того, какие типы молекул содержатся в системе, и независимо от природы их взаимодействий. Эти законы были открыты и доказаны экспериментально на макроскопическом уровне задолго до того, как молекулярный физик с помощью статистического анализа смог показать, что они представляют не что иное, как результат взаимодействия большого числа молекул, в том числе и обмен энергией. Важно заметить, что поскольку термодинамика развилась раньше того времени, когда она могла быть объяснена в терминах статистики, ее нужно было определить в терминах немолекулярных — таких, как энергия, энтропия, энтальпия и свободная энергия. Тем не менее, эта область имела большое значение для химии, транспорта и энергетики. Аналогично: психоаналитическая теория, определенная в терминах *id*, *ego* и *superego*, принесла значительную пользу при изучении поведения человека, хотя эти термины не описаны и, возможно, никогда не будут описаны на языке соответствующих молекулярных событий.

Если специфическая проблема была аналитически решена на данном уровне, не имеет смысла особенно стараться проанализировать ее на уровнях с большим увеличением. Так, если мы хотим знать константу равновесия для частной химической реакции в условиях, где ее нельзя определить прямым путем, то мы можем точно предсказать ее, используя термодинамику, по теплоемкости реагирующих веществ и продуктов реакции. Мы можем также предсказать ее по спектроскопически установленным квантовым уровням энергии у реагирующих веществ и продуктов реакции, используя молекулярную статистику. Чтобы провести то же самое исследование на уровне с большим увеличением, вероятно, потребуются больше экспериментальных и расчетных усилий, а в результате просто возрастет «понимание» реакции. Однако такой метод может стать необходимым, если нужно узнать константу равновесия, скажем, при очень высоких температурах, где измерения теплоемкости сильно затруднены.

Следовательно, анализ на любом данном уровне может «работать» при решении одних проблем и быть бесполезным для других. Психиатрия может помочь при лечении неврозов, но не психозов. Огромные трудности, связанные с попыткой анализа социального или эмоционального поведения на молекулярном уровне, делают

заслуживающими внимания попытки анализа этих вопросов на социологическом и психиатрическом уровнях. Еще слишком рано делать имеющие практическую ценность предсказания о поведении столь больших молекулярных систем, организованных в живую систему и находящихся под воздействием наследственности и среды. Время думать о возможности анализа на уровнях большего увеличения приходит, когда анализ на избранном уровне, который априорно представляется наиболее подходящим, оказывается безуспешным. Приходит на ум история длительных и бесплодных попыток создать вечный двигатель (второго рода). Он казался вполне разумной и весьма полезной реальностью, и было сконструировано множество хитроумных устройств. Однако постоянные провалы попыток изготовить работающий механизм привели к поискам объяснений при больших увеличениях. Сначала объяснение было найдено на термодинамическом уровне в терминах энтропии, а позднее в терминах статистики молекулярных событий. Теперь мы знаем, что вечные двигатели, которые, например, непрерывно превращали бы тепло в необходимую работу изотермически и без постоянных изменений в машине, невозможны из-за того, что это противоречит вероятностным законам, и только заблуждающиеся или малограмотные люди продолжают их конструировать.

Успех при решении проблемы на уровнях малого увеличения, следовательно, можно только приветствовать, так как это снимает необходимость гораздо более тяжелой работы на уровнях большего увеличения. Наилучшим и единственным критерием перехода на уровни большего увеличения служат постоянные неудачи при попытке решить специфические или общие проблемы на априорно наиболее подходящем уровне.

Пересечение уровней

В настоящее время среди работающих в биологии исследователей есть такие, кто перешел с низших уровней увеличения на высшие, и такие, кто сместился в противоположном направлении. Доктора медицины стали биохимиками или даже молекулярными физиками, а физики оставили физику ради биохимии. Первые обычно не удовлетворены медлительностью продвижения при решении проблем на медицинском уровне и обращаются к меньшим системам в надежде решать здесь проблемы более полно, точно и быстро. Физики, превратившиеся в биохимиков, обычно хотят приложить свою доказанную способность решать проблемы к более сложным системам, вызывающим больший интерес у людей. Сотрудничество тех, кто перемещался в противоположных направлениях, чтобы встретиться на одном уровне, может быть весьма продуктивным, и выдающимся примером этого служит сотрудни-

чество физика Крика и биолога Уотсона, приведшее к определению трехмерной структуры ДНК.

Для отдельных исследователей смена уровней — медленный и редкий процесс. Нужно иметь серьезные причины, чтобы отказаться от многого из образования и опыта, сделать попытку изучить новый научный язык и литературу, избежав при этом все возрастающей опасности ошибиться; другими словами, стать компетентным на новом уровне. Это требует времени и ответственности. Сама же наука, с другой стороны, нередко может более легко и быстро смещать уровни. Хорош пример с ДНК, поскольку знания о структуре ДНК на молекулярном уровне были немедленно подхвачены исследователями, работающими на уровне биохимии, и использованы ими как краеугольные камни очень многих биохимических экспериментов. В результате мы знаем сегодня гораздо больше о биохимической основе наследственности.

Хотя обмен информацией между уровнями может быть значительно более быстрым, чем обмен исследователями, он имеет определенные недостатки. Любая часть информации, содержащейся на данном уровне, окружена другим контекстуальным материалом, который хорошо известен компетентным ученым данного уровня, но который трудно передать вместе с данной частью информации исследователям, компетентным на другом уровне. Поэтому последние имеют тенденцию видеть только часть общей картины, из которой выхвачены данные, полученные ими с других уровней. Это может вызывать или не вызывать трудности, в зависимости от того, как используются данные, вырванные из своего уровня и контекста.

Моделирование

Важная часть многоуровневого анализа — конструирование моделей. Обычно модель описывается на языке уровня большего увеличения, чем уровень, на котором были выполнены наблюдения или эксперименты. Именно эта черта моделей вызывает интуитивное убеждение, что модель объяснила или обеспечила понимание экспериментальных результатов. Модель, описанная на языке того же увеличения, что и данные наблюдений, обычно рассматривается как простое описание, а не объяснение данных. Понимание можно почувствовать лишь тогда, когда мы построили модель, которая описана в терминах компонентов, действующих совместно как система, обеспечивающая наблюдаемое поведение изучаемого объекта. Так, мы понимаем термодинамическое поведение макроскопического тела в терминах статистической модели, описывающей действия и взаимодействия между соответствующими молекулами.

Это составляет фундаментальный аспект процесса понимания, который вызывает большое непонимание: исследователь получил

некоторые результаты и построил модель на уровне бóльшего увеличения, чтобы объяснить их. Если модель, к его удовлетворению, соответствует наблюдениям, он чувствует, что понимает явление. Он может с успехом сообщить о своем чувстве коллегам, работающим на том же уровне, или исследователям, работающим на уровнях меньшего увеличения. Однако для исследователя, работающего на уровне, в терминах которого построена модель, эта модель становится, в свою очередь, не объяснением, но описанием и опять-таки требует объяснения. Но если получить объяснение на этом уровне, т. е. создать модель при еще бóльшем увеличении, то модель явится простым описанием для работающих на этом уровне. Это серийный процесс: биолог объясняет наследственную передачу в терминах самовоспроизведения ДНК; биохимик объясняет самовоспроизведение в терминах образования дополнительных нуклеотидных пар оснований; химик объясняет пары оснований в терминах водородных связей; молекулярный физик объясняет водородные связи в терминах межмолекулярных потенциальных функций; специалист по квантовой механике объясняет потенциальные функции в терминах волнового уравнения; физик-теоретик объясняет волновые уравнения в терминах свойств пространства — времени. Таким образом, если знание, состоящее из цикла надежных наблюдений, можно рассматривать как объективное знание, то понимание — весьма относительный феномен, который варьирует в зависимости от образования и опыта исследователя. Отдельные области, такие как молекулярная биология, привлекающая исследователей как из биологии, так и из физики, становятся поэтому ареной яростных споров, но не из-за фактов, а из-за их объяснения. Пришедшие из физики обычно скептически воспринимают объяснения, данные в терминах моделей, предложенных их коллегами, которые пришли из биологии, так как для «экс-физиков» эти модели кажутся простыми описаниями.

Биологи тоже скептически настроены по отношению к молекулярно-биологическим объяснениям, предложенным коллегами-физиками, но по другой причине: на каждом уровне исследователи обычно привыкают иметь дело одновременно только с небольшим числом индивидуальных единиц. Биохимик работает с небольшим числом энзимов, молекулярный физик — с несколькими молекулами. Современная вычислительная техника дает возможность увеличить число единиц, которые можно рассматривать одновременно. Однако если наука на каждом из данных уровней находится еще в начале своего развития, высокое профессиональное положение будет достигнуто в результате нахождения и (или) улучшения решений, относящихся к этому уровню небольшого масштаба проблем. Поэтому ученый, работающий на данном уровне, будет разрабатывать проблемы, которые включают достаточно большое число единиц, чтобы быть в состоянии построить модель, соответ-

ствующую положению на нижележащем уровне увеличения, причем либо с тщательностью и аккуратностью, характерной для «хороших» ученых его уровня, и потому очень медленно, или, чтобы быстро получить результаты, без особой тщательности и, следовательно, неряшливо. Обычно это приводит к тому, что он построит либо неполную, либо неаккуратную модель, причем обе альтернативы непригодны. Поэтому у его коллег на нижележащем уровне увеличения, для которых модель построена в качестве объяснения, возникает понятный скептицизм. Интересным примером этого является трехмерная структура протеина. Биохимики, работающие в молекулярной биологии, нашли, что некоторые протеины могут быть денатурированы и восстановлены химически, и предложили объяснение, по которому нативные протеины существуют в самом низком энергетическом состоянии. Специалисты по молекулярной физике, работающие в молекулярной биологии, заявили, что это не объяснение, а нечто такое, что требует своего объяснения в терминах, например, межатомных потенциальных функций. Специалисты по молекулярной физике решили взять серию потенциальных функций и ввести их в ЭВМ, чтобы рассчитать структуру рибонуклеазы или миоглобина путем минимизации общей потенциальной энергии. Они подверглись критике со стороны представителей соседнего уровня с меньшим увеличением, биохимиков, поскольку не могли немедленно дать ответ (из-за того, что емкость вычислительной машины и огромное число необходимых вычислений сделали невозможным быстрое решение). Критика последовала и от представителя соседнего уровня с большим увеличением, физика, поскольку потенциальные функции, используемые сейчас, в значительной мере предположительны (так как еще должно быть показано, что они дают хорошие количественные и даже качественные результаты, хотя бы на небольшом числе малых молекул).

Такой критицизм и скептицизм полезны, так как не позволяют нам легко заблуждаться. Однако ими следует пользоваться умеренно, рассматривая объяснения, которые дают коллеги, работающие на другом уровне. Модели и объяснения являются по существу попыткой исследователя дать себе и коллегам по уровню чувство понимания частицы природы, а как мы говорили выше, понимание есть чувство высоко индивидуальное. Стремление наблюдать новые явления сильно у всех нас; желание объяснить и понять особенно сильно у ученых. Сделать посмешищем модели, построенные представителями более высокого уровня, из-за того, что они неполны или неаккуратны, либо объяснения, предложенные представителями более низкого уровня, из-за того, что они суть описания, а не реальные объяснения, или потому, что они построены без полной осведомленности во всем контекстуальном материале нашего собственного уровня — означает деформацию и, возможно, разрушение одного из важных источников заинтересованности в

науке. Все мы подвержены подобной критике со стороны наших соседей с выше- и нижележащего уровней.

Чтобы сфокусировать эту абстрактную дискуссию о пересечении уровней, обсудим три примера, взятые из текущих исследований по молекулярной биологии: модель РНК-память, модель репликации ДНК и модель генетического перевода с помощью системы кодон — антикодон.

РНК и память

Людей давно уже интересует, как следы событий сохраняются в памяти и как происходит вспоминание. Недавние эксперименты на планариях — простейших организмах, обладающих центральной нервной системой, показали, что у них можно выработать классические условные рефлексy, хотя и не так надежно, как хотелось бы, и что это обучение может быть передано, по крайней мере частично, необученной планарии, если поместить ее в богатый РНК экстракт, полученный из обученной планарии. С точки зрения ученого, изучающего поведение, кажется вполне резонным объяснить эти результаты с помощью модели, согласно которой выработка условного рефлекса приводит к появлению некоторых специфических свойств в РНК этой планарии, благодаря которым фиксируются следы события и затем проявляются в виде памяти у тренированной планарии или у планарии, которой имплантирована данная РНК. Более того, поскольку хорошо известно, что генетическая информация может быть записана в последовательности вновь синтезированной информационной РНК и затем преобразована в действие путем управления последовательностью аминокислот, вовлекаемых в процесс синтеза протеина, резонно считать, что следы событий сохраняются в последовательности нуклеотидов РНК.

Когда эта модель, которая кажется вполне удовлетворительным объяснением на уровне поведения, рассматривается на нервно-анатомическом уровне, то немедленно возникает вопрос об альтернативных моделях, так как существование бесконечно сложной нервной сети является само по себе сильным аргументом в пользу того, что объяснение запоминания должно разыскиваться скорее на этом, нежели на молекулярном уровне.

Когда модель РНК-память рассматривается на биохимическом уровне, возникают возражения другого рода, касающиеся ценности той части экспериментов с планарией, которая была выполнена на биохимическом уровне: была ли РНК, использованная в опытах по пересадке памяти, достаточно хорошо очищена, т. е. не обязана ли передача памяти другим веществам, попавшим вместе с РНК? Какой тип РНК использован, а именно, информационная, рибосомная, транспортная и т. д.? Ответственна ли за передачу памяти

РНК, синтезированная в период выработки условных рефлексов? Доказано ли, что РНК действительно входит в необученную планарию и сохраняется в ней, а не распадается на составляющие ее нуклеотиды до или вскоре после попадания в эту планарию? Поскольку модель описывает такой важный феномен, как память, на их собственном уровне, не привлекая утомительно сложной и биохимически не объяснимой нервной сети, то гордость биохимиков за принадлежность к уровню, на котором происходят столь важные события, может привести их к критике ценности экспериментов, выполненных исследователями поведения, которые построили модель и которые лишь дилетанты в биохимии. И хотя в данной ситуации есть основания для критики правомерности модели как таковой при рассмотрении ее в биохимическом контексте, она не должна сопровождаться умалением ценности описанных экспериментов.

Те, кто рассматривает эту модель на молекулярном уровне, не углубляясь при этом в детали экспериментов на биохимическом уровне, могут испытывать смущение. Для них память является сохраненной записью нервных импульсов, которые представляют собой просто проявление дифференциальной диффузии ионов. Как может такая, зависящая от времени, диффузия вызвать синтез РНК, имеющую специфическую последовательность нуклеотидов? Когда пытаешься ответить на этот вопрос, то сначала кажется невозможным вообразить даже описательную модель на этом уровне. Действительно, если бы кто-нибудь мог показать, что ни одна из таких моделей на молекулярном уровне не может функционировать, так как они игнорируют некоторый фундаментальный закон этого уровня, то в этом случае исходную модель связи РНК и памяти, созданную на биохимическом уровне, пришлось бы отбросить. Однако постепенно в уме рождается модель и для молекулярного уровня, которая, может быть, не корректна и не уникальна, но которую, по крайней мере, нельзя просто отбросить. Создание правдоподобной описательной модели — первый шаг анализа на каждом уровне. Например, можно предположить, что в нерве существует энзим (РНК-полимераза), который синтезирует РНК без шаблона из нуклеозидтрифосфатов.

Такие энзимы обычно требуют присутствия ионов в своем ближайшем окружении, чтобы катализировать синтез РНК. Можно предположить, что в нерве в состоянии покоя концентрация ионов либо слишком велика, либо слишком низка, чтобы позволить энзиму катализировать синтез РНК. Когда же по нерву распространяется импульс, он вызывает временные изменения концентрации ионов в аксоплазме, что может изменить ионное окружение энзима настолько, чтобы временно активировать энзим для синтеза РНК. Поскольку полинуклеотиды имеют тенденцию связывать Mg^{++} , Ca^{++} и т. д. в большей степени, чем мононуклеотиды, то вновь синтезированные полимеры могут действовать как нако-

пители ионов, изъятых из аксоплазмы. Биохимический и (или) биофизический процесс, благодаря которому нерв деполяризуется после импульса, может привести к восстановлению ионной среды, в которой энзим неактивен, и синтез полимера прекращается.

Система энзим—полимер может затем бездействовать до тех пор, пока второй импульс не распространится по тому же пути, еще раз активируя энзим. В зависимости от относительных концентраций полимера и мономера второй импульс может катализировать либо дальнейший синтез, либо разложение ранее синтезированного полимера. Энзимы, такие как полинуклеотидфосфорилаза, как известно, катализируют и синтез полинуклеотида, и его разложение; и закон микроскопической обратимости требует, чтобы все энзимы катализировали и прямые, и обратные процессы. Гидролизное разложение полимера должно вызывать сопутствующее освобождение связанных ионов, что в свою очередь может изменить время прохождения или величину общего потока ионов либо вызвать изменение напряжения в проходящем импульсе. Это действие напоминает усилительную цепь в подводных кабелях. Такое усиление сигнала предположительно может вести к более интенсивному синтезу полимера в пост-синаптических нервных клетках и тем самым увеличивать вероятность того, что импульс, начавшийся в одном конце нервной сети, пройдет весь путь и активирует его.

* Эта частная описательная модель не требует синтеза РНК со специфической последовательностью нуклеотидов, так как любая РНК будет работать при условии, что она синтезируется в нервных клетках, которые содержат особые пути нервной сети, связанные с особым типом афферентного импульса. Врожденная способность обучаться некоторым особенностям поведения должна сохраняться в путях, образовавшихся в ходе развития нервной системы (благодаря особым процессам), и РНК должна служить при этом просто для закрепления некоторых из этих возможных путей. Можно предположить, что спонтанное вспоминание (вызов в памяти) этих закрепленных путей (описываемое на другом уровне как обученное поведение) может происходить во всех тех случаях, когда в зоне энзима наблюдается спонтанная флуктуация плотности ионов, способная активировать энзим для гидролиза полимера, или когда случайные импульсы распространяются по этому пути. Такое вспоминание может вызвать электрическая стимуляция с помощью введенных внутрь электродов. Поиск ассоциативных образов для того, чтобы помочь сознательному вспоминанию, может приводить к этой цели путем увеличения вероятности случайного импульса по искомому пути. Генетические дефекты, мешающие энзимам, участвующим в метаболизме нуклеотидов, могут приводить к полной неспособности обучаться и вспоминать выученное либо — другая крайность — к вынужденному поведению, при котором снова и снова вспоминаются одни и те же пути.

Нужно заметить, что эта описательная модель, вкуче со многими начальными моделями, не ясна в том смысле, что содержит смесь элементов, принадлежащих разным по размерности уровням, и описана в разнотипных терминах. Так, мы используем термины от ионных связей до полинуклеотидов, синапсов и ассоциативных образов в одной и той же «модели». Только часть модели описана в терминах молекулярного уровня, и эту часть можно рассматривать как систему, окруженную «средой» меньшего уровня увеличения. Последующие модели увеличат область, описываемую в молекулярных терминах. Вся модель может быть объясняющей на уровне поведения, но только ионные уровни и части модели, касающиеся ионных связей, являются объясняющими на биохимическом уровне, и уж совсем ничего не объясняется на молекулярном и еще более высоких уровнях. Для объяснения на таком уровне мы нуждались бы во введении в модель сил, участвующих в ионных связях.

Эта основная модель также может быть развита без изменения уровней. Для иллюстрации такой возможности можно предположить, что существует несколько различных типов входных сигналов, которые могут вызывать потенциалы действия, как-то различающиеся по ионному потоку, падению напряжения или по продолжительности. Далее, можно предположить, что четыре основных нуклеозидтрифосфата входят в цепь растущего полимера с разными скоростями, зависящими от концентрации ионов в соответствующих специфических путях. Так, импульс типа А может вести к преимущественному подключению аденина к растущей цепи РНК, тогда как импульс Г приводит к заметно отличной ионной обстановке, так что в цепь преимущественно включается гуанин. Последовательность импульсов в этом случае может привести к образованию блоксополимера, в котором последовательность оснований отражает последовательность импульсов. Поскольку различные олигонуклеотиды связывают ионы в разной степени, блоксополимер может, при последующем гидролизе, воспроизвести последовательность различных импульсов, вызвавших его синтез. Так единственный афферентный импульс может вызвать вспоминание сложной последовательности импульсов и послать их по тем путям, которые определены преформированными синаптическими связями.

Как в исходном, так и в преобразованных вариантах эта модель, конечно, весьма спекулятивна. Однако она содержит конкретные приложения, которые можно проверить экспериментально. Действительно ли соответствующие энзимы могут быть найдены в нервных клетках? Действительно ли они инактивны в среде, подобной аксоплазме, находящейся в покоящемся состоянии? Может ли изменение ионной обстановки, подобное вызванному импульсом, активировать энзим? Может ли отношение полимер — мономер изменить процесс от чистого синтеза к чистому гидролизу? Может

ли в результате одного импульса синтезироваться такое количество молекул РНК, которого достаточно для того, чтобы связанное при этом число ионов заметно подействовало на последующий импульс? И т. д.

Первая цель создания модели состояла, однако, в иллюстрации одного момента, связанного с многоуровневыми системами: всякий раз, когда модель предложена на данном уровне компетентными исследователями, по образованию относящимися к уровню меньшего увеличения, и соответствует наблюдениям на этом низшем уровне, существенно, чтобы модель исследовали те, кто получил знания и работает на том же уровне, к которому относится модель. Это нужно для того, чтобы увидеть, не требует ли модель от материалов тех свойств, которыми они не могут обладать, и не противоречит ли она какому-либо из хорошо установленных принципов, таких как второй закон термодинамики, микроскопическая обратимость, сохранение энергии и т. д. Когда кто-либо начинает впервые знакомиться на молекулярном уровне с теорией роли РНК в явлениях памяти, то ему кажется, что теория требует почти невозможных свойств от ферментов и субстратов. Если они действительно невозможны, то должны быть высказаны серьезные соображения в пользу того, чтобы отказаться от модели, несмотря на то, что она может служить для объяснения наблюдений на уровне поведения. Однако, как показано выше, можно создать модель, состоящую из системы на молекулярном уровне, которая находится в супрамолекулярном окружении, причем эта модель, по-видимому, не предъявляет невозможных требований к участвующим молекулам (в пределах системы). Модель может работать без внешнего вмешательства, лишь используются термины других уровней, такие как «направленный синтез», при этом модель отвечает некоторым наблюдениям на уровне поведения и имеет приложения, которые могут быть проверены как на поведенческом, так и на биохимическом уровне. В общем модели уровня большего увеличения, когда они проясняются и развиваются представителями данного уровня, становятся богаче в деталях и приобретают более обширную сеть приложений, доступных проверке, по сравнению с моделью этого уровня, созданной представителями уровня меньшего увеличения, поскольку их главная цель — использовать модель для объяснения наблюдений, сделанных на уровне меньшего увеличения.

Представители более высокого уровня имеют дополнительные обязанности: они должны искать альтернативные модели, которые одинаково хорошо объяснили бы наблюдения на низшем уровне. Это столь же важная задача, как создание первой модели, описывающей наблюдения. Возможно, что две наиболее важные функции альтернативных моделей состоят в том, что они заставляют нас осторожно относиться к поспешному принятию какой-либо одной модели и ведут к гораздо более тщательной экспериментальной

проверке. Несостоятельность включения в ткань науки только одной из нескольких одинаково ценных моделей очевидна. Возрастание эффективности экспериментальных замыслов, когда планируются только те эксперименты, которые позволяют различить альтернативные модели, также очевидно.

Самовоспроизведение ДНК

Наука не развивается последовательно, начиная с основных принципов структуры материи, а движется одновременно на многих уровнях, каждый из которых имеет собственный язык, набор экспериментальных методик, а также свои представления о доказательствах, объяснениях и возможности предсказаний. Нам хотелось бы привести другой пример того, как поток информации между различными уровнями воздействует на ход прогресса на каждом из уровней. Для этого второго примера мы избрали модель, которая намного лучше документирована, чем модель РНК-память: речь идет о модели, согласно которой генетическую информацию несет последовательность нуклеотидов в ДНК, причем для передачи ее потомству, получаемому при клеточном делении, информация копируется путем репликации ДНК. Согласно этой модели, созданной Уотсоном и Криком, ДНК состоит из двух спиралей, удерживаемых вместе комплементарными (дополнительными) парами оснований: аденин с тиминном, гуанин с цитозином. Во время репликации ДНК каждая спираль производит синтез другой спирали, дополнительной по отношению к ней. Эта модель, основанная на приближенно исследованной молекулярной структуре ДНК, может служить замечательным примером того, как модель, созданная на одном уровне, способна стимулировать большой круг новых исследований и вызвать прогресс как на нижележащих, так и на вышележащих уровнях. Быстрое принятие модели и ее широкое и успешное приложении на биохимическом уровне и уровнях меньших увеличений в значительной мере объясняется тем, что она проста и наглядна по форме, а поэтому легко воспринимается представителями разных уровней без обращения к сложным физико-химическим концепциям. Любой, кто взглянул на картинки пар оснований А — Т, Г — Ц, которые слагают присоединенные углеводные кольца в одинаковые геометрические узоры и удерживаются вместе все теми же знакомыми связями, известными под названием водородных связей, может почувствовать, что репликация ДНК воистину вполне понятна. Тот факт, что из-за аперiodичности нуклеотидной последовательности действительная локализация оснований затемняется при анализе в рентгеновых лучах, был одним из нескольких фактов, которые на биохимическом и нижележащих уровнях оставались либо неизвестными, либо сознательно затушевывались из почтения к модели и из-за удачных ее применений на этих уровнях.

Исследование парных оснований на молекулярном и субмолекулярном уровнях началось всерьез после появления модели Уотсона — Крика в 1953 г. С прогрессом исследований на этих уровнях идея о дополнительных парах А — Т и Г — Ц, объясняющих самовоспроизведение ДНК, подвергалась подтачиванию несколькими течениями, от демонстрации Данагью (Donohue), что имеется 27 других комплементарных пар оснований, которые можно получить на бумаге, до обнаружения того, что ряд из них существует в растворе, и до доказательства, что когда А и Т совместно кристаллизованы, они действительно составляют пару, но не той ориентации, какая предложена Уотсоном и Криком. Разрушение модели предотвратил аргумент, согласно которому пары А — Т и Г — Ц, предложенные Уотсоном и Криком, лучше всего согласуются с хорошо известной скелетной структурой, обеспечиваемой фосфодиэфирными связями между соседними основаниями. Соответствующая гипотеза состояла в том, что скелет, создающий жесткое окружение, ведет к существованию пар А — Т и Г — Ц Уотсона — Крика. Однако, когда это объяснение рассматривается вплотную на молекулярном уровне, оно становится головоломкой, требующей объяснения.

Предположим, что происходит удвоение ДНК. Двуспиральная структура должна разделиться, по крайней мере, локально, чтобы создать две новые спирали. Теперь рассмотрим частично воспроизведенную ДНК с родительской спиралью, прикрепленной к ней растущей дочерней спиралью и очередным нуклеозидтрифосфатом, который должен присоединяться. Если мы предположим, что скелет создает жесткость, в силу которой пары оснований А — Т и Г — Ц становятся в исключительное положение среди других, тогда придется предположить, что следующее основание, которое должно присоединиться, сначала связывается фосфодиэфирной связью с растущей спиралью, чтобы приобрести необходимую жесткость, и лишь затем происходит проверка, является ли это основание комплементарным к основанию родительской спирали. Среда содержит все четыре нуклеозидтрифосфата, и энзим полимераза, совершенно очевидно, может образовать фосфодиэфирные связи, используя любой из них. Некомплементарные основания будут присоединяться к растущей цепи в трех четвертых всех случаев. Если уж основание было присоединено ковалентно к растущей цепи, и после этого обнаружилось, что оно не является дополнительным к основанию родительской спирали, ошибка не может быть исправлена ничем, кроме энергетически дорогостоящего процесса гидролиза фосфодиэфирной связи. Если ошибку нельзя исправить этим путем, то либо должен остановиться дальнейший синтез, либо он будет продолжаться с уже вошедшей мутационной ошибкой. По грубой оценке три четверти включенных оснований должны быть неверными, т. е. не комплементарными в смысле Уотсона — Крика.

С другой стороны, если основание, которое должно присоединиться, сначала пытается образовать пару с основанием родительской спирали, до того, как оно будет ковалентно связано с растущей цепочкой через фосфодиэфирную связь, то не возникнет скелетной жесткости, стимулирующей образование пар именно А — Т и Г — Ц.

Мы надеемся, что эта дилемма может быть разрешена с привлечением двух идей, которые, как представляется, налагают на систему только разумные требования: 1) нуклеозидтрифосфат сам по себе является жестким, 2) полимеразы образует фосфодиэфирную связь только в тех случаях, когда 3'ОН на конце растущей цепочки и первый фосфат присоединяемого нуклеозидтрифосфата находятся в существенно том же геометрическом отношении, в котором они должны быть после образования фосфодиэфирных связей. Другими словами, полимеразы не сведет две группы вместе, если они взаимно удалены, но объединит их и расщепит пирофосфат, если они находятся в передней позиции. Мы, следовательно, полагаем, что входящее основание образует пару с основанием родительской спирали. Экспериментальные исследования показали, что любое данное основание образует пару с несколькими другими основаниями, а теоретические исследования на субмолекулярном уровне показали, что оно может образовать пару с любым основанием. Пары образуют весьма стабильный комплекс с очень жесткой геометрией. Углеродный трифосфат будет тогда иметь определенное геометрическое отношение к 3'ОН растущей цепи, и если они достаточно близки для действия полимеразы, то образуется фосфодиэфирная связь. Если они недостаточно близки, то ковалентная связь не возникает, и постепенно эта пара оснований диссоциирует и разрушится, с тем чтобы заместиться другим пробным основанием за счет диффузии в среде. Этот процесс будет повторяться, пока в конце концов группы случайно не окажутся в передней позиции, и тогда образуется фосфодиэфирная связь и основание ковалентно свяжется с растущей цепочкой. Эксперименты показали, что один и тот же нуклеотид не может постоянно связываться в полимер исключительно путем образования пар оснований, даже если они дополнительные в смысле Уотсона — Крика, так что наличие описанного процесса проб и ошибок имеет прямое подтверждение.

Одно из следствий модели заключается в том, что аналогичные основания, которые образуют пары с другими основаниями при той же геометрии, что и аденин, и которые поэтому имеют трифосфатные группы своих сахаров в той же позиции относительно группы 3'ОН растущей цепи, могут включаться как заместители аденина. Это предсказание было экспериментально продемонстрировано (Josse, Richardson, Schildkraut, Kornberg).

Модель может быть далее усовершенствована на субмолекулярном уровне путем оценки равновесных геометрий различных

пар оснований и оценки расстояния между первым фосфатом и группой 3'ОН, с которой он должен связываться, принимая, что родительская спираль и та часть дочерней спирали, которая уже образована, находятся в жесткой геометрии. Равновесные геометрии могут быть угаданы либо при изображении приблизительно линейных водородных связей между основаниями, либо расчетом геометрий, основанным на наборе предположительных межмолекулярных потенциальных функций. Например, потенциал электростатического притяжения, потенциал отталкивания жестких сфер могут быть использованы при расчете потенциальных энергетических поверхностей, минимумы которых можно принять соответствующими равновесной геометрии.

Можно далее усовершенствовать модель, рассматривая ограниченную гибкость пар оснований по отношению к их равновесной геометрии. Используя коэффициенты Больцмана для оценки вероятности того, что та или иная пара оснований существенно отклонилась от своего энергетического минимума, чтобы поместить углеводный трифосфат в позицию, необходимую для образования фосфодиэфира, можно оценить процент каждого типа пар, которые входят в ДНК. Такие величины должны быть связаны с числом спонтанных мутаций, происходящих при клеточном делении. Сильная проверка модели заключалась бы в сравнении расчетного и наблюдаемого процента содержащихся непарных оснований, измеренного либо прямо, либо косвенно, по скоростям мутации на биохимическом уровне или уровнях меньшего увеличения. Такие количественные предсказания не могут быть высказаны на языке модели, описывающей на химическом уровне, какие основания соединяются с другими основаниями, и даже на молекулярном уровне в терминах необходимости «линейных водородных связей», но только в модели, описанной на субмолекулярном уровне в терминах межмолекулярных потенциалов или других энергетических факторов, что позволяет иметь дело с энергетическими потребностями для деформации межмолекулярных комплексов относительно минимума их потенциальной энергии. Нужно отметить, что была предложена модель, описанная на молекулярном уровне в терминах потребности термодинамической энергии для образования таутомерных форм оснований, которая также способна предсказывать процент включенных непарных оснований. Однако одной из основных предпосылок в этой модели служит требование, по которому могут включаться только пары, подобные А — Т и Г — Ц, в противоположность нашей модели, исходящей из того, что это — именно то предположение (из числа положенных в основу объяснения самовоспроизведения ДНК), которое само более всего нуждается в объяснении.

Распознавание в системе кодон — антикодон

Можно привести третий пример для иллюстрации принципа, по которому модель рассматривается как объяснение представителями того же уровня, что и модель, но рассматривается как описание представителями меньших увеличений, и как проблема — работающими при больших увеличениях. Он позволяет также отчетливо выразить часто встречающуюся проблему внешних ограничений. С молекулярной точки зрения, каждая молекула скользит вдоль самых высоких градиентов потенциальных поверхностей, созданных ею и соседними молекулами. Видимое организованное и целенаправленное биологическое поведение возникает как результат сложения бесчисленного количества таких молекулярных процессов. На различных уровнях увеличения человеческий ум может видеть признаки организации и целесообразности, проглядывающие сквозь молекулярные джунгли и составляющие на каждом из уровней основы различных научных дисциплин. На каждом уровне оказывается полезным различать анализируемую систему и окружающую ее среду, что придает внешнюю определенность системе. Мы рассматриваем человека в его социальной и физической среде, орган — неотрывно от человека, клетку — от органа, рибосому — от клетки, РНК — от рибосомы. Это ведет к соблазну предполагать, что среда всегда может рассматриваться по крайней мере относящейся к близлежащему из низших уровней увеличения, поскольку такое упрощение уменьшает число отдельных сущностей, которые приходится рассматривать в модели. Классическая термодинамика до тонкостей разработала концепцию «система — среда», показала ее применимость при решении проблем и в то же время ясно показала ее произвольность и гибкость: можно рассматривать поршень, не имеющий трения, как систему в термостатированной среде, чтобы рассчитать максимальную эффективность превращения тепла в работу, или рассматривать поршень-термостат как систему, находящуюся в среде вакуума, чтобы рассчитать адиабатическую эффективность. Полезный урок, который нужно извлечь из термодинамики, состоит в том, что внешние ограничения, системы или среды существуют только как понятия в сознании наблюдателя, для его удобства.

Третий пример касается анализа одного из критических этапов общего процесса, с помощью которого информация, накопленная в ДНК, преобразуется в биологическое действие. Некоторое время принималось, что информация, накопленная в нуклеотидной последовательности ДНК, полностью определяет продукцию катализаторов протеина, называемых ферментами, которые затем направляют по специфическим и управляемым путям деградацию пищи, богатой энергией и бедной энтропией. Эта пища была первоначально создана в растениях с помощью фотосинтеза. Растения используют солнечный свет для превращения CO_2 и H_2O в

$(\text{CH}_2\text{O})_n + n\text{O}_2$, и пределы биологической активности отдельного организма определяются той высокой степенью тщательности, с которой он производит обратный процесс.

Биохимики нашли возможным разложить весь процесс синтеза протеина на несколько этапов: образование РНК, в которой последовательность параллельна таковой в одной из спиралей ДНК (транскрипция), миграция этой информационной РНК к большой нуклеопротеиновой частице (рибосоме), связывание аминокислоты с особой РНК (транспортной РНК), образование комплекса рибосома — информационная РНК — транспортная РНК — аминокислота (трансляция), и добавление аминокислоты в комплексе к растущей цепи протеина. Эти этапы в настоящее время разбиваются на еще меньшие, но даже самые малые из этапов включают много молекулярных событий.

Биохимия протеинового синтеза представляет в настоящее время крайне активную область, возможно потому, что она может рассматриваться как близкая к основе самой жизни, будучи именно тем процессом, с помощью которого созданы всемогущие ферменты. Это напоминает проблему первичности курицы или яйца, поскольку для катализа большинства этапов протеинового синтеза опять-таки требуются ферменты. Вдобавок, они требуют довольно строго определенных концентраций специфических субстратов, таких как нуклеозидтрифосфат, который был создан сложными биохимическими путями, причем их подача управляется еще более сложным динамическим балансом внутри биохимической схемы. Таким образом, биохимия синтеза полинуклеотида может считаться расположенной в центре процесса жизни. Это действительно проблема типа «система — среда», которая может быть окончательно разрешена, когда биохимики с помощью теории систем и вычислительных машин смогут создать ясную одноуровневую модель, включающую как синтез протеина, так и синтез полинуклеотида внутри «системы». Но в настоящее время нет смысла трактовать синтез протеина как систему, находящуюся в среде ионов, субстратов и уже сформированных протеинов. Число шагов следует уменьшить, они могут быть описаны на биохимическом уровне, а некоторые из них могут получить объяснение на химическом уровне водородных связей. По отношению к последнему утверждению исключением является этап, на котором аминокислота и ее «комплементарная» информационная РНК распознают одна другую. Следующим аргументом в пользу рассмотрения синтеза протеина как системы является тот факт, что хотя ферментатически катализируемая биосинтетическая последовательность этапов, таких как этап, производящий нуклеозидтрифосфаты, может быть биохимически описана, эти этапы крайне трудно биохимически объяснить (описать молекулярно), поскольку каждый этап включает образование и разрыв ковалентных связей. Обычно признается, что для объяснения того, как фермент редуцирует свободную энергию ак-

тивации для разрыва ковалентной связи, требуется описание на квантово-механическом уровне, которое не только было бы сложным, но к которому не так-то просто подойти. Этапы, включающие образование и разрыв водородных связей, имеющиеся в процессе синтеза протеина, также трудно описать на квантово-механическом уровне, но по историческим причинам мы и не чувствуем необходимости переходить на этот уровень для их понимания.

Этапом в синтезе протеина, который, кажется, не требует участия никаких энзимов и который детально изучен на биохимическом уровне, является этап взаимного опознавания информационной РНК и транспортной РНК. В простых исследованиях по направленному связыванию, проведенных Хиренбергом и сотрудниками, было показано, что синтетическая тринуклеотидная информационная РНК способна комплексоваться с рибосомами и некоторыми транспортными РНК. Эти и другие эксперименты привели к созданию таблицы, в которой каждый из 64 возможных тринуклеотидов соотносится с аминокислотой, которую он связывает через транспортную РНК. Полная таблица описывает генетический код на биохимическом уровне, и ее создание было поистине замечательным достижением. Аналогично всем большим прорывам в знаниях о свойствах одного уровня, это, несомненно, не только дает объяснение многим наблюдениям на уровнях меньших увеличений, но исключительно полезно для планирования экспериментов на этих уровнях. Благодаря природе многоуровневых систем это может также явиться источником проблем для высших уровней.

Любопытно, что даже до обнаружения кода он был уже объяснен в терминах образования дополнительных пар Уотсона — Крика между тремя основаниями в информационной РНК (кодон) и тремя из 80 нуклеотидов в транспортной РНК (антикодон). Быстрое, априорное принятие этого молекулярного описания (биохимического объяснения) даже до начала экспериментов с тринуклеотидами (причем альтернативные модели молекулярного уровня почти совершенно не рассматривались) должно быть приписано тому, что описание обращается к такой странно притягательной сущности, как водородная связь. По ряду причин аргументы о том, что природа водородной связи еще остается загадкой на молекулярном, субмолекулярном и квантово-механическом уровнях, кажутся маловажными. Это покажется еще более замечательным, если учесть, что такое объяснение кода получило признание не только до того, как был найден сам код, но даже раньше, чем стала известна нуклеотидная последовательность единственной из транспортных РНК.

Однако когда эксперименты по направленному связыванию начали выявлять вырождение, т. е. когда было показано, что несколько различных тринуклеотидов кодируют ту же аминокислоту, объяснение посредством комплементарных пар оснований начало

терять репутацию удовлетворительного объяснения. Но даже и тогда это объяснение порождало сильную тенденцию объяснить вырождение в терминах существования многообразных форм транспортной РНК для данной аминокислоты, каждая из которых имеет в антикодоне последовательность, дополнительную к одному из вырожденных кодонов. Однако даже фракционированные транспортные РНК оказались вырожденными. Длительные попытки открыть свойства вырождения, которые предполагают переосмысление ценности опубликованных наблюдений, привели к заключению, что вырождение затрагивает только третье основание триплета в кодоне. Несмотря на то, что даже сегодня все имеющиеся данные не могут быть объяснены этим свойством, постепенно внимание направляется к проблеме третьего основания. Одно из возможных объяснений, выдвинутых для этого свойства, довольно неожиданно оказалось не биохимическим описанием, не объяснением (молекулярным описанием), а простой перефразировкой объясняемого свойства в других словах: третье основание не распознается. Другое объяснение для биохимика (молекулярное описание) состояло в том, что одно из необычных оснований, которое присутствует в транспортной РНК и которое может образовывать пару более чем с одним основанием, противостоит третьей «букве» кодона. Это предложение ведет к поиску среди неполно известных последовательностей транспортных РНК такой последовательности, которая содержит необычное основание, примыкающее к дополнениям (в смысле Уотсона — Крика) двух других оснований кодона. Это еще одна дань модели Уотсона — Крика: сочтено необходимым привлечь необычное основание для объяснения того, почему одно основание может образовать пару с двумя или более основаниями. Любое основание может образовать пару с каждым из других, за исключением ситуации, когда ограничение накладывается внешним геометрическим контуром, который в случае системы кодон — антикодон неизвестен.

Последовательность транспортной РНК из 80 нуклеотидов содержит 78 тринуклеотидов, большинство из которых могут быть дополнительными к тому или другому из 64 кодонов. Довольно удивительно, что до сих пор отсутствуют прямые экспериментальные доказательства, какая из этих тринуклеотидных последовательностей транспортной РНК действительно связана с кодоном. Основная модель распознавания в системе кодон — антикодон требует, следовательно, чтобы все эти тринуклеотидные последовательности транспортной РНК, кроме одной, были недоступны кодону. Этому требованию удовлетворяет принятие модели «шпильки» для транспортной РНК, по которой единственная спираль складывается вдвое и связывает все основания в пары с помощью водородных связей, исключая три основания, расположенные в петле. Однако, когда была определена последовательность транспортной РНК, обнаружилось, что для удовлетворения обоим кри-

териям необходимо привлечь несколько таких петель. К счастью, не обязательно все время иметь дело со структурой транспортной РНК, выводимой из предполагаемых требований частной модели распознавания в системе кодон — антикодон; трехмерная структура может быть непосредственно определена по диффракции в рентгеновых лучах. Хотя этот метод показал возможность включить в модель в ближайшем будущем уже известные структуры, встретились некоторые экспериментальные трудности, которые фактически вызвали неудержимую активность, направленную на выяснение структуры транспортной РНК вискозиметрическим, оптическим и энзиматическим методами, которые заведомо ненадежны при определении молекулярных структур на уровне ангстремов. Однако мы совершенно уверенно предполагаем, что если гипотеза петель справедлива, то три основания антикодона в петле не находятся в позиции, нужной для образования двухспирального завитка ДНК формы *B* с кодоном.

Фактически, несмотря на некоторую уверенность в обратном, на молекулярном уровне этап распознавания в системе кодон — антикодон представляется громадной проблемой. Мы не знаем геометрии кодона или антикодона, изолированных или связанных с рибосомой, которая может воздействовать на их равновесную геометрию. Даже если бы мы предположили, что кодон и антикодон скручиваются так, что образуют маленький сегмент спирали, можно быть уверенным, что они не находятся в форме *B* геометрии ДНК ни по какой другой причине, кроме присутствия рибозы скорее, чем дезоксирибозы. Поскольку, как упоминается в разделе о самовоспроизведении ДНК, становится все более очевидным, что данное основание может образовывать пару с любым другим, внешние ограничения, наложенные на систему кодон — антикодон жесткостью всего комплекса рибосома — информационная РНК — транспортная РНК, могут полностью определять, какое основание в кодоне будет образовывать пару исключительно или предпочтительно с определенным основанием в антикодоне. Эта идея ведет к приятным размышлениям: может оказаться, что образование пар дополнительных оснований участвует в распознавании в системе кодон — антикодон, но что дополнения эти совершенно отличны от А — Т и Г — Ц пар, предложенных Уотсоном — Криком для ДНК. Смущающая, но вполне вероятная возможность. Более того, если внешние ограничения различны в трех положениях, то в зависимости от положения дополнительными могут быть различные основания.

Можно утверждать, что если одно основание кодона не может быть заменено другим, то существует достаточная жесткость, наложенная средой, так что свободная энергия присоединения другого основания к рассматриваемому основанию антикодона много более положительная. Если же возможна подстановка другого основания, то налицо достаточная гибкость, в силу которой сво-

бодная энергия присоединения этих двух оснований к основанию антикодона сравнима по величине. Модель колебаний такого типа не ясна из-за того, что она описана в терминах как субмолекулярных структур, так и супрамолекулярной термодинамики. Она, кроме того, неполна для субмолекулярного уровня, поскольку не включает молекулярные силы, определяющие либо ограниченную гибкость, либо взаимодействие оснований. Тем не менее некоторые могут найти, что это удовлетворительная объясняющая модель. Знакомство с анализом многоуровневых систем приводит к снижению способности получать удовлетворение от неясных (многоуровневых) моделей. Нужно принять, что должно быть получено больше структурных данных, прежде чем может быть создана значимая, т. е. почти уникальная молекулярная модель распознавания в системе кодон — антикодон.

Легкость, с которой можно пытаться построить модели, включающие систему и среду низшего уровня (которая налагает ограничения на систему), чтобы получить объяснение, например, для специфичности образования пар оснований, затемняет несколько ключевых проблем: молекула в кристалле ограничена так, что находится в фиксированном положении, но сами ограничения возникают как результат межмолекулярных взаимодействий, в которых равно участвует и данная молекула. В действительности не существует внешних ограничений, и поэтому одинаково резонно считать, что ограничения наложены молекулой на кристалл либо что ограничения наложены на молекулу кристаллом. Аналогично можно задаться вопросом, вызывает ли образование пары оснований геометрические ограничения в скелете полинуклеотида или жесткость скелетных сил вызывает образование пар некоторых оснований? Ограничивает ли соединение с антикодоном геометрию скелетов транспортной и информационной РНК или наоборот? Это далеко не тривиальные вопросы, на которые нужно ответить, прежде чем можно будет создать ясные, осмысленные модели нескольких этапов синтеза протеина. Чтобы ответить на эти вопросы, потребуются искусные эксперименты и (или) экстенсивные молекулярно-физические расчеты, которые включают и пары оснований, и скелеты в качестве частей системы и которые опишут их взаимодействие в терминах адекватной системы потенциальных функций.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД В СОВРЕМЕННОЙ БИОЛОГИИ (Материалы встречи-дискуссии)	7
А. А. МАЛИНОВСКИЙ	
Теория структур и ее место в системном подходе	10
Определение понятия системы и системного подхода	32
Проблема времени в биологических системах	65
Н. В. ТИМОФЕЕВ-РЕСОВСКИЙ	
Структурные уровни биологических систем	80
Системный подход в экологии	114
Вместо заключения	134
ТЕОРИЯ СИСТЕМ И БИОЛОГИЯ (Переводы с английского)	137
М. МЕСАРОВИЧ	
Теория систем и биология: точка зрения теоретика	137
Т. Х. УОТЕРМАН	
Теория систем и биология: точка зрения биолога	164
Д. Ф. БРЭДЛИ	
Многоуровневые системы и биология: точка зрения представителя субмолекулярной биологии	187



СИСТЕМНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ежегодник 1970

Утверждено к печати

Институтом истории естествознания и техники АН СССР

Редактор Б. А. Костеловский. Редактор издательства Л. К. Наскина

Художественный редактор Н. Н. Власик

Технические редакторы В. И. Зудина, Л. Н. Золотухина

Сдано в набор 27/VII 1970 г. Подписано к печати 8/X 1970 г. Формат 60×90 1/16.

Бумага № 2. Усл. печ. л. 13. Уч.-изд. л. 13,6. Зак. 1344. Т-14753. Тираж 4300.

Цена 95 коп.

Издательство «Наука». Москва, К-62, Подсосенский пер., д. 21

Набрано Ордена Трудового Красного Знамени

Первой Образцовой типографией имени А. А. Жданова

Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР

Москва, М-54, Валовая, 28

Отпечатано 2-й типографией издательства «Наука». Москва, Г-99, Шубинский пер., 10