

ответственно в этой области происходят беспорядочный дрейф замещений, быстрая эволюция, основанная на нейтральных мутациях или мутациях, слабо уменьшающих адаптацию (нейтралистская теория Кимуры, с. 558). Информационные представления несомненно окажутся полезными при дальнейшем развитии теории эволюции.

Возникновение белка на заре жизни означает создание новой информации. Как это следует из нейтральной теории, структура белка в целом исходно есть запоминание случайного выбора. При последующем «редактировании» происходила подлинная эволюция активной части белка. Надо подчеркнуть, что во многих случаях важная роль в «редактировании» принадлежала ионам металлов, прежде всего цинка, железа, меди и молибдена (ср. § 6.9).

Таким образом, структура любого белка является в некотором смысле реликтовой — она несет память о своем случайном происхождении.

В ходе эволюции многократно создавались новые белки. Как показывают структурные исследования, во многих случаях новый белок содержит структурные элементы — α -спирали, β -ленты и т. д. — своих предшественников. Именно здесь применима гипотеза «конструктор», предложенная Чернавским. Белки и, тем более, геномы строятся из уже выработанных ранее структурных элементов, образующих новые комбинации.

Изложенные здесь представления требуют, конечно, развития и уточнения. В частности, нейтральная теория пока что не рассматривает конкретную природу мутационных замещений, ограничиваясь лишь аминокислотным составом.

Нейтрально замещаемые остатки имеют, очевидно, относительно малую ценность. В дальнейшей эволюции они могут оказаться адаптивными, ценность их повысится. Возникновение новой ценной информации возможно лишь при наличии «пула» информации, обладающей низкой ценностью.

§ 17.9. Сложность и эволюция

Рассмотрев некоторые информационные аспекты биологического развития, обратимся теперь к понятию сложности, тесно связанному с теорией информации. Мы привычно говорим о возрастании сложности биологических систем в ходе эволюции. Как бы ни определять сложность, очевидно, что многоклеточный организм сложнее одноклеточного, что человек сложнее синезеленой водоросли. Однако наука требует строгих определений.

Обычно, говоря о сложности, мы имеем в виду число компонентов, образующих систему. Такое определение фигурирует, например, в классическом труде фон Неймана, посвященном теории самовоспроизводящихся автоматов. При этом фон Нейман указывал, что при высокой сложности объекта его описание может быть сложнее, чем он сам. В сложных системах формальной

логики на порядок труднее рассказать, что объект может сделать, чем изготовить сам объект. Системы высокой сложности обладают в принципе способностью создавать нечто более сложное, чем они сами.

Строгое определение сложности, позволяющее выразить это понятие количественно, дано в работах Колмогорова, Чаитина, Мартина-Лёфа. Сложный объект может быть закодирован некоторым сообщением, скажем, последовательностью нулей и единиц. Сложность определяется как минимальное число таких двоичных знаков, содержащих всю информацию об объекте, достаточную для его воспроизведения (декодирования). Другими словами, сложность есть выраженная в битах длина самой экономной программы, порождающей последовательность двоичных знаков, описывающую объект.

Рассмотрим некоторые примеры. Допустим, что имеются два сообщения

0101010101010101

0100100011011010

Какое из них сложнее? Конечно, второе. Программа, генерирующая первое сообщение, гласит $(01)^8$ или «напиши 01 восемь раз». Второе сообщение такой сокращенной программы не имеет, программа гласит «напиши 0100100011011010». Программа имеет ту же длину, что и само сообщение.

Другой пример. Сообщается число 3,1416 и т. д. Экономная программа есть просто буква л, выражающая отношение длины окружности к ее диаметру.

Примечательно, что определяемая таким образом сложность эквивалентна случайности — случайная последовательность элементов, скажем, двоичных единиц, характеризуется сложностью, приближенно совпадающей с выраженной в битах длиной этой последовательности. Любая минимальная программа необходимым образом случайна, лишена регулярности. Рассмотрим программу П, минимальную для генерации ряда двоичных единиц, сообщения С. Если предположить, что П не случайна, то по определению должна существовать более короткая программа П', генерирующая П. Можно произвести С посредством следующего алгоритма: «Вычисли П из П', затем вычисли С из П». Иными словами, в этом случае программа П не минимальна.

Однако представление о минимальной программе, вводимое при рассмотрении понятий сложности и случайности, встречается с принципиальными трудностями. Легко показать, что некоторая последовательность двоичных единиц не случайна — для этого достаточно найти программу, генерирующую эту последовательность, меньшую, чем сама последовательность. Но можно ли утверждать, что эта программа действительно минимальна? И можно ли, с другой стороны, доказать, что данная последовательность

случайна, сложна, т. е. что не существует более короткой программы для ее воспроизведения?

Такие утверждения невозможны вследствие теоремы Гёделя о неполноте. Современная математика рассматривает так называемые системы. Гильберт ввел в качестве такой системы язык, состоящий из конечного алфавита символов, определенной грамматики, с помощью которой формируются осмысленные утверждения, конечного числа аксиом и конечного числа правил для вывода теорем из аксиом и других теорем. В 1931 г. Гёдель показал, что любая формальная система такого рода не может включать все истинные теоремы и поэтому не полна. Доказательство Гёделя связано с парадоксом критянина Эпименида: «Все критяне лжецы». Или, в иной формулировке: «Это утверждение ложно» — утверждение истинное, только если оно ложно. Гёдель заменил понятие истинности понятием доказуемости: «Это утверждение не доказуемо». Таким образом, либо ложность доказуема, что запрещено, либо истинное утверждение не доказуемо, следовательно, формальная система не полна. В формальной системе нельзя доказать, что определенная последовательность двоичных единиц имеет сложность, более высокую, чем число бит в программе, используемой для нахождения этой последовательности. Следовательно, нахождение минимальной программы всегда до некоторой степени условно и понятие сложности имеет относительный характер.

В связи со сказанным отметим, что задача науки состоит в нахождении минимальной программы, генерирующей (объясняющей) исследуемую сложность совокупности фактов. В этом состоит смысл «бритвы Оккама» в науке — «сущности не следует умножать без необходимости». Так, закон тяготения Ньютона программирует и падение яблока, и движения планет. Но теорема Гёделя не позволяет доказать минимальность, т. е. максимальную экономичность, программы логически. Именно поэтому логические рассуждения недостаточны для развития науки. Научное познание требует интуиции. Как говорил Мандельштам, уравнение Шредингера не выведено, а угадано.

Вернемся к биологии. Сложность, определение которой мы приняли, действительно, как правило, возрастает в эволюции, в филогенезе, но имеются и обратные ситуации. Так, например, эволюционный переход к паразитическому образу жизни означает не усложнение, но упрощение.

Наиболее сложными объектами в природе являются индивидуальные живые организмы, а среди них — человек. Каждая личность уникальна и не может быть закодирована сокращенной программой. В этом смысле «заменимых нет». Очевидно, что сказанное относится и к творческим созданиям человека, например, к произведениям литературы и искусства. Нельзя дать минимальную программу «Войны и мира» — невозможен алгоритм для упрощения истинно художественного произведения без утраты его сущности.

Однако каждый организм — не только индивидуальная особь. Л. Н. Толстой не только великий писатель — он *Homo sapiens*. Иными словами, он представитель царства животных, типа хордовых, подтипа позвоночных, класса млекопитающих, отряда приматов, надсемейства человекоподобных приматов, семейства людей (*Hominidae*), рода *Homo*, вида *Homo sapiens*. В пределах каждого подразделения все его представители эквивалентны, описываются одной и той же минимальной программой. Здесь «незаменимых пет», и как представитель вида *Homo sapiens* любой человек, независимо от цвета кожи и иных наследственных признаков, эквивалентен любому другому.

Очевидно, что минимальная программа удлиняется, сложность возрастает в иерархической системе живой природы от царства к виду и далее, к индивидууму. Раскрытие этой реально существующей в природе иерархии, начатое Липпеем, — одно из величайших событий в истории науки. Как показывает современное эволюционное учение, само возникновение этой иерархии, завершающейся видообразованием, определится естественным отбором и законами генетики.

Мы видим, что понятие сложности относительно — оно зависит от уровня рассматривания, уровня рецепции. На уровне царства данный представитель *Homo sapiens* эквивалентен скорпиону, на уровне типа — ланцетнику, на уровне класса — двуутробке, на уровне отряда — лемуру, на уровне надсемейства — шимпанзе, на уровне семейства — австралопитеку, на уровне рода — человеку прямоходящему (*Homo erectus*). Сложность возрастает с ростом сходства рассматриваемых животных.

Для биолога мозг быка есть сложнейшая система, требующая сотен и тысяч бит для своего описания, но для мясника описание этого же мозга требует не более пяти бит, так как мозг — всего лишь одна из примерно тридцати различных частей тела быка, идущих в пищу.

Мы видим, что понятие сложности сходно с понятием ценности информации, рассмотренным в предыдущем параграфе. Мы определили ценность информации как незаменимость, избыточность на данном уровне рассматривания, уровне рецепции. Очевидно, что приведенное здесь определение сложности сходно с указанным определением ценности — то, что нельзя заменить более короткой программой, незаменимо, избыточно. Имеются, однако, и различия двух обсуждаемых понятий.

Во-первых, понятие сложности относится к объекту, к последовательности двоичных единиц в целом. Напротив, можно говорить о ценности — незаменимости, избыточности — отдельного элемента такой последовательности. Выше были даны условные определения ценностей кодонов и аминокислотных остатков.

Во-вторых, понятие сложности характеризует только структуру объекта. Напротив, ценность, т. е. незаменимость, одновременно отражает функциональность и объекта, и его отдельных элементов.

Таким образом, понятие ценности информации, введенное в предыдущем разделе, шире понятия сложности и, в сущности, включает сложность. Пользуясь понятием ценности, можно преодолеть трудность, связанную с тем, что в эволюции может происходить не усложнение, но упрощение. Такие факты противоречат возрастанию сложности при биологическом развитии. Спрашивается, что происходит в этих ситуациях с ценностью информации?

Рассмотрим как пример эволюционное упрощение червя *Bonellia viridis*. Самка этого животного имеет макроскопические размеры, это сложный многоклеточный организм, обладающий многообразными функциями. Самец, напротив, микроскопичен, живет в половых протоках самки и способен лишь к оплодотворению. Очевидно, что минимальная программа и сложность самца резко уменьшены по сравнению с самкой. Но что это значит?

Надо думать, геном самца не слишком сильно отличается от генома самки. Однако у самца значительная часть генов заблокирована, не функционирует. Укороченная программа характеризует не укорочение генома, но укорочение его функциональности вследствие указанной блокировки.

Уменьшение программы может происходить по двум причинам. Во-первых, может уменьшиться объем функционирующей информации, т. е. может укоротиться действующий, не заблокированный геном. Во-вторых, текст этого функционального сообщения может измениться, став более упорядоченным, т. е. функционирующая информация может стать частично избыточной. В этом случае происходит упрощение текста, он становится менее случайным. В первом случае ценность каждого элемента сообщения, каждой буквы остается высокой и может даже возрасти, во втором случае убывает и сложность, и ценность. Есть основания думать, что при эволюционном упрощении, определяемом специфической адаптацией паразита или самца червя *Bonellia*, реализуется первый случай — сложность убывает, а удельная ценность функциональной генетической информации не убывает и может даже возрастать. Высокая ценность означает высокую приспособленность (и приспособляемость), незаменимость и структуры, и функций.

Мы приходим к выводу, что в качестве одного из основных принципов теоретической биологии можно ввести не принцип возрастания сложности, но принцип возрастания ценности, т. е. незаменимости информации как в филогенетическом, так и в онтогенетическом биологическом развитии. Этот принцип не является независимым от естественного отбора и конвариантной редупликации (т. е. от генотипической памяти). Однако именно формулировка этого принципа подчеркивает необратимость, т. е. направленность биологической эволюции.

Дальнейшие исследования, которые должны объединить эволюционную биологию с биофизикой, требуют детального изучения геномов. Мы ведь не знаем пока, какая часть генома ответ-

ственно за видовые и какая — за индивидуальные признаки. Исходя из молекулярно-генетических данных, количество которых пока чрезвычайно мало, опираясь на уже развитые информационные подходы, будущая наука построит модельную физико-математическую теорию эволюции. Эта теория ответит в количественной форме на ряд вопросов, относящихся к материалам и к темпам эволюции. Мы находимся в начале построения теоретической биологии, фундамент которой был заложен Дарвином и Менделем.

§ 17.10. Онтогенез

В отличие от филогенеза, направленность индивидуального развития — онтогенеза — очевидна непосредственно. Онтогенез включает три основных процесса — *дифференцировку* клеток, *рост*, т. е. увеличение числа клеток и массы зародыша, и *морфогенез*, т. е. возникновение определенных органов и организма в целом. Все эти процессы развиваются в соответствии с генетической программой.

В основе клеточной дифференцировки лежит дифференцировка молекулярная. Во всех соматических клетках многоклеточного организма содержится один и тот же набор генов, тождественный геному исходной зиготы. Это положение доказано прямыми опытами. Гердон установил, что если пересадить ядро клетки эпителия кишечника головастика в икринку лягушки, ядро которой предварительно разрушено ультрафиолетовым облучением, то из такой икринки развивается нормальная особь. В специализированной клетке большинство генов репрессировано, в ней могут синтезироваться лишь определенные белки. При переносе специализированного генома в зиготу гены оказываются освобожденными от репрессии и происходит нормальное развитие. Химические исследования клеточной дифференциации уже привели к важным результатам. Уэсселс и Раттер выращивали культуру эмбриональной ткани — клетки поджелудочной железы крысы. Этот орган производит ферменты, участвующие в переваривании пищи, и гормоны, регулирующие метаболизм углеводов. Так называемые экзокринные клетки секретируют зимогены — предшественники пищеварительных ферментов, эндокринные клетки выделяют гормоны — глюкагон и инсулин. Исследовалась продукция всех этих белков на разных стадиях эмбрионального развития, и была установлена корреляция содержания белка с появлением определенных внутриклеточных структур. Продукция специализированных белков возрастает во времени не монотонно, но проходит через три регуляторных фазы (рис. 17.12). Установлено, что мезодермальные клетки из других органов промотируют дифференцировку клеток поджелудочной железы. Это, по-видимому, объясняется действием некоего фактора, возможно белковой природы.