

КОНЦЕПЦИЯ ИНФОРМАЦИИ И ЖИВЫЕ СИСТЕМЫ

В. А. ГЕОДАКЯН

Институт биологии развития АН

Рассматривая живые системы как открытые рабочие системы, в которых рабочим субстратом служит информация, предлагается ввести в рассмотрение и четко различать три понятия, связанные с этим субстратом: информационный заряд (количество или объем информации), информационный потенциал (качество или работоспособность информации) и информационную работу (работу организации). Следует различать понятие упорядоченности, мерой которой является энтропия, от понятия организации, мера которой—информация. В отличие от упорядоченности и энтропии понятия организации и информации связаны с целью системы. Отношение информации к энтропии аналогично отношению других «ценных» зарядов (механический, электрический, химический и др.) к энтропии. В процессе онтогенеза информационный потенциал падает, а в филогенезе он непрерывно растет.

1. Делается много попыток применить теорию информации для описания и понимания биологических явлений и прежде всего онтогенеза. В этом вопросе пока нет окончательной ясности, наоборот, много путаницы и непонимания. В попытках использовать теорию информации как метод исследования, инструмент, не следует забывать, что этот инструмент еще далеко не готов, и его нужно создавать и совершенствовать (Геодакян, 1970).

Действительно, что такое информация? Как она связана с энтропией и какое место они обе занимают в явлениях жизни? Есть ли разница между упорядоченностью и организацией? Можно ли их мерить или хотя бы сравнить и какова их роль в живых системах? У кого больше информации—у зиготы или у организма, в генотипе или фенотипе? Как представить себе качество информации? Какова роль среды во всем этом? На все эти вопросы мы пока не имеем четких, однозначных ответов. Одни считают, например, что информация больше в генотипе, так как из одного и того же генотипа в разных условиях среды могут получаться разные фенотипы, в результате реализации одной из многих возможностей генотипа (Медников, 1971; Шмальгаузен, 1968). Другие считают что наоборот, взрослый организм, фенотип, несет больше информации, так как он включает полностью информацию генотипа плюс информацию от среды (Гамбург, 1972; Равен, 1964; Уоддингтон, 1970). Некоторые ученые уже рассчитывают количество информации в зиготе или организме в битах и всерьез толкуют, о вкладе информации, который вносят молекулы воды или мембраны (Сэтлоу, Поллард, 1964; Dancoff, Quastler, 1953; Elsasser, 1958).

2. Оценивая такие расчеты количества информации как преждевременные и в значительной степени бессмысленные (Аптер, 1970; Геодакян, 1971) (ведь в лучшем случае речь может идти только о верхних пределах, а это почти ничего не дает), мы считаем самым эффективным настоящее время направить усилия на поиски качественных, концептуальных решений.

Если сравнить с положением дел в физике начала XX- в., то нам нужны сейчас не сложные квантовомеханические расчеты атома (которые в физике появились значительно позже), а нужна первая качественная догадка Резерфорда о планетарном строении атома. Нужны разные точки зрения, концепции, качественные модели, которые можно сравнивать, пробовать и выбирать. А для начала нужна непротиворечивая система понятий, позволяющая нарисовать всю картину в общих чертах.

В настоящей статье, предлагается несколько иная—новая трактовка понятий упорядоченности, организации, энтропии, информации и их взаимосвязей, понятий количества и качества информации и т. д.

3. Эволюционными предшественниками живых систем были неживые. Поэтому при поисках

рациональных способов их описания естественно и целесообразно сначала обсудить их отношение к методам описания неживых, физико-химических систем. Прежде всего это относится к такому универсальному обобщению, как термодинамика.

Живые системы в термодинамическом отношении представляют собой открытые рабочие системы. В отличие от физико-химических систем, рабочие взаимоотношения которых со средой полностью описываются процессами передачи вещества и различных видов энергии, в «работе» живых систем более существенную и определяющую роль играет информация. Например, в таких процессах, как филогенез, онтогенез, самовоспроизведение, обучение и т. д. доминирующей является именно информационная сторона.

4. Классическая теория информации определяет количество информации как меру того количества неопределенности данной ситуации, которое уничтожается после получения сообщения, т. е. чем меньше априорная вероятность того факта, о котором сообщается, тем большую информацию несет данное сообщение. В более широком смысле под информацией подразумеваются свойства процессов, дополняющие их энергетические и массовые характеристики.

Классическая теория игнорирует как смысл информации, так и ценность для получателя, хотя А. А. Харкевич уже в 1965 г. предложил ценность информации определить через приращение вероятности достижения цели, для которой собирается эта информация (Харкевич, 1965).

До сих пор отсутствуют ясные и четкие представления о понятиях количества и качества информации, об отношениях этих понятий к понятиям энтропии, упорядоченности и организации.

5. Для количественного описания состояния, системы и процессов, идущих в ней, в термодинамике применяются специальные физические параметры, которые называются обобщенными зарядами, или факторами экстенсивности (E). К ним относятся масса, объем, энтропия, электрический заряд и др. (де Бур, 1962).

Внутренняя энергия системы, как известно, определяется совокупностью этих обобщенных зарядов

$$U = f(E_1, E_2, E_3, \dots E_n)$$

Внутренняя энергия системы является функцией состояния и поэтому ее изменение можно представить в виде соответствующего полного дифференциала

$$dU = P_1 dE_1 + P_2 dE_2 + \dots P_n dE_n$$

где

$$P_1 = \left(\frac{\partial U}{\partial E_1} \right)_{[E_1]} ; P_2 = \left(\frac{\partial U}{\partial E_2} \right)_{[E_2]} ; \dots P_n = \left(\frac{\partial U}{\partial E_n} \right)_{[E_n]}$$

Коэффициенты P именуется обобщенными потенциалами или факторами интенсивности. Это те силы, которые вызывают перенос соответствующих зарядов, т. е. реализуют тот или другой процесс.

Каждому виду заряда соответствует свой, сопряженный с ним потенциал. Добавление в систему того или другого заряда приводит к повышению в системе сопряженного с этим зарядом потенциала. Приращение объемного заряда приводит к повышению давления, теплового заряда— к повышению температуры, электрического заряда— к повышению электрического потенциала и т. д.

б. Полностью изолированная от среды система не может совершить никакой работы. Возможность совершить работу появляется при снятии той или иной изоляции с системы. Например, если освободить закрепленный поршень (убрать механическую изоляцию), то газ, заключенный в цилиндре, получает возможность совершить механическую работу расширения; если убрать термическую изоляцию, то система может совершить тепловую работу, снятие электрической изоляции может дать электрическую работу и т. д. Иными словами, для того чтобы совершить тот или другой вид работы, необходимо наличие контакта со средой в виде соответствующего канала связи со средой.

Каждой форме контакта со средой отвечает сопряженная пара факторов экстенсивности и

интенсивности. При этом произведение обобщенного потенциала на изменение обобщенного заряда имеет размерность работы и называется обобщенной работой

$$P * dE = dA$$

Каждой паре сопряженных зарядов и потенциалов соответствует особого рода работа

Работа (A)	Потенциал (P)	Заряд (E)	Уравнение
Механическая	Давление газа (P)	Объем газа (V)	$A = P * dv$
Тепловая	Температура (T)	Энтропия (S)	$A = T * dS$
Электрическая	Электрический потенциал (U)	Электрический заряд (q)	$A = U * dq$
Химическая	Химический потенциал (μ)	Масса (m)	$A = \mu * dm$

Таким образом, обобщенные заряды являются теми рабочими субстратами, поток которых производит работу.

В отличие от обобщенных зарядов, величины которых зависят от массы (размеров) системы, величины обобщенных потенциалов от массы системы не зависят.

При соединении двух систем соответствующим каналом связи существенно различное поведение факторов экстенсивности и интенсивности. Первые, обобщенные заряды, складываются, ведут себя аддитивно

$$E = E_1 + E_2$$

в то время как вторые, обобщенные потенциалы, выравниваются

$$P = (P_1 E_1 + P_2 E_2) / (E_1 + E_2)$$

7. В применении к живым системам мы часто говорим о передаче информации, каналах передачи, о хранении, емкостях хранения (память в широком смысле), о кодировании или утрате информации и т. д. Следовательно, под информацией мы подразумеваем некую субстанцию, с которой можно все это делать. В системах, в которых доминируют информационные процессы, можно считать, что рабочим субстратом является информация. Значит, информацию следует рассматривать как еще один обобщенный заряд, некий фактор экстенсивности, информационный заряд, наподобие остальным обобщенным зарядам.

Естественно возникает вопрос о соответствующем, 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.

Фактор интенсивности, сопряженный с информационным зарядом можно назвать информационным потенциалом.

Работу, которую совершает информационный потенциал системы при передаче информационного заряда, назовем информационной работой, или работой организации.

8. Введение новых понятий диктуется соображениями аналогии, логической стройности и удобства.

Сопоставление живых систем с неживыми физико-химическими рабочими системами позволяет по аналогии ввести понятия количества информации—фактор экстенсивности (заряд), качества информации фактор интенсивности (потенциал), и работы информации и нарисовать

непротиворечивую картину взаимоотношений понятий, данного круга. Нас не должно смущать то обстоятельство, что новые величины—информационный заряд, информационный потенциал и информационную работу (работу организации) мы пока не можем измерить. Было время когда не умели мерить также температуру или энтропию, а эти понятия были введены в науку. Не поддается непосредственному измерению также и величина химического потенциала, понятие которого было введено в физическую химию Гиббсом еще в 1875 г., но тем не менее этим понятием мы успешно пользуемся.

9. Определив понятие качества информации как некий потенциал, перепад которого создает поток информационного заряда и совершает информационную работу (работу организации), мы тем самым устанавливаем различия между понятиями энтропии и упорядоченности с одной стороны, и соответственно информации и организации с другой.

Упорядоченность максимальна для правильного кристалла простого вещества при абсолютном нуле температуры. С ростом температуры упорядоченность монотонно уменьшается, в точке плавления кристалла она падает скачком, а далее, при нагреве жидкости, опять плавно понижается до точки кипения, претерпевая при этом второй скачок. Упорядоченность минимальна (полный хаос) для газа при высокой температуре.

Энтропия, являясь мерой разупорядоченности, мерой хаоса, минимальна для кристалла при абсолютном нуле температуры и максимальна для газа при высокой температуре. Следовательно, энтропия характеризует место, занимаемое системой в шкале порядок—беспорядок, а изменения ее—процессы упорядочения и разупорядочения.

Легко показать, что в этой энтропийной шкале (порядок—беспорядок) живые системы не занимают крайнего, исключительного положения. У них порядка явно меньше, чем у набора монокристаллов, химических элементов, входящих в их состав при абсолютном нуле, и несомненно больше, чем у газовой смеси из тех же элементов при высокой температуре.

Образно выражаясь, если живое существо спрессовать в кубик, в котором все атомы рассортированы в виде монокристаллов химических элементов, расположенных в строгом порядке, упорядоченность от это возрастет, а организация живого исчезнет. Таким образом, не степень упорядоченности является критерием и мерилем жизни, а особая организация. И утратить эту организацию можно как уменьшив, так и увеличив упорядоченность системы.

10. В отличие от упорядоченности понятие организации тесно связано с понятием цели системы (Геодакян, 1970; Малиновский, 1968). Понятие цели часто выступает в поведении управляемых, регуляторных или адаптивных систем. Однако условное понятие цели можно применить ко всем системам. В качестве «обобщенной» цели для всех систем можно предложить цель «сохранить свое существование» или же цель «полнее реализовать свои программы». Такая формулировка цели хорошо описывает поведение живых систем как в процессах филогенеза, так и онтогенеза. Понимая организацию как особый вид упорядоченности направленную на достижение цели системы, а информацию как меру организации, тем самым мы предлагаем четко отличать эти понятия от понятий упорядоченности и энтропии соответственно. Информация, которая увеличивает вероятность достижения цели, повышает организацию. И, наоборот, дезинформация, ухудшая организацию, уменьшает шанс достижения цели. Как организация, так и информация служат для «чего-то», а упорядоченность и энтропия—сами по себе, «вообще». Если сравнить последние со скалярными величинами, то первые представляют собой векторы, направленные к цели.

11. Многие авторы отождествляют понятие информации и энтропии считая, что вся разница между ними заключается лишь в том, что они имеют разный знак и разную размерность (Бриллюен, 1960; Шамбадаль, 1967). Такая трактовка, сводящая понятие информации почти к синониму энтропии, в значительной мере лишена смысла. Конечно любой процесс передачи информации сопровождается возрастанием энтропии, точно так же, как и любой процесс передачи электрических, объемных (механических) или химических зарядов. Энтропия, будучи фактором экстенсивности «низкосортной» энергии (тепла), возникает при всех рабочих процессах, связанных с обесценением любого из перечисленных ценных видов потенциала. Рассматривая информационный потенциал (работу) в качестве еще одного ценного вида энергии наряду с электрическим, механическим или химическим, отношения информационного заряда к энтропии

мы также должны трактовать аналогично отношению этих зарядов к энтропии. Отождествление информации с энтропией посылно отождествлению электрических, механических или химических зарядов с энтропией, и то и другое неправомерно.

12. Наглядным примером, поясняющим разницу между упорядоченностью и организацией, могут служить обои и картина художника. Упорядоченности больше в рисунке обоев, а организация выше у картины. Правильный рисунок обоев лишен смысла, а картина художника имеет определенный смысл (должна иметь, во всяком случае), преследует определенную цель—создать то или иное впечатление, настроение вызвать определенные чувства, мысли и т. д.

Чтобы пояснить различие между упорядоченностью и организацией рассмотрим .еще пример автоматической камеры хранения, замок которой имеет четыре разряда по десятичной системе. Следовательно, число всех возможных комбинаций 10^4 (от 0000 до 9999). Пока в замок двери не вложена определенная информация, в виде одной из 10^4 комбинаций, все 10^4 комбинаций равнозначны. Среди них мы можем выделить более упорядоченные комбинации, например, 0000, 1111, 1234 и пр., а другие будут для нас «бесмысленными», например 6129, 2837 и т. д. Их мы считаем неупорядоченными, случайными. Как только мы набрали в замке любую из 10^4 комбинаций, скажем одну из неупорядоченных—2837, самым мы вложили в замок информацию о том, какая комбинация из 10^4 возможных открывает камеру. Вот эту комбинацию (2837), которая не является упорядоченной, но служит нашей цели «открыть дверь камеры», мы и должны считать организованной, в отличие от комбинаций упорядоченных, которые, однако, не открывают дверцу камеры.

Следовательно, организация—это особый вид, частный случай упорядоченности, которая способствует достижению цели системы. А упорядоченность—это простейший вид организации, которая не связана с целью системы.

13. Если совокупность всех внутренних степеней свободы системы образующих некое многомерное пространство, обозначить как пространство способностей, а совокупность всех внешних степеней свободы, образующих другое многомерное пространство,—как пространство возможностей, то точки, принадлежащие одновременно и тому, и другому пространству, образуют третье многомерное пространство—пространство реализации (Геодакян, 1970). Пространство способностей, или внутренняя программа системы, характеризует ее потенции, применительно к организму, это его генотип. Пространство возможностей характеризует запреты среды, накладываемые на программы системы. А пространство реализации—это то, что реализуется из данной программы в данных условиях, соответствует фенотипу организма.

14. Следовательно, сравнивая информационные особенности генотипа и фенотипа, можно сказать, что генотип—это перечень различных программ, которые в принципе могут быть реализованы, если позволят соответствующие условия среды, т. е. генотип обладает высоким информационным потенциалом и малым объемом информации (по сравнению с фенотипом). Генотип в этом смысле аналогичен газу под высоким давлением или телу с высокой температурой. Если не создать соответствующего канала связи (условий), не дать возможность потенциалу совершить работу, то программа останется нереализованной (как в семенах, которые могут годами лежать и сохранить свои потенции). Так что фенотипе представлена как внутренняя информация программы, так и внешняя информация среды. Приведу такой пример. Если в маточном растворе растет кристалл, то его форма определяется, с одной стороны информацией, заключенной в затравке и, с другой стороны, формой сосуда. Точно так же фенотипическая информация складывается из реализуемой части генотипической информации плюс информация от среды. С той лишь разницей, что в отличие от сосуда, форма которого постоянна, граница экологической ниши, «демаркационная линия» между живой системой и средой подвижна.

Например, высота дерева определяется, с одной стороны, внутренними факторами (капиллярные силы, мощность корней и пр.), а с другой стороны, факторами среды (силы тяжести, ветров и т. д.), и если внутренние .силы слабеют (скажем, организм стареет), то внешние наступают. Очень часто, с другой стороны демаркационной линии среду представляет тоже живая система; таково, например, динамическое равновесие в системах хищник—жертва, паразит—хозяин и т. д.

15. Рассматривая любую систему как совокупность взаимодействующих элементов,

выделенных из среды, можно говорить как о программе элементов, так и о программе системы в целом. Когда систему образуют элементы с однотипными программами, то мы имеем дело с популяционным типом систем, со слабым взаимодействием между элементами. Элементы такой системы обладают максимальным числом степеней свободы, их объединяют в систему одинаковые взаимоотношения со средой (поэтому системы такого типа можно назвать экзогенными). При усилении взаимодействия между элементами они постепенно утрачивают свои степени свободы, на какие-то пункты их программы накладываются запреты. Одновременно с этим появляется новая программа системы в целом. Утраченные программы (степени свободы) элементов выступают как плата за новую организацию, за новую программу системы. Такую картину можно проследить на всех уровнях организации материи. Независимо от того, образуют ли атомы молекулу, мономер—полимер, клетки—организм или организмы—популяцию, во всех случаях новая организация появляется в результате утраты части программ элементов. Поэтому любая специализация сопровождается утратой потенции. Например, свободная бактериальная клетка реализует гораздо больше программ, чем специализированная клетка многоклеточного организма (свободное движение, синтез разных веществ и т. д.). С появлением полового процесса (скрещивания) накладывается запрет на «самостоятельное» размножение отдельной особи, а с появлением дифференциации полов (специализация) утрачивает способность к «деторождению» мужской пол. Появление следующей ступени организации } общественных (социальных) животных (муравьи, пчелы) сопровождается дальнейшей специализацией и одновременным наложением запрета на программу размножения и самок, за исключением матки. Интересно отметить, что в гораздо слабее организованных популяциях млекопитающих (грызуны) происходит регуляция степени участия особей в размножении в зависимости от их иерархического (социального) ранга, наряду с такими параметрами, как вес, длительность жизни и пр (Christian, 1961). Здесь также уменьшение веса, числа потомков, длительности жизни являются платой за организацию—в данном случае за наличие вожака (α -животного) в группе.

Очень метко охарактеризовал эффект организации Наполеон, который считал, что один мамелюк всегда сильнее одного французского солдата, 10 мамелюков равны по силе 10 французам, а 100 мамелюков уже слабее 100 французам.

16. Приведем несколько мысленных экспериментов, наглядно поясняющих предлагаемые представления и аналогии.

а. Два тела имеют разные температуры. При соединении их каналом связи разность потенциалов (температур) создает поток зарядов (тепла) и может совершить работу (тепловую). При этом температуры тел выравниваются, а энтропии складываются.

б. В цилиндре под поршнем находится газ под определенным давлением. Если давление газа больше, чем давление окружающей среды, то при освобождении поршня (создания канала связи) система совершает работу против среды, если же, наоборот, давление среды больше давления газа, то среда совершает работу над системой—происходит сжатие газа. В обоих случаях факторы интенсивности (давления) выравниваются, а факторы экстенсивности (объемы) складываются.

в. В соответствующую среду поместим одну бактерию (создание канала связи). Как бактерию, так и среду мы представляем как подсистемы, имеющие свой информационный заряд и потенциал. Поскольку бактерия начинает размножаться и превращать вещество среды в биомассу бактерий (производить биологическую работу организации), то, очевидно, информационный потенциал бактерии в начальный момент следует считать выше потенциала среды. По мере размножения бактерии ее информационный потенциал падает, а объем информации (число копий) растет. Со средой происходит, обратное: чем меньше остается среды, тем относительно выше становится ее потенциал. Через некоторое время наступит равновесие, потенциалы бактерии и среды выравняются, и процесс размножения (работа организации) прекратится. После этого, очевидно дефицит среды (питательных веществ) приведет к тому, что потенциал среды станет больше, чем потенциал бактерий, и пойдет обратный процесс умирания бактерий и увеличения массы среды, т. е. будет производиться работа дезорганизации, которую совершает уже среда над системой. Так произойдет для ограниченной, закрытой системы. Если же добавлять в систему ингредиенты среды и убирать продукты жизнедеятельности бактерий, то можно создать стационарные условия, при которых установятся равновесные значения параметров.

Таким образом, мы связали информационный заряд и потенциал бактерии с аналогичными параметрами среды и определили направление работы: когда происходит рост и размножение, то бактерия совершает работу организации против энтропийных сил среды, а когда идет умирание, наоборот, энтропийные силы среды производят работу над живой системой. Первый случай аналогичен расширению газа под поршнем, второй—сжатию.

Введение понятия информационного потенциала дает возможности сравнивать потенциалы разных систем и предсказывать знак производимой системой работы (совершает ли система работу против среды или, наоборот, среда производит работу над системой). Иными словами, если бы мы умели мерить информационные потенциалы живых систем, мы бы могли расположить их в ряд, аналогичный, например, ряду химических окислительно-восстановительных потенциалов веществ.

17. Рассматривая клон одной бактерии, состоящий из N генетически идентичных особей, мы количество информации одной бактерии должны умножить на N . Значит, количество информации клона будет в N раз больше. Количество информации, как и любой фактор экстенсивности, ведет себя аддитивно и зависит от массы или величины системы. А информационный потенциал каждой бактерии одинаков для всех бактерий клона и равен информационному потенциалу клона, т. е. информационный потенциал, как любой фактор интенсивности (температура, давление и пр.), не зависит от массы системы. Установив, таким образом, информационные взаимоотношения клона бактерий и среды в стационарных условиях, легко понять, что происходит, когда в клоне появляется мутант. Если информационный потенциал нового мутанта ниже, чем клона, мутант элиминируется, если выше, то новый мутант со временем постепенно заместит старую форму.

18. Теперь возьмем зиготу в соответствующей среде. Согласно предлагаемым представлениям, зигота обладает максимальным информационным потенциалом, но малым (по сравнению с многоклеточным организмом) количеством информации. Первое же деление (производство работы) удваивает количество информации и соответственно понижает потенциал. Следовательно, в процессе онтогенеза информационный потенциал непрерывно падает. Что же касается количества (объема) информации, то сначала оно растет (рост и развитие) потом наступает момент, когда потенциал организма падает до значения противопоставленного ему потенциала среды (остановка роста) и дальше, когда информационный потенциал организма становится меньше потенциала среды, начинают идти процессы инволюции и наступает смерть.

19. Как нам представляется, такая картина логична, последовательна и непротиворечива. Если сравнить зиготу с часами, которые после того, как их завели (вложили в пружину потенциальную энергию), работают до тех пор, пока не кончится их завод, то можно сказать, что в зиготу вложена потенциальная информация (информационный потенциал), которая разворачиваясь, как пружина часов, производит полезную работу против энтропийных сил среды, расходует при этом потенциал и в конце концов останавливается.

Принципиальная разница в том, что в пружину мы вкладываем, сгусток энергии, которая работает сама, а в зиготу вложен сгусток информации (программа) о том, как совершать полезную работу, извлекая энергию и вещества из среды. Конечно, не прав Шредингер, считая, что организм питается негэнтропией (Шредингер, 1947). Негэнтропия, как таковая, организму не нужна. Для онтогенеза зиготе от среды нужны в первую очередь вещество и энергия, а информация у нее своя. Следовательно, под качеством информации мы понимаем эффективность, потенциальную работоспособность программы, записанной в системе (бактерия, зигота), под количеством информации—число копий данной программы, а под работой информации—реализацию программы, и в том числе производство копий этой программы.

20. Следует особо остановиться на понятии информационного потенциала, чтобы не создалось впечатление, что это новое, еще одно название для «энтелехии» или «жизненной силы», а предлагаемый подход новый вариант витализма. Вернемся опять к аналогии с газом в цилиндре под поршнем. Что создает в этом случае потенциал газа (давление)? Давление проявляется как суммарный результат кинетической энергии молекул газа. А кинетическая энергия (тепловое движение молекул)—это одна из главных внутренних программ молекул газа, его неотъемлемое свойство (атрибут), обуславливающая видимое стремление газа к объемной экспансии.

Таким же фундаментальным свойством живой системы является дискретное

самовоспроизведение. Появившись, видимо, сначала в форме простой молекулярной программы «конвариантной редупликации» (когда все дочерние копии строго идентичны материнской молекуле)—программы, необходимой, но недостаточной для эволюции, в дальнейшем она превратилась в полноценную программу живых систем, которую можно назвать «поливариантной редупликацией» (когда наряду с точными копиями создаются также и копии, несколько отличающиеся от исходной молекулы)—программу, необходимую и достаточную, положившую начало эволюции жизни. Простейшая экзогенная система, обладающая такой программой, уже могла получать информацию от среды и эволюционировать в нужном направлении, так как у нее появляется аналогичная свойству газа к объемной экспансии способность к такой же экспансии в многомерном пространстве реализации.

21. Применительно к живым системам следует выделить два компонента информационного потенциала, обуславливающих «движение» живой системы по двум главным направлениям: по оси времени (смена поколений)—генетическая ось, и по оси обобщенного фактора среды—экологическая ось (Геодакян, 1972).

Программа «конвариантной редупликации» является той составляющей информационного потенциала, которая обеспечивает «движение» по генетической оси. Программа «поливариантной редупликации» реализует также и вторую составляющую информационного потенциала, которая обеспечивает «движение» по экологической оси.

В процессе эволюции простейшая программа «поливариантной редупликации» молекул претерпевает дальнейшее развитие и усовершенствование. Появляются в принципе такие же программы для клеток, организмов и надорганизменных систем (улей, муравейник). Появляется фенотип и онтогенез. Появляются новые программы, обеспечивающие «поливариантность» самовоспроизведения систем (обогащающих комбинаторику)—кроссинговер, половой процесс (скрещивание особи), расселение (скрещивание популяции) и др.

Если экстраполировать «назад», то неизбежно приходим к такой живой системе, у которой между фенотипом и генотипом нет никакой разницы. Это и будет начало жизни.

Следовательно, богатство фенотипа (его развитость, удаленность от генотипа) представляет экологическую составляющую информационного потенциала. Именно появление развитого фенотипа у эволюционно прогрессивных форм позволило им свести к минимуму генетическую составляющую. Если сравнить численность потомства, частоту смены поколений и фенотипы в приведенном ряду (бактерия—лягушка—человек), то можно видеть, что именно богатство фенотипа позволяет уменьшить численность потомства и частоту смены поколений.

23. Возвращаясь теперь к клону бактерий, и посмотрим, что происходит с ним в изменяющихся условиях среды. Появление и накопление мутаций (новых программ) превращает клон (чистую линию) бактерии в полиморфную популяцию с набором множества несколько отличающихся друг от друга программ. Очевидно, что во взаимоотношениях элементов, имеющих одинаковые программы, господствуют конкурентные взаимоотношения; поэтому собственно увеличение числа копий понижает информационный потенциал программы.

И чем больше отличаются друг от друга программы элементов, тем меньше они снижают потенциал друг друга и тем больше вероятность возникновения между ними коалиционных взаимоотношений, основанных на дополнении их программ.

Становятся понятными эволюционные процессы дифференциации систем, состоящих из однотипных элементов, в системы, состоящие из дополняющих друг друга подсистем, элементов, с последующим (или одновременным) появлением интеграции между ними.

При объединении элементов в систему на их программы налагаются какие-то запреты, часть программ элементов утрачиваются и появляются взамен новые программы системы в целом. Здесь все аналогично процессу образования молекул из атомов. Когда из двух свободных атомов, обладающих в сумме 6 поступательными степенями свободы, образуется двухатомная молекула с 5 степенями свободы (3 поступательных и 2 вращательных), то утраченную степень свободы

можно рассматривать как плату за новую программу (вращательные степени свободы), которой не было у свободных атомов. Точно так же при объединении свободных клеток в организм на многие программы клеток накладываются запреты; одновременно появляются новые программы организма в целом, которых не было у отдельных клеток. Следовательно, по мере усиления взаимодействия между элементами все меньше и меньше остается действующих программ элементов, и все больше и больше появляется программ системы в целом.

24. Эволюция связей между элементами в сторону их усиления постепенно превращает систему популяционного, экзогенного типа в систему организменного, эндогенного типа. Последние, в свою очередь, выступая элементами нового уровня организации, образуют популяционную систему, которая снова эволюционирует в сторону организменной системы более высокого уровня организации, и т. д. Таким образом, были пройдены участки эволюции от популяции самовоспроизводящихся мономеров до полимера, от популяции полимеров до клетки, от популяции клеток до многоклеточного организма и, наконец, от популяции многоклеточных организмов до «многоорганизменного» сообщества (улей, муравейник). На всех уровнях (этажах) организации происходили одни и те же процессы эволюционного усиления взаимодействия между элементами, независимо от того, выступают ли в роли элементов молекулы, клетки или организмы. Во всех случаях усиление связи приводило к утрате программ элементов и появлению новой организации.

25. Подведем итог. Живые системы в термодинамическом смысле являются открытыми рабочими системами. Рабочим субстратом живых систем можно считать информацию. Тогда по аналогии с другими видами работы (механическая, электрическая, тепловая, химическая и т. д.) необходимо ввести в рассмотрение и четко различать понятия, сопряженные с этим субстратом: информационный заряд (количество, или объем информации), информационный потенциал (качество или работоспособность программы) и информационную работу (работу организации). Следует различать понятия упорядоченности и организации. Организация—это особый вид упорядоченности, направленной к достижению цели системы. Энтропия, являясь мерой упорядоченности (точнее, разупорядоченности), отличается от информации, которая является мерой организации. Отношение информации к энтропии аналогично отношению других «ценных» зарядов (механический, электрический, химический и др.) к энтропии. Передача любого из них сопровождается повышением энтропии системы.

Рассматривая онтогенез в таком плане/можно сказать, что зигота обладает максимумом информационного потенциала и минимумом (по сравнению с организмом) количества информации. В процессе реализации генетической информации с каждым делением зиготы ее информационный потенциал падает, а количество информации растет. Следовательно, взрослый организм, как результат информационной работы, обладает минимумом информационного потенциала и максимумом объема информации.

Рассматривая филогенез в таком плане на всех уровнях организации, можно увидеть одну и ту же картину эволюции систем экзогенного типа в эндогенные в результате усиления связи между элементами и замены программ элементов программами целой системы. Утраченные программы (степени свободы) элементов выступают как необходимая плата за новую организацию. Такое понимание позволяет нарисовать общую картину эволюции систем на широком диапазоне уровней организации от молекулярных до социальных.

В отличие от онтогенеза, в процессе которого информационный потенциал падает, в процессе филогенеза информационный потенциал непрерывно растет, т. е. эволюция живых систем сопровождается неуклонным повышением эффективности их программ.

ЛИТЕРАТУРА

- Антер М.* 1970. Кибернетика и развитие. М., «Мир».
- Бриллюен Л.* 1960. Наука и теория информации, М., «Физматгиз».
- де Бур Я.* 1962. Введение в молекулярную физику и термодинамику, М., Изд-во иностр. лит.
- Гамбург К.* 3. 1972. Онтогенез, 3, № 5.
- Геодакян В. А.* 1970. В сб.: Системные исследования, М., «Наука», 49–62. —1971. Онтогенез, 2, №

- 6, 683—694.—1972. Проблемы кибернетики, вып. 25, М., «Наука», 81—91.
- Малиновский А. А.* 1968. В сб.: Организация и управление, М., «Наука».
- Медников Б. М.* 1971. Природа, № 7, 15—23.
- Равен Х.* 1964. Оогенез, М., «Мир».
- Сэтлоу Р., Поллард Э.* 1964. Молекулярная биофизика. М., «Мир».
- Уоддингтон Ч.* 1970. В сб.: На пути к теоретической биологии. М., «Мир».
- Шамбадаль П.* 1967. Развитие и приложения понятия энтропии. М., «Наука».
- Шмальгаузен И. Я.* 1968. В сб.: Кибернетика в монографиях, т. 4, Новосибирск, «Наука».
- Шредингер Э.* 1947. Что такое жизнь с точки зрения физики? М. Изд-во иностр. лит.
- Харкевич А. А.* 1965. Проблемы кибернетики, вып. 13, М., «Физматгиз».
- Christian J. J.* 1961. Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A., 47, No. 4, 428—449.
- Dancoff S. M., Quastler H.* 1953. In Information Theory in Biology, University of Illinois Press, Urbana.
- Elsasser W. M.* 1958. The physical foundation of biology, Pergamon Press, London.

Статья поступила в редакцию 12.II.1974

INFORMATION CONCEPT AND LIVING SYSTEMS

V. A. GEODAKYAN

Institute of Developmental Biology, USSR Academy of Sciences, Moscow

Summary

Regarding the living systems as the open working systems, where information is the working substratum, it is suggested to introduce for examination and strictly discriminate three concepts associated with this substratum: the informational charge (the amount or volume of information), the informational potential (the quality or volume of information) and the informational work (the work of the organization). The concept of order estimated by entropy should be discriminated from the concept of organization estimated by information. The concepts of organization and information are connected with certain tasks of the system are not like to those of the order and the entropy. The relationships between information and entropy are similar to those between the other «valuable» charges (mechanical, electric, chemical and so on) and entropy. The informational potential decreases in the course of ontogenesis whereas it increases in that of phylogenesis.