

Организация систем — живых и неживых

В. А. Геодакян

Сб.: *Системные исследования*, М., Наука, 1970, с. 49–62.

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 дополнительностью, 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 вырождено).

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

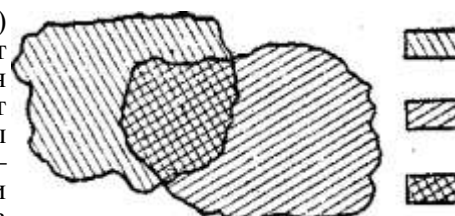
охлаждается или нагревается, если нет тепловой изоляции, принимает или отдает электричество, если нет электроизоляции, и т. д. Картина, таким образом, слишком усложняется. Чтобы несколько облегчить ее понимание, введем три новых понятия — пространство способностей, пространство возможностей и пространство 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 возможностей (1) и пространству способностей (2), образуют третье многомерное пространство — пространство реализаций (3), которое характеризует поведение системы (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 лапы 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», вводится 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 негэнтропию 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, причём 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. Причём 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):

$$P * dE = dA.$$

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 её 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 производство 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 заложен 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, то 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 специфическое 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. «Выжили» 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, аперриодический 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 «аперриодичность» 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*. Возможностью 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.

Существует 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 небезынтесным привести краткую сводку обсуждения определения понятия системы в его общенаучных аспектах. Уже первые попытки построить такое определение натолкнулись на серьезные трудности двойного порядка. Во-первых, понятие системы широко используется в самых различных областях науки и практики, что порождает такое несоответствие значения 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 доказало невысокую эффективность определений, призванных характеризовать «все мыслимые» системы сразу. Поэтому в литературе последних лет акцент делается на построении определений, 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 не явно), 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. Шедровицкого).

Множество взаимосвязанных элементов, образующих систему, противопоставляется *среде*, с которой взаимодействует данная система, причем характер этого взаимодействия может быть самым различным (в

общем случае различают стоого 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, Я. Ф. Овчинников. Принципы сохранения. М., 1966) или совокупность устойчивых связей и отношений системы (такое понимание развивал на встрече-дискуссии 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 её подсистем. Как коренное свойство биологических систем активность поведения рассматривается в концепции физиологии активности, созданной А. А. Бернпггейном. 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. 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. i. p. 18}. Более узкое определение дает Л. Берталанфи: система есть комплекс элементов, находящихся во взаимодействии (L. von Bertalanfy. Allgemeine Systemtheorie.—«Deutsche Universitätszeitung». 1957. Nr. 5—6. S. 9). Берталанфи различает закрытые 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 продолжаются 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 Л. 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.