

## 7. ЭВОЛЮЦИЯ ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА

### Основное содержание главы

К настоящему времени открыто более 250 планет вокруг других звезд нашей галактики, но нет ни одной из них, подобной Земле по сочетанию световых и тепловых условий. Солнечная система создается на определенном этапе эволюции Солнца, механизм ее развития связан с турбулентностью протопланетного диска. Возникновение жизни на Земле описывают в рамках существующих картин мира. Концепция самоорганизации живого вещества и его физико-химическая эволюция входят в научную картину мира.

### 7.1. Концепция множества обитаемых миров

В 1600 г. в Риме по решению церковного суда был заживо сожжен один из священнослужителей – Джордано Бруно.

Он был обвинен инквизицией в ереси, в которой не раскаялся и под пытками. Монах Д. Бруно был весьма образованным человеком и философом, его изданные труды назывались «О причине, начале и едином», «О героическом энтузиазме» и «О бесконечности, Вселенной и мирах». Именно последнее сочинение послужило поводом к обвинению со стороны святой церкви. Как теософ, Джордано Бруно проповедовал идею о едином начале всего сущего и о единой мировой душе. Как образованный человек, он принял (одним из первых в своем времени) концепцию гелиоцентризма Коперника. Д. Бруно пошел дальше осторожного в своих высказываниях Н. Коперника и «с энтузиазмом» совместил идею единства мира с идеей множества обитаемых и разумных миров, подобных нашей Солнечной системе.

В воззрениях Бруно Мир бесконечен, во Вселенной вокруг бесчисленных звезд обращаются планеты, космос оказывается населен огромным числом человеческих цивилизаций. Тем самым разрушается догмат о единственности и богоизбранности Земли и её населения. (Бруно спрашивал, в частности: «Во все ли миры приходил Искупитель?»). Множеству миров требовалось множество рождений Христа, Бога–Сына). Сомнение в вере отцов церкви признавалось ересью, от которой следовало избавить душу «брата Джордано Бруно», отправив тело его в очистительный огонь. Таковы были «правила игры» той эпохи. Бруно приписывают слова «Санта симплисита!» (Святая простота!), которые он произнес, увидев старушку с вязанкой хвороста, которую она

принесла и усердно подкладывала в разгоравшийся костер «очищения». Поистине, это был великой души и разума человек.

Как бы то ни было, идея бесчисленных миров, подобных нашему и разделенных гигантскими расстояниями в тысячи световых лет, не была сожжена или забыта. Правда, в произведениях современных фантастов, наряду с гуманоидными расами, чужие миры населяют и более странные, и более разнообразные существа (рис. 89, 90). В качестве примера достаточно вспомнить киносериал Джорджа Лукаса «Звездные войны», ставший классикой жанра, или более поздний сериал «Вавилон-5». Здесь чувствуется влияние современного естествознания (принципа минимального разнообразия элементов в сложной системе) в применении



*Рис. 89. Кадр из фильма «Звездные войны»*

к допустимости не только различных вероисповеданий, культурных традиций, цивилизаций, но и различных путей эволюции в пространственно разделенных мирах. У Р. Бредбери в «Марсианских хрониках» параллельные и одновременные миры совмещены в едином пространстве. У С. Лема разумным оказывается инопланетный Океан.

Можно утверждать, что концепция множественности разумных миров является элементом современной культуры, не оспариваемой более в явном виде даже христианской церковью. С философской точки зрения интуитивно кажется предпочтительнее, чтобы земное человечество не оказалось единственной населенной пылинкой в безбрежном пространстве косной материи. Однако логические и интуитивные построения и идеи должны соотноситься с фактами. Есть аргументы «за», есть альтернативные «против», но дело решают факты.

Используя теорию вероятностей, биолог Н. Рашевский показал, что в принципе на углерод-водородной основе возможно существование порядка 100 млн биологических видов. На Земле, за все время ее существования, было реализовано около 4 млн видов, так что еще 96 млн – в резерве. Выбор видов может происходить случайным образом, но невозможно представить себе ситуацию, когда на другой планете будут развиваться только те виды, которых не было и нет на Земле. Вероятностные оценки показали, что на двух независимых планетах возможно совпадение до 160 000 видов. Это значит, что если мы когда-либо встретим на другой планете биологическую форму жизни, то около

160 000 представителей биосферы для нас окажутся знакомыми. С этой точки зрения не следует преувеличивать роль принципа разнообразия биологических видов во вселенной и думать, что мы встретим в других мирах одних только чудовищ и химер.



Рис. 90. Кадр  
из фильма  
«Звездные войны»

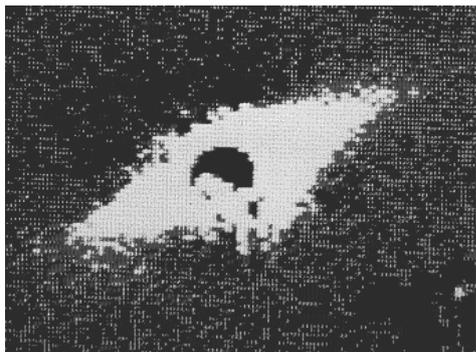
Где искать разумные миры? Если жизнь однажды возникла в Солнечной системе, то возможно её возникновение и в других планетарных системах. В 1983 г. на очередном астрофизическом конгрессе было принято следующее определение: «Планетарной системой следует считать звезду, у которой будет наблюдаться как минимум два маломассивных спутника». Здесь подчеркнута основная – два спутника центральной звезды, и они маломассивные, т. е. не являющиеся звездами.

Как искать? Планеты отражают свет центрального светила, но этого мало, чтобы их можно было бы увидеть в оптическом диапазоне. Температура фотосферы Солнца примерно 6000 К и максимум светимости в спектре приходится на длину волны 0,5 мкм. Если принять среднюю температуру поверхности планеты на порядок ниже, то максимум светимости сдвинется в область 5 мкм, а это диапазон инфракрасного излучения. Оно слишком сильно поглощается атмосферой Земли, в особенности парами воды. Поэтому большие надежды возлагались на спутниковые наблюдения в ИК-диапазоне. Одной из целей запуска космического аппарата IRAS в 1983 г. был поиск планетарных систем по избыточному ИК-излучению одиночных звезд.

Почему «не подходят» двойные звезды? Во-первых, потому что в таких системах движение маломассивного спутника должно происходить по траекториям в виде восьмерки, кольца которой охватывают звезды. Большинство двойных звезд имеют неравные массы компонент, поэтому траектория спутника должна проходить близко к более массивной звезде и удаляться на большое расстояние при движении вокруг меньшей звезды. В первом случае возможная планета будет перегреваться, во втором – переохладиться, что не способствует органической жизни. Во-вторых, только некоторые траектории третьего тела устойчивы в двойной системе, так что сама возможность образования планетарной системы вызывает сомнения с точки зрения небесной механики.

В нашей Галактике примерно половина звезд – двойные, что уменьшает шансы формирования планетарных систем. С помощью IRAS были получены данные об избыточном потоке ИК-излучения из области

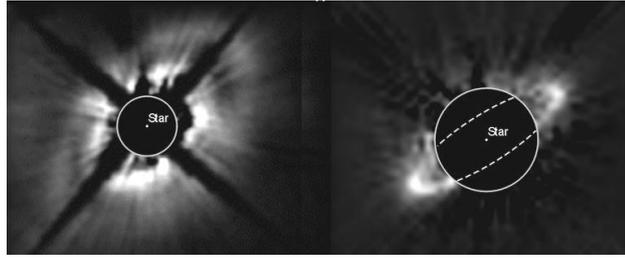
Веги (созвездие Лиры). Это была маленькая научная сенсация. Однако более поздние измерения показали, что Вега окружена кольцевой зоной (диском) холодного газа, размеры которой много больше диаметра Веги, сравнительно «молодой» звезды. По оценкам, её возраст в 15 раз меньше, чем у Солнца. В последующем наличие дисков, видимых по их ИК-излучению, было обнаружено у ряда других молодых звезд, в том числе у некоторых близких к нам. Среди них находится, например,  $\beta$  Живописца (54 св. г. от нашей Галактики).



*Рис. 91. Фотография диска  
возле Бета Живописца*

В 1984 г. наземные наблюдения в оптическом диапазоне с помощью специального телескопа подтвердили факт существования диска пылевых частиц около этой звезды (рис. 91). Радиус его составляет около 400 радиусов земной орбиты, и он удачно повернут под небольшим углом к лучу его наблюдения с Земли (подобно кольцу Сатурна). Отраженный от диска свет имеет такой же цвет, что и у центральной звезды, он поляризован, как это происходит при рассеянии света на частицах, размер которых много больше длины волны видимого света. Позднее удалось измерить доплеровское смещение в спектрах некоторых ионов из пылевого диска. Оно свидетельствовало о падении вещества диска на звезду со скоростью около 200 км/с. Запуск космического телескопа «Хаббл» позволил уточнить некоторые детали диска  $\beta$  Живописца, открыв временные вариации спектра центральной звезды по мере прохождения по ней разных участков пылевого диска. Отсюда был сделан вывод о том, что диск имеет клочковатую структуру.

В 1994–1995 гг. были опубликованы результаты совместной многолетней работы астрофизиков России, Казахстана и Таджикистана, из которых следовало, что целая группа звезд подкласса УХ Ориона являются молодыми предшественниками  $\beta$  Живописца и имеют протопланетные диски, повернутые под небольшим углом к лучу зрения. Из-за большой удаленности звезд их диски не наблюдаемы в телескопы, но они косвенно проявляются в периодическом ослаблении блеска звезд, синхронном с изменениями поляризации света и его цветности. В настоящее время считают, что около 60 % звезд с возрастом в интервале 3–5 млн лет окружены подобными дисками. В 1999 г. были получены снимки затмения ряда звезд планетами-гигантами, вращающихся вокруг них. На этих фотографиях (рис. 92) оказались видны пылевые диски, окружающие звезды.



*Рис. 92. Фотографии пылевых дисков возле звезд*

В середине 60-х гг. прошлого столетия большой общественный интерес вызвали статьи английского физика-теоретика Ф. Дайсона о возможности выхода гуманоидных или других типов разумных цивилизаций в околозвездный космос с образованием техногенной оболочки – «сферы Дайсона» вокруг материнской звезды. Более полно используя свет звезды и заменяя биосферу, искусственная оболочка должна переизлучать в окружающий космос энергию в виде ИК-излучения (накопление большой энергии приведет к перегреву «сферы Дайсона»). После получения данных со спутника IRAS были сделаны попытки выделить среди них «подозрительные» объекты со спектрами, похожими на гипотетический спектр сферы Дайсона. Однако во всех выделенных случаях более вероятным оказывается естественное происхождение источников излучения.

В настоящее время проектируются все более совершенные космические и наземные телескопы и поиски планетарных систем будут продолжены. С помощью компьютерного анализа малых колебаний положений ряда звезд к настоящему времени обнаружено существование более 300 планет-гигантов, типа Юпитера в Солнечной системе, на орбитах около центральных звезд. Несколько сравнительно маломассивных планет обнаружено около нейтронной звезды, облучающей эти планеты мощным рентгеновским излучением (что несовместимо с органической жизнью). Поэтому первоначальный энтузиазм астрофизиков заметно убавился, и на первый план выдвигается мнение о редкости планетарных систем типа нашей Солнечной системы.

## **7.2. Гипотезы образования Солнечной системы**

Факты свидетельствуют, что необходимым условием появления жизни является планетарная система с «подходящим» расположением одной из планет на околозвездной орбите. Как же возникла наша (может быть, уникальная) Солнечная система? Чтобы ответить на этот вопрос, рассмотрим сначала её строение. Границей Солнечной системы считают облако Оорта (шаровой слой кометоподобных тел), расположенное на расстоянии в один световой год от Солнца (рис. 93).

Внутри облака Оорта, гораздо ближе к центральной части, на расстоянии 6 св. ч от Солнца, находится пояс Койпера. Это кольцо малых планетарных тел размерами 100–200 км в поперечнике. Мини-планеты (планетозимали), по-видимому, являются остатками того «строительного материала», из которого образованы более крупные планеты.

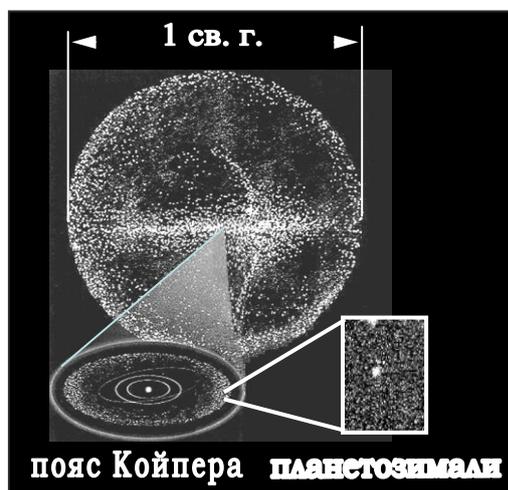


Рис. 93. Облако Оорта и пояс Койпера

Практически уже в поясе Койпера проходит орбита двойной планеты Плутон – Харон. Диаметр Плутона примерно в 2 раза превосходит диаметр Харона, и они находятся друг от друга на расстоянии всего в 20 000 км. По мере приближения к Солнцу следуют Нептун и Уран – гигантские планеты, состоящие из газа (водорода, гелия, метана) и имеющие очень узкие системы колец мелких спутников. Шестая от Солнца планета Сатурн известна своей удивительной системой пяти концентрических колец, лежащих в одной плоскости. Из-за быстрого вращения (оборот за 10 часов) он сплюснут у полюсов и раздут по экватору.

Еще ближе к центру расположена орбита Юпитера, самой большой из планет Солнечной системы. Так же как и Сатурн, Юпитер содержит в основном водород (85 %), гелий (14 %), аммиак, метан, водяные пары и ацетилен. Внутри планеты, под атмосферным газовым слоем, скрыт океан жидкого водорода глубиной около 17 000 км. Ниже давление возрастает настолько, что водород переходит в твердое состояние с металлическим типом проводимости. Электрический ток, протекающий в недрах планеты, создает сильное магнитное поле Юпитера.

Измерения с космических зондов (Пионер-10 и 11, Вояджер-1 и 2) показали, что Юпитер излучает больше энергии, чем получает её от Солнца. Внутренними источниками служит энергия продолжающегося гравитационного сжатия планеты, тепловая энергия, запасенная на раннем этапе образования Юпитера, и энергия радиоактивного распада тяжелых ядер. Юпитер имеет 16 спутников и похож на миниатюрную солнечную систему. В последние годы необычайно возрастает магнитное поле Юпитера и некоторые геофизики предрекают превращение Юпитера в маленькую звезду.

Однако, по современным теориям, масса Юпитера явно недостаточна для начала термоядерных реакций. Марс, Земля, Венера и Меркурий имеют сходное внутреннее строение.

Однако, по современным теориям, масса Юпитера явно недостаточна для начала термоядерных реакций. Марс, Земля, Венера и Меркурий имеют сходное внутреннее строение.

Разнообразие структур, которое мы наблюдаем в Солнечной системе, говорит о действии различных механизмов в процессе образования планет из протопланетного диска. Общим во всех современных моделях является положение о совместной и одновременной эволюции центральной звезды Солнца и его спутников-планет. Информация о химическом и изотопном составе, о гетерогенности вещества на ранних этапах формирования планетарной системы сохранилась в метеоритах, падающих на Землю (рис. 94).

С учетом её и законов термодинамики в 1967 г. была предложена конденсационная модель образования Солнечной системы. По модели Дж. У. Ларимера и Е. Андерса вещество протопланетного диска нагревалось до столь высокой температуры, что происходило испарение и образование атомарного газа. При высокой температуре происходила ускоренная диффузия и химический состав усреднялся по всему диску. Поэтому состав метеоритов, приходящих из различных мест Солнечной системы, принципиально не отличается от состава Земли. По мере понижения температуры в жидких каплях сначала должны выпасть в твердый осадок самые тугоплавкие элементы и их соединения, а легкоплавкие кристаллизуются в последнюю очередь. Какие последствия это будет иметь?

Сначала в агрегаты будут слипаться выпавшие первыми тугоплавкие соединения (рис. 94, 1), они будут обволакиваться легкоплавкими, так что образуются слоистые структуры с разными температурами плавления (рис. 94, 2 и 3). Аналогично этому, сначала образуется тугоплавкое ядро планеты, затем легкоплавкая мантия. Конденсационная модель дает лишь качественное соответствие с фактами о строении планет земной группы. Количественные оценки временных интервалов образования метеоритов по ней дают слишком большой разброс значений.



Рис. 94. Схема строения микропылинок

При образовании планетозималей важное значение имеют взаимные столкновения фрагментов протопланетного облака. Реальные удары являются частично упругими, часть энергии удара тратится на нагрев соударяющихся тел. Результатами столкновений будут: слипание (аккреция), дробление (фрагментация) и нагрев частиц.

Аккреция вызывает турбулентную вязкость диска, дробление приводит к переносу момента количества движения на периферию диска. Поэтому однородность диска нарушается. Оказывают влияние физические и химические свойства частиц. Например, пластичные и намагни-

ченые частицы железа будут слипаться, тогда как силикатные хрупкие частицы могут легко дробиться.

Считается, что планеты земной группы формировались из разнородных фрагментов. Сначала образовались ядра планет из железоникелевых частиц, затем они «обволакивались» оксидами и силикатами (рис. 95). Компоненты смеси формировались последовательно в различных температурных интервалах.



Рис. 95. Схема строения недр Земли: 1 – ядро; 2 – внешнее ядро; 3 – мантия

На ранних стадиях появлялись слои кальций-алюминиевых конденсатов, затем собирались силикаты с содержанием магния, железа и других металлов. Турбулентные потоки во внешнем вязкожидком ядре, хорошо проводящем ток, обусловили появление магнитного поля Земли. Верхняя мантия, самая легкоплавкая, была обогащена летучими компонентами, в том числе углеводородами и водой. Постепенно происходила дегазация мантии и из паров были созданы две важные оболочки Земли: атмосфера и гидросфера.

Темп эволюции центральной звезды выше, чем для протопланетного диска. Молодая звезда должна быстро вращаться, если даже начальное вращение газопылевого общего облака было незначительным. Это предписывает закон сохранения момента количества движения. Кроме того, звезда обладает сильным магнитным полем. Ультрафиолетовое и рентгеновское излучение звезды ионизирует частицы протопланетного диска. Взаимодействие заряженных частиц с магнитным полем хорошо известно: возникает сила Лоренца и частицы движутся по спиральным траекториям. Можно говорить, что магнитное поле удерживает попавшие в него заряженные частицы.

Так как источник магнитного поля быстро вращается, то сила Лоренца меняет направление своего действия, играя роль своеобразной «мешалки» по отношению к веществу диска. В конечном счете магнитное поле передает вращательный момент звезды диску: центральное тело замедляется, а диск раскручивается. Расчеты показывают, что от центральной звезды к диску может переходить более 90 % её момента количества движения. Его размеры при этом возрастают, возникшая турбулентность (вихри) приводит к сгущиванию вещества, при определенной скорости вихрей они разбиваются на более мелкие и таким обра-

зом могут формироваться вращающиеся тела различных размеров – планеты и их спутники.

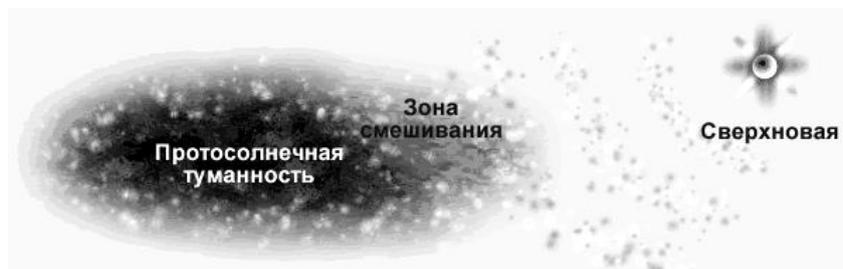
Кроме того, лучевое давление электромагнитных излучений звезды и сильный солнечный ветер уносят легкие газообразные частицы из ближней разогретой зоны на периферию диска. Поэтому возле Солнца нет газосодержащих планет, они сосредоточены «на окраине» Солнечной системы.

Имитационные расчеты на компьютерах показали, что сначала при эволюции диска появляются пояса или кольца вокруг звезды, а потом приливные силы и резонансные колебания собирают кольца в более компактные образования – планеты.

Рассмотренная модель не учитывает изотопные аномалии, постепенно обнаруженные при исследовании изотопного состава метеоритов. В частности, в одном из метеоритов (упавшем вблизи поселка Старое Песьяное) содержание изотопа неон-20 в 14 раз больше, чем изотопа неон-22. В противоположность этому найдены метеориты, содержащие почти весь неон в форме изотопа неон-22. В составе атмосферы Земли содержание неона-20 на порядок больше, чем всех других изотопов неона, тогда как в космогенном неоне содержание всех изотопов примерно одинаково. Изотопный состав кислорода в метеоритах также неодинаков. Выше отмечалось, что химический и изотопный состав метеоритов отражает гетерогенность раннего вещества на стадии формирования планет. Поэтому возникает предположение, что при образовании Солнечной системы произошло смешивание вещества по крайней мере двух резервуаров, отличавшихся по изотопному составу. Оно подтверждается аномалиями в изотопном составе целого ряда элементов – Ва, Ti, Са, Si, Mn. Для объяснения причин и процессов смешивания предложены две модели: взрыва соседней сверхновой и столкновения двух газопылевых облаков еще до формирования протосолнца.

По первой гипотезе в протосолнечную туманность было «впрыснуто» вещество из оболочки сверхновой (см. рис. 96). Недостатком модели является критичность расстояния до сверхновой: при близком взрыве протосолнечная туманность будет рассеяна, при далеком – взрыв не внесет «нужного» количества вещества. Да и статистика взрывов неблагоприятна для модели: 1 взрыв в «окрестностях» Солнца приходится на 100 млн лет.

Более «мягкий» вариант смешивания был предложен в 1983 г. Л.К. Левским. По его сценарию при пересечении протосолнечным облаком одного из рукавов Млечного Пути, где концентрация звезд и газопылевых молекулярных облаков гораздо выше, чем в пространстве между рукавами, произошло столкновение нормального и аномального по изотопному составу облаков.



*Рис. 96. Схема смешивания облаков*

В результате возникла турбулентность протосолнечного облака и начался процесс образования протозвезды и протопланетного диска.

Из основной массы нормального резервуара формируется Солнце, а из периферической области, «загрязненной» аномальным веществом, образуются астероиды, метеориты и частично – планеты. Поэтому в метеоритном веществе часто обнаруживается аномальный неон, а в Солнце содержится только нормальный.

Земля оказывается промежуточной по изотопному составу, в ней представлено вещество двух облаков. Длительность интервала образования солнечной планетарной системы по данной модели составляет примерно 200 млн лет, хотя начало было положено гораздо раньше, около 4,5 или 5 млрд лет назад столкновением облаков.

### **7.3. Концепции возникновения жизни**

Очевидно, что сама по себе «отдельно взятая» Солнечная система не могла бы образоваться. Во-первых, химический состав показывает наличие в ней тяжелых радиоактивных элементов (уран-235 например), которые были ранее наработаны в космических циклах эволюции звезд первых поколений нашей Галактики. Более тонкий анализ изотопного состава (изотопы одного элемента обладают одинаковыми химическими свойствами) свидетельствует, что формирование Солнечной системы произошло с участием по меньшей мере двух галактических источников вещества.

В Солнечной системе имеется целая группа сходных по строению недр планет почти на круговых орбитах на различных расстояниях от Солнца; это обеспечивает закономерное изменение условий освещенности и теплового режима планет. И вот на одной из них, наиболее «подходящей», появляется принципиально новое для Вселенной вещество – живое. По химическому и изотопному составу оно использует те же элементы, что и неживое, но отличается по способам соединения атомов в молекулы.

Каким образом, в ходе каких процессов возникла Жизнь? Ответ на эти вопросы давали три концепции, последовательно сменявшие друг друга в естествознании. Это концепции самозарождения, панспермии и физико-химической эволюции. Первая из них главенствовала в течение почти двух тысячелетий, вторая появилась в классическом естествознании Нового времени, третья становится основной в современном естествознании.

### **7.3.1. Концепция самозарождения жизни**

Согласно Библии, Корану или Талмуду живые существа созданы Всевышним, Аллахом или Яхве. В принципе, это равнозначно однократному самозарождению жизни сразу во всех её видах и формах. Античные мыслители допускали постоянное возникновение жизни, по крайней мере, на уровне растений и низших животных, просто из грязи, росы или гниющего органического материала.

Религиозный христианский философ Томас Аквинский утверждал, что самозарождение жизни производят ангелы с помощью лучей солнечного света. В одной из книг XVI в. «Магия природы» приводили магические свойства базилика: если его пожевать и положить на солнце, то он превратится в червя, а если растереть и положить под камень, то появится скорпион....

В эпоху Возрождения подобные представления были отвергнуты, во многом благодаря Ф. Реди (1626–1697), который экспериментально доказал, что во всех случаях насекомые, земноводные и птицы рождаются из оплодотворенных яиц. Однако после изобретения микроскопа и открытия ранее невидимых организмов-микробов (в 1675 г.) концепция самозарождения получила «второе дыхание». Утверждалось, что теперь ясно, на каком уровне происходит возникновение живой материи, что этот процесс происходит постоянно и повсеместно, и что самозарождение представляет собой ещё один способ, который природа использует для воспроизведения живых существ.

Только в 1862 г. Луи Пастер своими экспериментами «закрыл вопрос». Он наливал в небольшие колбы дрожжевой экстракт с сахаром, затем в огне высокотемпературной горелки вытягивал горлышко колбы так, чтобы оно превратилось в тонкую изогнутую «лебединую шею» (см. рис. 97). После кипячения раствора среда оставалась в течение неограниченного времени стерильной, несмотря на то что контакт с окружающей средой был (отверстие горлышка не было запаяно). Пастер объяснил результаты тем, что воздушный слой в тонком и длинном горлышке колбы играет роль амортизатора и препятствует быстрому дви-

жению воздуха, поэтому пыль с микробами оседает на стенки горлышка раньше, чем попадет в колбу.



Рис. 97. Колба Пастера

Стоило только укоротить горлышко до определенной длины – происходило «заражение» дрожжевого раствора и на питательном бульоне микробы интенсивно размножались. Так было показано, что в мире микробов жизнь тоже идет от родительской формы. Хотя результаты Пастера некоторое время оспаривались, концепция самозарождения была окончательно отвергнута.

Стоит отметить ту роль, которую играют концепции естествознания в других областях, поскольку речь зашла о микробах и инфицировании. Когда идея повсеместного самозарождения микроорганизмов была общепризнанной, попытки борьбы с ними казались бессмысленными и не предпринимались даже при операциях. Н. Хоровиц [11] приводит следующие потрясающие цифры. В ходе франко-прусской войны из 13 000 ампутаций, проведенных французскими хирургами, не менее 10 000 имели смертельный исход!

Только после решающих опытов Пастера появились методы уничтожения микробов или подавления их активности с помощью растворов фенола (карболовой кислоты), спирта и других средств дезинфекции.

### 7.3.2. Концепция панспермии

Крушение концепции постоянного самозарождения жизни привело к появлению альтернативной идеи о вечности живого вещества и о его переносе в космосе между звездными мирами. Лучше самих ученых трудно объяснить, как возникают их убеждения, поэтому процитируем У. Томсона (лорда Кельвина, 1824–1907) [11].

*Достаточно точными экспериментами, проведенными к настоящему времени, показано, что любой форме жизни всегда предшествует жизнь. Мертвая материя не способна превратиться в живую, не испытав предварительно воздействия живой материи. Мне это представляется такой же несомненной научной истиной, как закон всемирного тяготения. Я готов принять в качестве научного постулата, справедливого всегда и всюду, что жизнь порождается только жизнью и ничем, кроме жизни.*

По У. Томсону во Вселенной существуют многочисленные миры, несущие жизнь, которые временами разрушаются при столкновении с другими космическими телами, но рассеянные обломки несут с собой семена жизни. Идеи предшественников были развиты С. Аррениусом (1859–1927), шведским химиком, в его теории панспермии.

Он попытался конкретизировать возможные механизмы переноса жизни, предположив, что вирусы и бактериальные споры могут выноситься из атмосфер планет, где они существовали, под действием электростатических сил в космическое пространство. В космосе «зародыши» органической жизни могли бы перемещаться под действием светового давления или в потоках солнечного ветра звезд. Некоторой защитой от излучений могли бы быть встреченные на пути пылинки или метеориты.

Согласно теории панспермии все живые существа во Вселенной должны быть в своей основе «родственниками», хотя и отдаленными, в прямом смысле этого слова. Появление жизни на Земле, по концепции панспермии, является случайным событием. Сравнительно недавно в произведениях писателей-фантастов и в статьях некоторых ученых появился обновленный вариант рассматриваемой концепции – направленной панспермии. В ней предполагается, что жизнь попала на Землю не случайно, а целенаправленно доставлена с помощью средств некой высокоразвитой цивилизации из другого звездного мира.

Как можно видеть, концепция панспермии основана на трех предположениях. Во-первых, считается возможным существование множества миров, обладающих живым веществом. Фактически это миры Д. Бруно. Во-вторых, постулируется чрезвычайно высокая долговременная (на световые годы) устойчивость вирусов и (или) спор бактерий к воздействию факторов космического пространства: сверхвысокому (с технической точки зрения) вакууму, низким температурам (около 3 К), высокоэнергетичным космическим лучам, химически активному солнечному ветру. И в-третьих, утверждается, что жизнь – такой же фундаментальный атрибут мира, как материя, с которой она неразрывно связана.

Условия даже околоземного космического пространства весьма жестки, не все конструкционные материалы их выдерживают в течение нескольких лет. Прямые исследования показали, что лунный грунт совершенно стерилен. Попытки обнаружить вирусы или споры в микропылинках и микрометеоритах результата не дали, хотя сложные органические соединения на них обнаружены. Сомнительной представляется возможность длительного существования в открытом космосе каких-

либо организмов, даже таких пограничных (между живым и неживым), как вирусы.

Наконец, современное естествознание показывает историчность жизни на Земле, её возникновение только на определенном этапе развития материальных форм Вселенной. Тем не менее, концепция панспермии является значительным достижением, обратившим внимание ученых на возможное участие тех органических соединений, которые входят в состав молекулярных облаков, в процессах *самоорганизации* жизни на Земле.

### 7.3.3. Концепция физико-химической эволюции

В отличие от предыдущей концепции, основанной на логике качественного анализа ситуации и философских принципах, современная концепция исходит из результатов физико-химического моделирования процессов добиогенного синтеза все более сложных молекул. Она пытается подойти к тому моменту, когда накопление количественных изменений привело к появлению нового качества – самовоспроизводства. В какой-то мере эта концепция возвращает нас к идее самозарождения Жизни, описывая этот процесс как совокупное и синергетическое (взаимно усиливающее) действие нескольких факторов в течение длительного периода времени. Прежде всего следует оценить роль космической окружающей среды и первобытной Земли (рис. 98).



Рис. 98. Художественная иллюстрация условий на первобытной Земле

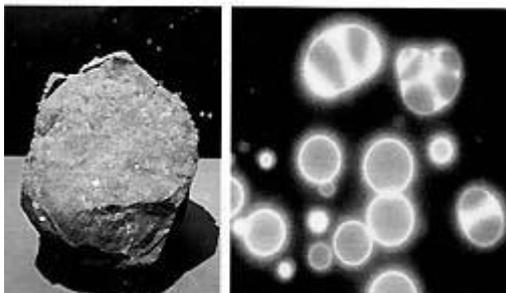
Выше мы уже отмечали многообразие соединений наиболее распространенных элементов – водорода, кислорода, углерода и азота в гигантских молекулярных облаках. К настоящему времени по линиям радиоизлучения в космическом пространстве обнаружено более 60 соединений.

Наибольшее распространение имеют водород и монооксид углерода (CO). Гораздо реже, но встречаются, цианистый водород (HCN), формальдегид (HCHO), ацетальдегид (CH<sub>3</sub>CHO),

аммиак и вода.

Те же и более сложные соединения встречаются на поверхности метеоритов и микрометеоритов. Например, тщательный анализ показал, что на поверхности и в составе углистого хондрита, выпавшего в 1969 г. в Австралии (Мерчисонский метеорит), имеются следы более

50 аминокислот, причем восемь из них входят в состав современных белков (глицин, аланин, валин, лейцин и другие). Здесь же обнаружено присутствие аденина, урацила и гуанина, являющихся азотистыми основаниями нуклеиновых кислот (рис. 99).



*Рис. 99. Мембранные везикулы с поверхности метеорита*

Многие среди 50 обнаруженных аминокислот не входят в состав живых организмов, ряд соединений встречается в виде двух оптических изомеров. Это доказывает, что все обнаруженные соединения не являются примесями или загрязнениями, попавшими на метеорит в земных условиях.

В работах Дж. М. Гринберга было экспериментально показано, что под действием ультрафиолетового излучения на поверхности микропылинок окись углерода, метан, аммиак, вода и кислород могут вступать в реакции между собой, создавая своеобразные, иногда многослойные оболочки.

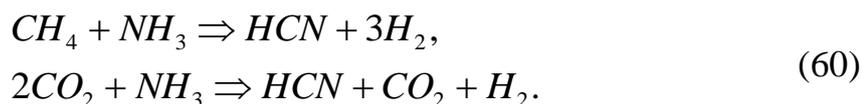
В экспериментах замороженная при 10 К смесь молекул  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  осаждалась на поверхность микропылинок при действии УФ-излучения и без него. При этом происходят процессы фотодиссоциации, фотовозбуждения и последующей радикал-радикальной рекомбинации. В результате общий состав многослойной оболочки приближается к составу аминокислот и даже простейших бактерий.

Считается, что аналогичные процессы могут происходить и в открытом космическом пространстве, затем микропылинки входят в атмосферу Земли без всякого разогрева и вносят органическое вещество в гидросферу, где оно продолжает цепь реакций уже в виде растворов. По оценкам Дж. М. Гринберга, за время пребывания Земли в типичном пылевом облаке (это от 100 тыс. до 1 млн лет) с космической пылью на её поверхность могло бы выпасть около  $10^9$  т органического вещества. Если учесть то обстоятельство, что Солнце движется в зоне коротации и её скорость не слишком отличается от скорости волн плотности в пылевых скоплениях, то эта оценка выглядит завышенной.

Тем не менее, этот источник органических веществ добиологического происхождения свою лепту вносит.

При извержении вулканов вместе с магмой извергается огромное количество газов: сероводорода, метана, аммиака, окислов азота и углерода. Жидкая среда более благоприятна для удержания рядом как простых реагентов, так и продуктов реакций – более сложных соединений. Поэтому Л.М. Мухин выдвинул гипотезу о возможности добиологиче-

ского синтеза в зоне подводных вулканов и гидротерм. К тому же повышенная температура и значительное гидростатическое давление способствуют высокой эффективности химических реакций. По усредненным оценкам Л.М. Мухина, гидротермальная система может дать за 1 млрд лет  $10^{12}$ – $10^{13}$  т органического вещества. Совместно извергаемые твердые минеральные частицы могут служить катализаторами и адсорбентами полученных продуктов. В частности, показана возможность следующих реакций:



Образование цианистого водорода очень важно, так как он играет центральную роль в синтезе оснований нуклеиновых кислот. Суммарно можно записать, например, такую реакцию:



Аминокислоты также образуются с участием цианистого водорода, либо путем взаимодействия в растворе аммиака, альдегида и цианида, либо путем превращения самого *HCN* в аминокислоты.

Газовая оболочка Земли не могла «остаться в стороне» от участия в процессах накопления первичного органического вещества. Выше мы отмечали, что молодая Земля образовалась из твердых материалов, которые содержали определенное количество поглощенных и адсорбированных газов. Под действием тепла, выделяющегося при гравитационном сжатии планеты и энергии распада радиоактивных изотопов, соединения разлагались с образованием газов различного химического состава.

При извержении вулканов газы вырывались из земных недр и образовывали первичную атмосферу Земли. Она была преимущественно восстановительной, как и условия в протопланетном диске, и содержала в большом количестве углекислый газ, метан и аммиак, а также сероводород, пары воды. Выделение тектонической энергии, сопровождаемое мощными извержениями вулканов, приводило к ураганным ветрам и сильной электризации атмосферы. Гигантские молнии инициировали целый ряд реакций газоплазменного синтеза. Попытки их воспроизведения в контролируемых лабораторных условиях были начаты в 1957 г., когда С. Миллер впервые получил некоторые биологически важные соединения с использованием электрических разрядов. Схема экспериментов была достаточно простой. Моделируя условия первичной

атмосферы, С. Миллер поместил в колбу немного воды и заполнил её смесью водорода, метана и аммиака (рис. 100).

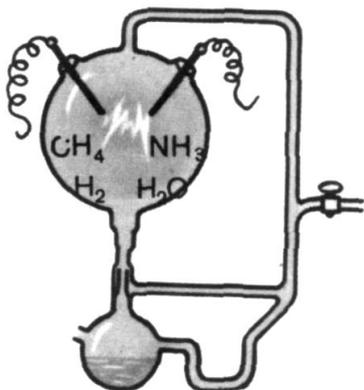


Рис. 100. Прибор  
С. Миллера

Затем в колбе создавались электрические разряды между электродами. Смесь подвергалась разрядам в течение недели, после чего химический анализ показал присутствие в воде небольших количеств аланина, глицина, аспарагиновой и глутаминовой кислот. Эти соединения входят в состав белков. На стенках колбы также образовывался налет, в составе которого были органические соединения. В дальнейшем состав газа изменялся (водород удалили, аммиак заменили азотом), что расширило список образующихся аминокислот до 12.

Поскольку в первичной атмосфере не было озона, эффективно поглощающего УФ-излучение Солнца, то оно пронизывало всю атмосферу до поверхности Земли. Ряд последующих экспериментов различные группы исследователей проводили, совмещая электрические разряды с УФ-освещением или используя только одну ультрафиолетовую радиацию. Всегда в восстановительных условиях получали положительный результат: происходил синтез органических соединений, входящих в состав белков и нуклеиновых кислот. Максимальный выход продуктов реакций получали при добавлении сероводорода ( $H_2S$ ), который хорошо поглощает более длинноволновое излучение Солнца.

В настоящее время установлено образование аминокислот при возникновении ударных волн в смесях газов, порождающих всплески высокой температуры и давления. Такие волны вполне могли возникать в атмосфере под действием громовых раскатов или падающих метеоритов.

Одни только метеориты, микропылинки, гидротермальные источники не могут привнести весь спектр биологически активных соединений, необходимых для создания сложной генетической системы живых организмов. Реакции в газовой фазе расширяют круг синтезируемых веществ. Сравнительно недавно было обнаружено, что четыре азотистых основания РНК (рибонуклеиновая кислота) образуются в последующих реакциях, в которые начинают вступать первичные продукты газоразрядного синтеза.

Представляется очевидным, что, в конечном счете, созданные различными путями или привнесенные из космоса «строительные»

материалы белков и нуклеиновых кислот смывались с поверхности Земли и из её атмосферы в океаны.



*Рис. 101. Последовательность усложнения структуры органических соединений*

В стерильных условиях (отсутствие микробов!) в течение миллионов лет происходит накопление необходимых элементов в «первичном бульоне» (рис. 101). При определенных условиях формальдегид конденсируется в водном растворе, образуя различные сахара. Одним из побочных продуктов этой реакции является рибоза – основной компонент РНК. Постепенно разрозненные молекулы будут собираться в молекулярные агрегаты, насчитывающие сотни тысяч и миллионы мономеров. Такие агрегаты получили название коацерватных капель, их особенностью является свойство «вытягивать» из окружающего их низкомолекулярного раствора некоторые вещества, что похоже на зачаток «обмена веществ». Академик А.И. Опарин (1894–1980) считал, что именно коацерватные капли послужили тем «микрососудами», в которых произошло формирование динамически устойчивых первичных микроорганизмов.

Таким образом, современная концепция не выясняет, какой из рассмотренных выше источников «на самом деле» является главным в зарождении жизни, а, наоборот, подчеркивает многообразие и различную физическую и химическую природу поставщиков биологически активных веществ, их совместное взаимно дополнительное действие. Хотя ещё не всё понятно в процессе перехода к синтезу самокопирующихся молекул и появления построенных на них примитивных организмов, основные положения концепции считаются экспериментально обоснованными.

Следует иметь в виду, что для построения простейшей генетической системы достаточно было коротких полимерных цепей РНК. Первым организмам не требовалось быть высокоэффективными, поскольку ещё не существовало «врагов» и проблемы добывания пищи в «первичном бульоне». Достаточно было приобрести свойство воспроизведения своих копий быстрее, чем происходила химическая или физическая деструкция клетки.

Несколько лет назад удалось «в пробирке» воспроизвести простой вариант копирования и отбора на молекулярном уровне. В раствор

хлороформа вводили молекулы эфира и амина, которые образовывали более сложные по составу и конфигурации молекулы амида.

Реакция оказалась автокаталитической: одна образовавшаяся молекула амида становилась центром сборки другой, этому способствует своеобразная форма молекулы амида. При повышении температуры раствора комплементарные пары молекул амида расходились и становились самостоятельными. При циклическом охлаждении-нагреве молекулы амида «размножались» (рис. 102).

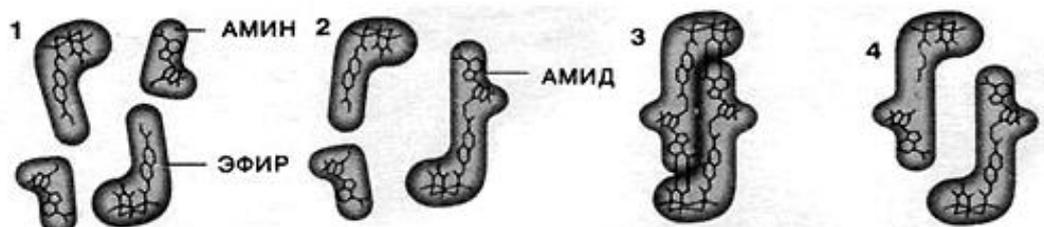


Рис. 102. Последовательность копирования молекул амида

Затем опыты были усложнены тремя различными аминами и эфиром. Если на смесь воздействовать УФ-лучами, то один из получающихся амидов видоизменяется (мутирует) и накапливается в растворе с большей скоростью, чем другие.

Поэтому мы можем подчеркнуть ещё раз: Жизнь возникает как планетарное явление только при участии космической среды, недр Земли, её атмосферы и океанов; появляется и реализуется самоорганизация жизни на молекулярном уровне, а затем и на уровне клетки. Простейшими организмами были одноклеточные и не имеющие ядра прокариоты, вступление в действие естественного отбора и мутаций привело к появлению эукариот и многоклеточных организмов, у которых генетическая информация находится в хромосомах.

#### **7.4. Кодирование и воспроизводство биологической информации**

Дать строгое и всеобъемлющее определение, что такое Жизнь, весьма трудно. Можно констатировать, что для живых организмов характерна устойчивая структура, наличие обмена веществ с окружающей средой, поддержание гомеостаза (постоянства внутренней среды), репликация (размножение), изменчивость и отбор. По Ф. Энгельсу, жизнь – это способ существования белковых тел. Что верно с той точки зрения, что известные живые существа имеют в своем химическом составе больше белков, чем жирных кислот или углеводов. Формулировка «способ существования» слишком философская, т. е. предельно общая. С точки зрения информатики, в более конкретном функциональном

определении, жизнь можно назвать структурно устойчивым состоянием белковых систем, использующих для поддержания гомеостаза не только обмен веществом и энергией, но и информацией, кодируемой формой и составом отдельных молекул. Последнее, по-видимому, принципиально отличает живое вещество от неживого. Нашей задачей будет описание тех способов и механизмов кодирования информации и её прочтения на молекулярном уровне, которые были отобраны в процессе эволюции жизни. Но прежде необходимо краткое описание основного «химического материала» жизни: белков и нуклеиновых кислот.

#### 7.4.1. Состав и структура белков

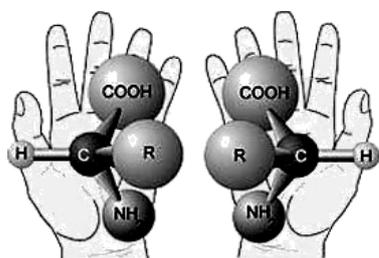


Рис. 103. Две формы глицина

Структурными единицами белков являются аминокислоты, их известно более 200. Только 60 из них входят в состав организма человека, и всего 20 аминокислот формируют все разнообразие его белков. В природе существует две зеркально симметричные разновидности аминокислот, только одна из них (левая на рис. 103) входит в состав живых организмов, это *L* изомеры.

Общую химическую формулу аминокислот можно представить в следующем виде: центральный атом углерода, аминная группа, карбоксильная группа и радикал (рис. 104). Зарядовое состояние аминной и карбоксильной групп изменяется под действием окружающей среды: в неполярной среде аминная группа имеет состав  $\text{NH}_2$ , а карбоксильная  $\text{COOH}$ .

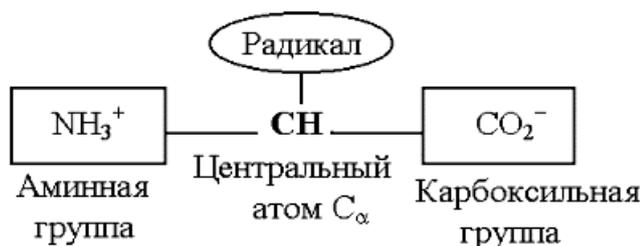
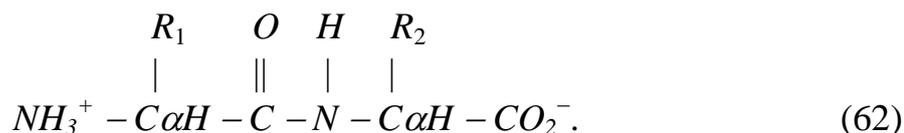


Рис. 104. Схема строения молекул аминокислот

Боковой радикал, присоединяющийся к центральному атому углерода, *определяет специфику данной аминокислоты*. Он может иметь совсем простой состав (как в глицине, рис. 103), цепочки углеводородных групп (как в лейцине) или содержать пяти-шестичленные циклы (как в триптофане).

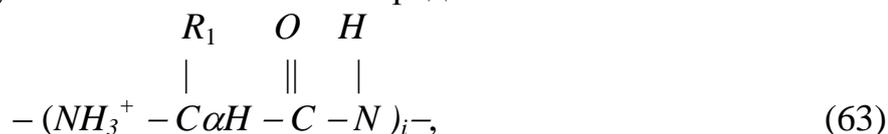
Химики определяют процесс образования белков как реакцию полимеризации, т. е. как реакцию последовательного присоединения отдельных аминокислот в общую цепь. Первый шаг на этом пути – образование димера (цепи из двух звеньев). При этом выделится молекула воды  $H_2O$  и будет образована пептидная связь ( $CO-NH$ ). Будем обозначать боковые радикалы аминокислот буквами  $R$  с индексами ( $R_1$ , или  $R_2$ , или  $R_i$ ), а их центральные атомы  $C_\alpha$ .

Тогда можно записать структурную формулу димера в виде



В ней атомы следуют в таком порядке: центральный углерод аминокислоты и пептидная связь. Это чередование сохраняется при дальнейшей полимеризации.

Общая формула белков может быть представлена записью:



где индекс  $i$  может быть одним из интервала (1–20), в зависимости от конкретной аминокислоты.

Запись в виде (63) представляет первичную структуру белка. При больших значениях  $i$ , когда полимерная цепь становится весьма и весьма длинной, организуется вторичная структура в виде спиралей. Это повышает их устойчивость к случайным деформациям и препятствует спутыванию полимерных «нитек» в беспорядочный клубок.

Возможность изменения формы молекул связана с различной «эластичностью» химических связей в них. Отдельные части полимерной цепи могут легко поворачиваться вокруг осей  $\sigma$ -связей  $C_\alpha-C$  или  $C_\alpha-N$ , вращение же вокруг пептидной связи затруднено, поскольку она носит смешанный характер  $\sigma$ - и  $\pi$ -связей (пептидная связь частично двойная). Поэтому многие белки и ферменты имеют спиральную конфигурацию, которая теряется при денатурации в растворе спирта или при нагревании до относительно высокой температуры (всем знаком пример денатурации яичного белка при нагревании).

Если взаимодействуют две близко расположенные полимерные цепи, то возможно образование «гармошки» – складчатой конфигурации, в которой две нити идут параллельными уступами как лестница. При структурном анализе белков описанные участки называют  $\alpha$ -спиралями и  $\beta$ -складками (см. рис. 105).

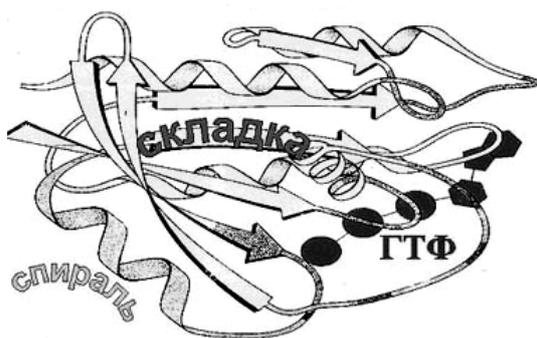


Рис. 105. Условное изображение вторичной структуры белка

В природе ничего не происходит «просто так». Если есть возможность вращений отдельных частей молекулы-нити, то они будут происходить случайным образом под действием тепловых флуктуаций. Но стабильной конфигурации не получится до тех пор, пока не будет достигнут минимум потенциальной энергии. В чем-то конфигурация спирали должна быть энергетически выгоднее, чем просто линейная или зигзагообразная. По данным рентгеноструктурного анализа нашлось простое объяснение типичности спиралей в белках: минимум общей энергии достигается при таких поворотах, которые позволяют установить дополнительные водородные связи между аминной и карбоксильной группами.

Как правило, в  $\alpha$ -спирали каждая NH-группа одной пептидной связи образует «сшивку» с четвертой от неё CO-группой другой пептидной связи, что задает размер витка спирали. Образование химической связи, даже такой слабой, как водородная, сопровождается выделением энергии, так что полная энергия системы при этом понижается.

Физические и химические свойства органических полимеров определяются не только элементным составом, но и конформацией – пространственным расположением атомов. Мало знать только химический состав, он определит лишь первичную структуру белка или фермента. Для понимания «деятельности» белков и их свойств необходимы данные о вторичной, третичной и надмолекулярной структуре. Напри-



Рис. 106. Схема строения волоса человека

мер, волосы человека состоят из  $\alpha$ -кератина. Полипептидная цепь этого белка построена в основном из глицина, лейцина, цистеина и пяти других аминокислот. Первичной структурой цепи здесь является правая  $\alpha$ -спираль (рис. 106). Три таких правых спирали скручиваются затем в общую левую спираль, где удерживаются водородными связями и дисульфидными мостиками. Далее 9 таких левых спиралей образуют длинный цилиндр, по оси которого проходят 2 внутренние левые спирали, и так

образуется микрофибрилла. Это уровень домена. Сотни доменов входят в макрофибриллы (уровень глобул), сочетание многих макрофибрилл образует клетку, из последних образуется нить волоса. Отсюда понятна большая эластичность столь высокоспирализованного материала.

При нагрузке спирали разных масштабных уровней раскручиваются вплоть до разрыва более слабых водородных связей. После снятия напряжения первоначальная форма восстанавливается, поскольку более прочные связи дисульфидных мостиков не разрушаются и способствуют регенерации  $\alpha$ -спиралей.

Шелк (натуральный) является  $\beta$ -кератином. В его составе больше аланина и глицина, меньше аминокислот, содержащих серу. Поэтому здесь реализуется другая пространственная структура, в которой  $\beta$ -складки образуют более плоские «листовые» домены.

Шелк менее эластичен, чем волосы или шерсть, но он очень гибок, так как один «лист» (слой) сравнительно легко может скользить по другому.

В 1960 г. была установлена пространственная структура молекулы миоглобина – белка, выделенного из мышц кашалота (рис. 107). В её составе имеется 153 аминокислотных звена, они формируют общую спираль, которая причудливо изогнута в виде жгута, охватывающего гем железа. Затем была расшифрована структура гемоглобина.

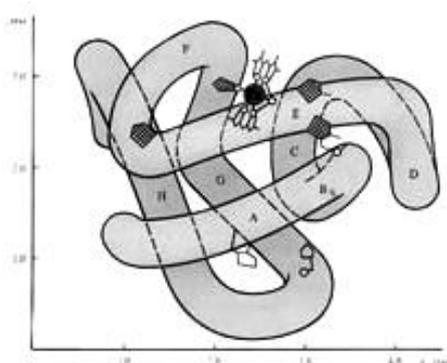


Рис. 107. Схема строения миоглобина

В её составе имеется 153 аминокислотных звена, они формируют общую спираль, которая причудливо изогнута в виде жгута, охватывающего гем железа. Затем была расшифрована структура гемоглобина.

Молекула гемоглобина более сложная, она состоит из 4 субъединиц, похожих на молекулу миоглобина. Как переносчик кислорода в организме человека, гемоглобин более эффективен, чем миоглобин. Молекулы гемоглобина выполняют транспортную роль, доставляя кислород в клетки мозга и другие клетки организма.

В мышцах они передают кислород миоглобину.

Среди других основных функций белков в организме человека можно указать:

- конструкторную (в составе скелета),
- двигательную (в составе мышц),
- регуляторную (в составе нейромедиаторов),
- каталитическую (в составе ферментов).

## 7.4.2. Нуклеиновые кислоты

В классическом естествознании ещё в конце XIX в. было установлено, что наследственность растений и животных определяется наличием определенного числа хромосом в ядрах клетки. Химический состав хромосом отвечает смеси дезоксирибонуклеиновых кислот (ДНК), с последними и стали отождествлять наследственный аппарат живого вещества. Судя по молекулярной массе, ДНК содержат от  $10^3$  до  $10^8$  отдельных звеньев-нуклеотидов в общей цепи. Меньшее число (от 80 до 200 000) нуклеотидов содержат цепи рибонуклеиновых кислот (РНК), с помощью которых происходит синтез белка в клетке.

Азотистых оснований в составе нуклеиновых кислот немного, всего пять. Термин пентоза является общим названием для рибозы и дезоксирибозы. Отличие между ними всего лишь в одной детали: если гидроксил ОН заменить на водород Н, то вместо рибозы получится дезоксирибоза. В зависимости от числа тетраэдров  $PO_4$  в остатке фосфорных кислот, нуклеотиды называются моно-, ди- или трифосфатами. Образно говоря,

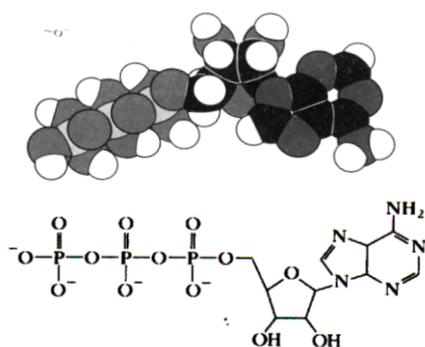


Рис. 108. Структура молекулы АТФ

пентоза является платформой, с одного бока которой присоединяется блок азотистого основания, а с другого – «хвост» остатка фосфорной кислоты. В качестве примеров приведем на рис. 108 структурную формулу одного из самых важных нуклеотидов – АТФ (аденозинтрифосфорной кислоты). При некоторой игре воображения в форме молекулы можно увидеть поднятую голову, тело и хвост «насекомого». Сходство будет ещё более заметным, если указывать только линии

химических связей и особенные группы атомов. Модель в виде вдавленных друг в друга шаров разного размера и цвета дает более точную пространственную конфигурацию.

Как отдельный нуклеотид, АТФ является поставщиком энергии для белков, переходя из одной модификации (трифосфат) в другую (дифосфат), рис. 109.

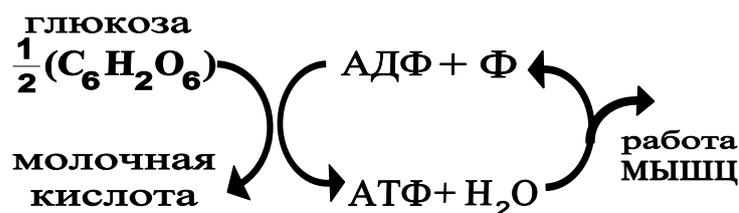
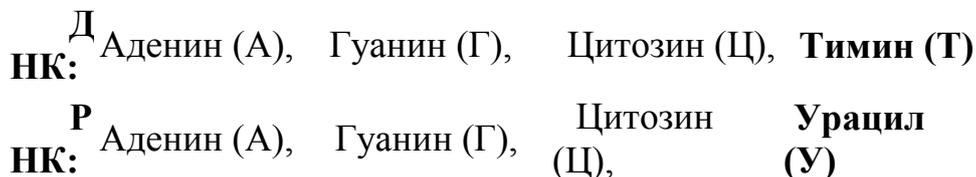


Рис. 109. Цикл передачи энергии от углевода белку

Если специфику аминокислот определяет боковой радикал, то индивидуальность нуклеотидов определяется азотистым основанием («головной» молекулы). Как отмечалось выше, их всего пять, по четыре они входят в состав ДНК и РНК.



Нуклеотиды являются оптически активными соединениями, это *D*-изомеры, т. е. они закручивают угол поляризации света вправо.

Принцип полимеризации нуклеотидов в цепи ДНК или РНК следующий: фосфатный «хвост» одного звена присоединяется к углу пентозы, соседнему с тем, где «отрастает» фосфатная цепь другого нуклеотида, и получается цепь платформ, каждая из которых несет свое азотистое основание. Этот процесс определяет формирование первичной структуры нуклеиновых кислот.

Вторичная структура стабилизируется водородными связями, как и в структуре белков. Но в данном случае между «подходящими» азотистыми основаниями сразу образуется по две или по три водородных связи, что, конечно, упрочняет вторичную структуру. Самая главная особенность таких соединений – это то, что каждый конкретный нуклеотид может образовать «зацепление» только с единственным из трех других в его группе. Если назвать один нуклеотид «замком», то его партнер будет «ключом», подходящим только к этому замку. Зацепления могут возникать как между азотистыми основаниями одной цепи, так и между основаниями соседних цепей (рис. 110).

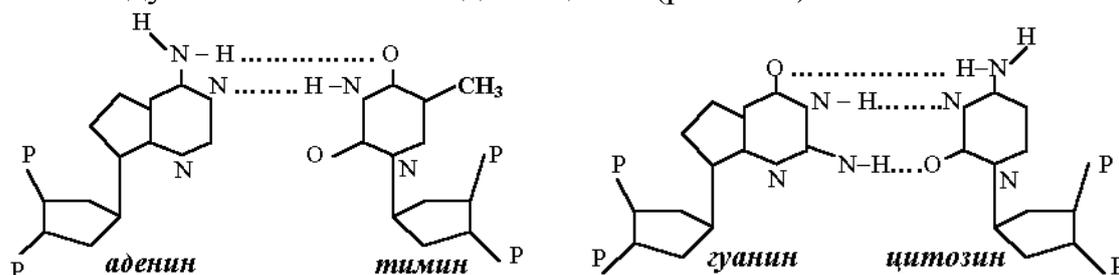


Рис. 110. Варианты соединения аденина с тимином и гуанина с цитозином

Говорят, что пары нуклеотидов отвечают принципу комплементарности, цитозин комплементарен гуанину, аденин – тимину и урацилу (последний отличается от тимина только отсутствием группы  $\text{CH}_3$ ).

Принцип комплементарности позволяет объяснить механизм «молекулярного узнавания». Водородные связи (с одной стороны, доноры, с

другой – акцепторы электрона) являются своеобразной системой поиска комплементарного участка, принадлежащего своей или другой цепи.

Вторичная структура РНК в самом простом случае может быть представлена в виде испорченной застежки-молнии. Там, где подряд располагаются соответствующие друг другу комплементарные звенья, «молния» застегнута, где нет соответствия – появляется петля. В общей цепи могут образоваться несколько петель различного размера. Например, транспортные РНК (тРНК) в большинстве случаев имеют форму клеверного листа, изогнутого наподобие австралийского бумеранга.

Вторичная структура ДНК более сложная. При химическом анализе этих кислот было установлено эмпирическое правило Чаргаффа: какой бы длины ни была нуклеотидная цепь, всегда количество оснований аденина равнялось количеству оснований тимина, а количество цитозина равнялось количеству гуанина. Причины этого установили Д. Уотстон и Ф. Крик, введя принцип комплементарности. В 1953 г. они экспериментально доказали, что ДНК представляет собой двойную спираль, составленную из полностью комплементарных цепей нуклеотидов. Начало одной цепи комплементарно окончанию другой.



Рис. 111. Модель структуры ДНК

Пояснить ситуацию можно схемой двух лент, закрученных вокруг общей для них оси (рис. 111). Шаг спирали  $b = 3,4$  нм, на одном обороте спирали имеется 10 комплементарных пар нуклеотидов, так что межцепные водородные «разъемы» располагаются на расстоянии  $a = 0,34$  нм.

Если поискать аналог спирали ДНК, то наиболее подходящим образом будет винтовая вертикальная лестница, ступеньками которой будут водородные связи, причем каждая последующая ступенька повернута относительно предыдущей на  $36^\circ$ . Как и для белков, нуклеиновые кислоты могут иметь третичную структуру.

Во многих случаях шнуры ДНК наматываются на белковые глобулы, образуя нуклеосомы (рис. 112). В чем «польза» дополнительной спирализации в шнуры и упорядоченные клубки?

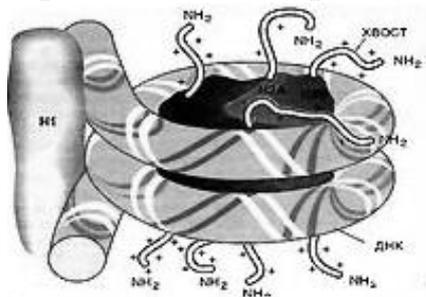


Рис. 112. Схема строения нуклеосомы

Польза в компактности, которая позволяет достичь очень высокой объемной плотности генетической информации. Для примера приведем несколько цифр.

В одной клетке человека, содержащей 46 хромосом, помещаются цепи ДНК длиной 2 м при величине самой клетки около 25 мкм и размере ядра клетки (где нахо-

дятся (хромосомы) примерно 5 мкм. Подсчитано, что если раскрутить все молекулы ДНК в организме человека в прямую ленту, то она была бы в 80 раз больше расстояния от Земли до Солнца!

Общая схема, показывающая последовательность структурных уровней нуклеиновых кислот от двойной цепи ДНК до хромосомы в клетке, приведена на рис. 113.

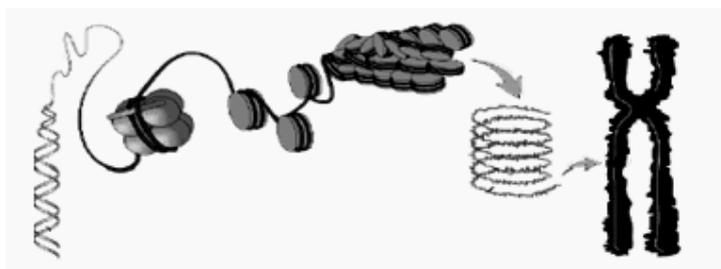


Рис. 113. Структурные уровни хромосомы

Отдельные нуклеосомы собираются в плотную упаковку, из которых формируется так называемый соленоид (катушка). Из соленоидов, как из структурных элементов, собирается хромосома. Набор хромосом определяет кариотип человека, его индивидуальный наследственный аппарат. Набор хромосом находится в ядре клетки и является информационной базой данных, – архивом, с которого снимаются копии РНК для производства в клетке белков и управляющих РНК. Сами цепи ДНК ядро клетки никогда не покидают.

### 7.5. Принцип кодирования аминокислотных последовательностей

Для развития организма и стабильности его клеток в первую очередь необходим непрерывный синтез белков, т. е. определенной последовательности аминокислот. Какой способ нашла природа для кодирования, т. е. для информационно значимой записи порядка следования

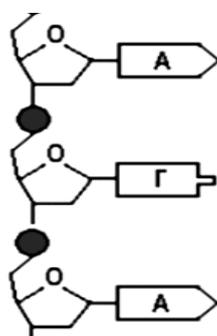


Рис. 114. Модель кодона

аминокислот в белках? Путем тонких биохимических экспериментов на молекулярном уровне за последние десятилетия удалось выяснить, что последовательность синтеза белков зафиксирована в цепях ДНК (в некоторых случаях и РНК) в виде кодонов. Кодоном является тройка последовательно расположенных азотистых оснований (рис. 114).

Каждый отдельный белок кодируется своим геном, т. е. определенной последовательностью

экзонов и интронов. Сколько аминокислот в данной белке, столько и кодонов в экзоне (это информационная компонента). Между собой экзоны разделены интронами – участками цепи ДНК, в которой нуклеотиды располагаются на первый взгляд беспорядочно. По современным представлениям, интроны выполняют служебную роль меток и участвуют в процессах «выбора» тех информационных участков генов (экзонов), которые должны в тот или иной момент транскрибироваться (быть инструкцией для синтеза белка в цитозоле клетки).

Дело в том, что, хотя почти все клетки организма содержат в своих хромосомах одну и ту же генетическую информацию, в разных клетках синтезируется только ограниченный, определенный специализацией клетки набор белков.

Как ни удивительно, но к подобному же принципу расположения информационных файлов или музыкальных программ пришли в технологии компакт-дисков. Выбором определенной команды на управление Вы можете активировать (считывать, прослушивать) интересующий Вас в данный момент фрагмент записи.

Таким образом, генетическая информация, содержащаяся в ДНК и РНК, заключена в последовательности расположения нуклеотидов в этих молекулах. Каким же образом ДНК кодирует (шифрует) первичную структуру белков? Суть кода заключается в том, что последовательность расположения нуклеотидов в ДНК определяет последовательность расположения аминокислот в белках. Этот код называется генетическим, его расшифровка – одно из величайших достижений современного естествознания.

В состав ДНК входят по 4 нуклеотида. Если в алфавите жизни всего 4 буквы, то как из них строятся слова? Этот вопрос одним из первых поставил Г. А. Гамов. Двухбуквенный код позволил бы зашифровать всего лишь 16 аминокислот, так как из 4 нуклеотидов можно составить только 16 различных комбинаций, в каждую из которых входит по 2 нуклеотида. Этого мало для 20 аминокислот, используемых в природе для синтеза белков. Г. А. Гамов сделал предположение, что в каждом слове должно быть три буквы. С помощью триплетного кода можно создать из 4 нуклеотидов 64 различные комбинации: 4 в степени 3 равно 64. Это уже заметно больше числа аминокислот.

Как быть? Считать, что слова не обязательно состоят из трех букв? Или среди 64 слов есть синонимы? Г. А. Гамов остановился на второй возможности: некоторые слова (кодоны) могут обозначать одну и ту же аминокислоту. Экспериментальные исследования подтвердили его гипотезу – почти каждая аминокислота шифруется более чем одним кодоном. Например, аргинин, серин и лейцин могут кодироваться шестью

вариантами кодонов. Тем не менее, генетический код однозначен. Каждый триплет (кодон) шифрует только одну из аминокислот.

В генетическом коде существуют три специальные триплета: УГА, УАГ и УАА, каждый из которых обозначает прекращение синтеза цепи белка.

Внутри гена не должно быть знаков препинания. Это очень важно. Например, мы можем легко прочитать и понять фразу, составленную триплетами обычных букв алфавита: «**жил был кот тих был сер мил мне тот кот**». Если убрать фиксированное начало, одну букву (или один нуклеотид в гене), то новые тройки букв (мы должны читать по тройным сочетаниям – кодонам) станут такими: «**илб ылк отт ихб ылс ерм илм нет отк**» [12]. У всех здоровых людей в гене, несущем информацию об одной из цепей гемоглобина, триплет ГАА или ГАГ, стоящий на шестом месте, кодирует глутаминовую кислоту. Если второй нуклеотид в этих триплетах будет заменен на У, то в этом случае вместо глутаминовой кислоты будет встраиваться валин. Последствия будут тяжелыми – все эритроциты у такого человека будут иметь «испорченный» гемоглобин, что вызовет болезнь – серповидноклеточную анемию.

Одна их форм шизофрении (кататония) связана с заменой всего одной аминокислоты на другую в белке *WKL1*. Его код содержится в одном из генов хромосомы 22 человека. Единственная «опечатка» в генетическом коде приводит к развитию тяжелого психического заболевания.

### 7.5.1. Механизм биосинтеза белков

Процесс биосинтеза многостадийный. Сначала необходимо получить доступ к информации, спрятанной в двойной спирали ДНК. Для этого существуют механизмы расплетения нитей ДНК особым ферментом РНК-полимеразой и образования копии требуемой информации (рис. 115).

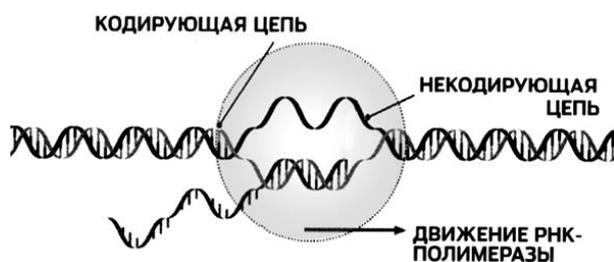


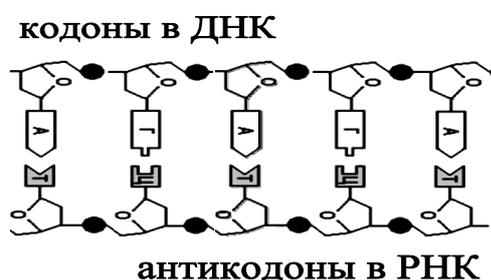
Рис. 115. Образование транскрипта с помощью РНК-полимеразы

Первый этап, этап транскрипции (перезаписи), завершается образованием матричной РНК (мРНК) и её выходом из ядра клетки, где

находятся цепи ДНК, в цитоплазму. Так генетическая информация физически переносится в новую среду.

В цитоплазме клетки происходит процесс сборки белка из растворенных в цитоплазме аминокислот, эту стадию синтеза принято называть трансляцией. Между этими основными стадиями существует промежуточный этап, на котором мРНК, несущая полную копию определенного участка ДНК, подвергается процессингу – таково общее название различных модификаций мРНК, в которых к её концам могут добавляться различные структуры, из неё могут вырезаться интроны и т. д.

Первая стадия – расплетение ДНК и получение мРНК-копии контролируется ферментом полимеразой. В неактивном состоянии цепи ДНК накручены на белок гистон и защищены от внешнего воздействия (см. рис. 112). Молекулы РНК-полимеразы вытесняют гистон, и двойная цепь раскручивается, расходясь на расстояние около 10 нм в диаметре (см. рис. 115) Фермент способен образовывать связи не только с цепями ДНК, вызывая их расхождение, но и с отдельными нуклеотидами. Он служит катализатором присоединения нуклеотидов к кодонам мРНК. При этом действует принцип комплементарности и растущая цепь мРНК оказывается построенной из антикодонов (рис. 116).



*Рис. 116. Принцип комплементарного соответствия*

Близкое расположение антикодонов приводит к соединению свободных «хвостов» остатков фосфорных кислот с атомами углерода соседних «платформ» (рибозами), и формируется цепь мРНК.

Вдали от РНК-полимеразы её стабилизирующая роль уменьшается и цепь антикодонов постепенно отделяется от цепи ДНК. Образно говоря, РНК-полимераза выполняет роль зажима, удерживающего нуклеотиды в нужном положении на время, необходимое для переключения химических связей.

Следует отметить, что в клетках эукариот (т. е. имеющих ядра) имеется три типа РНК-полимераз: одна из них производит мРНК, две другие образуют рибосомные рРНК и транспортные тРНК. Через поры в оболочке ядра все три типа РНК поступают в цитоплазму. Здесь происходит процессинг и матричная РНК превращается в необходимую для данной клетки полноценную матричную мРНК. Основным звеном процессинга является альтернативный сплайсинг – процесс вырезания интронов, т. е. некодирующих участков цепей РНК.

Роль альтернативного сплайсинга очень важна. Он позволяет из одной последовательности, мозаики кодирующих и некодирующих участков гена, получить множество вариантов белков, отличающихся по составу, структуре и свойствам. Поясним ситуацию, представленную на рис. 117, где приведены два варианта вырезания интронов с присоединенными к ним экзонами (кодирующими участками гена) [13].

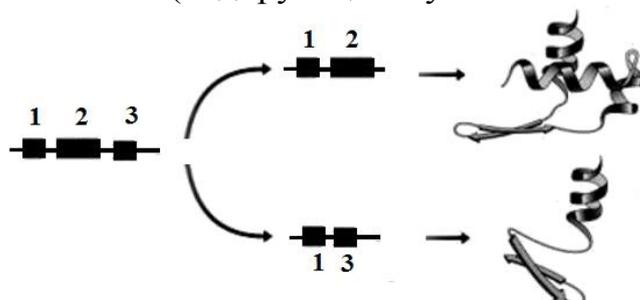


Рис. 117. Два варианта сплайсинга

Если в кодирующей последовательности останутся участки 1 и 2, то в результате синтеза получится один вариант белка. Если останутся участки 1 и 3, то результат синтеза будет другим. Процесс сплайсинга позволяет получить из одного и того же гена не один белок (как считалось ранее), а целое семейство белков сходных, но все же отличающихся по «нюансам». В рекордном случае можно получить несколько тысяч вариантов (!).

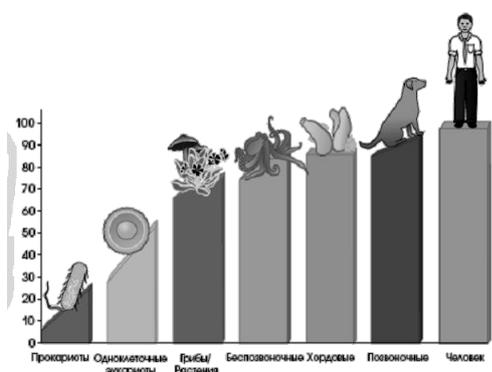


Рис. 118. Увеличение доли интронов в геноме организмов

Таким образом, в отдельных клетках из общей базы данных образуются различные, необходимые конкретной клетке белки. Совсем недавно было установлено, что по мере увеличения сложности организмов увеличивается и длина интронов в геноме организмов (рис. 118).

В общем гене сложных организмов суммарная длина интронов может превосходить суммарную длину экзонов в десятки и сотни раз. Более того, если сравнивать между собой кодирующие последовательности (экзоны) в геномах мыши и человека, то окажется, что они идентичны на 99%. Почему же мы так не похожи на мышей?

Может быть, потому, что у нас альтернативный сплайсинг идёт или по другому пути, или более множественный. Или и то и другое одновременно [13].

После процессинга наступает второй этап синтеза, в котором главным действующим лицом является рибосома. Рибосома состоит из двух субчастиц – большой и малой. Они имеют различные молярные массы и поэтому различаются по скорости осаждения на центрифуге. Большую субчастицу обозначают как 60S, малую – как 40S. Субчастицы находятся в цитоплазме отдельно и собираются вместе на цепи матричной РНК. Каждая из субчастиц состоит из белкового каркаса и внутренней рРНК, в малой частице 40S рРНК имеет спирализацию, в большой субчастице рРНК имеет зигзагообразную форму без вторичной структуры.

На одной цепи мРНК, как правило, рядом собираются несколько рибосом, образуя комплекс полирибосомы. Каждая рибосома служит станком для сборки своей цепи белка, так что при согласованном передвижении полирибосомы вдоль цепи мРНК сразу синтезируется несколько одинаковых молекул данного вида белка.

В процессе сборки полипептидной цепи транспортные тРНК переносят к рибосоме каждую свою аминокислоту; для 20 аминокислот имеется 20 типов транспортных РНК (рис. 119).

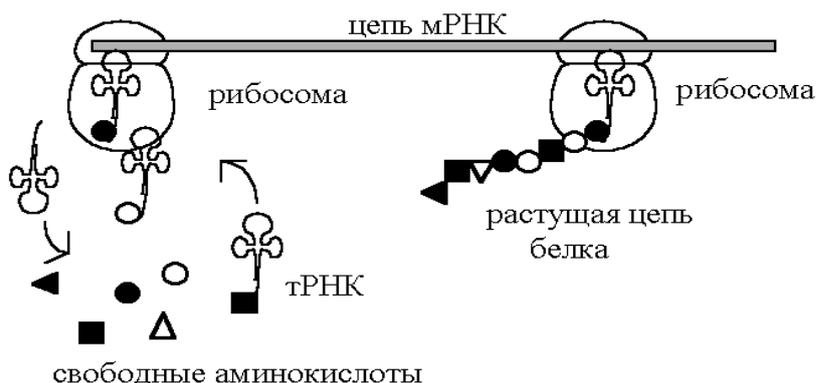


Рис. 119. Схема процесса сборки полипептидной цепи

Цепи тРНК – самые короткие (около 80 нуклеотидов), в центральной части большой петли встроен кодон одной из аминокислот, которая способна соединяться со свободным концом тРНК. По правилу комплементарности кодон может подойти (как ключ к замку) только к своему антикодону, поэтому цепь белка строится в точном соответствии с расположением кодонов в ДНК.

Таким образом, биологическая информация проходит последовательность: кодон – антикодон – и снова кодон. Энергия, необходимая для передвижения рибосомы вдоль цепи мРНК, поступает в результате гидролиза на большой субчастице гуанозинтрифосфата ГТФ: ГТФ «теряет» группу  $PO_4$  и превращается в гуанозиндифосфат ГДФ. Рибосома присоединяется малой субчастицей к цепи матричной РНК, транспорт-

ная РНК доставляет очередную аминокислоту, которая сначала закрепляется на большой субчастице, а затем соединяется с растущей полипептидной цепью.

Процесс сшивания в полимерную цепь (по крайней мере в некоторых случаях) происходит при участии соответствующих ферментов. После этого тРНК освобождается и возвращается в цитоплазму за очередным «грузом».

Документальная фотография, приведенная на рис. 120, иллюстрирует начальный момент сборки на матричной РНК комплекса полирибосомы и цепи белка, которые на нем синтезируются [14].

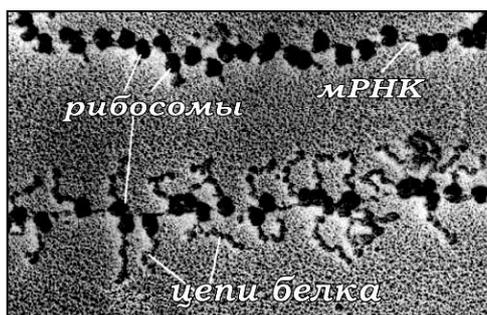


Рис. 120. Синтез цепей белка на комплексе полирибосомы

Белки проходят дополнительную обработку сначала внутри эндоплазматического ретикулула, затем в так называемом аппарате Гольджи. После этого везикулы с белком подходят к мембране клетки и происходит экзоцитоз – выход синтезированного белка в межклеточное пространство или в кровоток без нарушения герметичности самой клетки. Следует отметить высокую эффективность процесса синтеза белков, он происходит с выходом продукта, соответствующим подходу тысяч тРНК к рибосоме за одну секунду. При этом «подбор ключа» кодона тРНК к антикодону мРНК обеспечивается интенсивным тепловым движением всех молекул.

При рассмотрении процессов в клетке невольно возникает ассоциация с фабрикой или химическим заводом. Есть участок копировальный, есть производство конечного продукта для собственных нужд и на экспорт в другие клетки. Что произойдет, если синтез белков на существующих рибосомах вдруг будет заблокирован?

В экспериментах сбой в синтезе (его остановка) производился путем введения конкурента для ГТФ, который занимает его место на рибосоме, но не выделяет при этом энергии, достаточной для сдвига рибосомы на следующий кодон. Оказывается, что на фабрике-клетке производятся и белоксинтезирующие «станки»-рибосомы. Это производство

организовано в пределах ядра клетки. Между ядром и цитоплазмой существуют встречные потоки веществ.

Рибосомные белки, произведенные по вышеописанной «технологии», поступают в ядро, где идет процесс транскрипции генов рРНК в виде общей длинной цепи. В результате процессинга (обработки) из длинной цепи выделяются короткие участки двух видов – рРНК 18S и рРНК 28S. На эти рибосомы осаждаются поступившие рибосомные белки и образуются 40S и 60S субчастицы рибосомы. Эти «полуфабрикаты» выходят через поры ядра в цитоплазму (размеры целой рибосомы велики для «проходной»). В цитоплазме растворены свободные рибосомы, но они также группируются на мембране так называемого эндоплазматического ретикулума в полирибосомы. По макроскопической аналогии это целая станочная линия, проходя по которой (движение относительно, рибосомы «протягивают» мРНК) матричная РНК, вместо спирали стружки, производит спирали белков. При этом через специальные поры белок сразу попадает внутрь эндоплазматического ретикулума.

При блокировке процесса синтеза в клетке ускоряется транспорт питательных веществ (аминокислот, липидов, глюкозы) из кровяного русла и активируется внутриклеточный кругооборот веществ. В первую очередь ускоряется поток белков в ядро клетки, с ними поступают ферменты, активирующие транскрипцию и процесс создания субчастиц рибосом. Последние в большем количестве поступают в цитоплазму, где собираются в резервный «станочный парк», заменяющий испорченный. Таким путем восстанавливается работоспособность клетки и осуществляется экспорт вырабатываемых ею веществ в кровяное русло.

В многоклеточных организмах на любое нарушение гомеостаза клетка реагирует интегральным повышением мощности работы всего белоксинтезирующего конвейера и сопряженным с ним увеличением белковой массы, то есть ростом. Это повышает защитный и энергетический потенциал клеток и позволяет им преодолеть вредоносное действие нагрузочного фактора (или стресса), если его сила не окажется чрезмерной (несовместимой с жизнью клетки).

*Из этого следуют два вывода.* Во-первых, умеренные нагрузки на клетки (через нагружение, иногда через стрессы всего организма) сопровождаются повышенным энерговыделением и ростом отдельных клеток, а с ними и организма в целом. В этом объяснение эмпирически известного факта повышения физических возможностей людей, занимающихся спортом или тяжелой работой. Во-вторых, при частых и значительных химических нагрузках на клетки (будь то последствия эмоций, или приема алкоголя, или радиационно-химических воздействий)

адаптационный механизм «сбоит» и создает лишь дополнительные «машины трансляции», осуществляющие плохо контролируемый рост клеток, что приводит к избыточной массе организма, а по некоторым данным – к росту канцерогенных опухолей.

### 7.5.2. Межклеточный обмен веществами

В настоящее время ещё не все детали поразительного по совершенству механизма воспроизводства генетической информации и молекулярного биологического синтеза установлены. Понято хотя бы главное, в том числе то, что каждая клетка в организме не создает всех нужных ей веществ, хотя генетической информацией обладает. Более эффективным оказывается путь специализации функций клеток, это приводит к совершенствованию организма в целом.

Следовательно, между «элементалями» организма (клетками) должен непрерывно поддерживаться обмен, – клетки и поставщики, и потребители потоков веществ. У простейших одноклеточных организмов процесс обмена веществами между клеткой и окружающей средой является процессом пищеварения, в результате которого происходит ассимиляция полезных веществ и удаление шлаков, остающихся после утилизации продуктов питания. За последние 10–15 лет удалось установить, что все разнообразие процессов ассимиляции полезных для клетки продуктов, свойственных живым организмам (от одноклеточных бактерий до млекопитающих), сводится к трем основным типам: внеклеточному, внутриклеточному и мембранному. Схема соответствующих процессов приведена на рис. 121 [15].

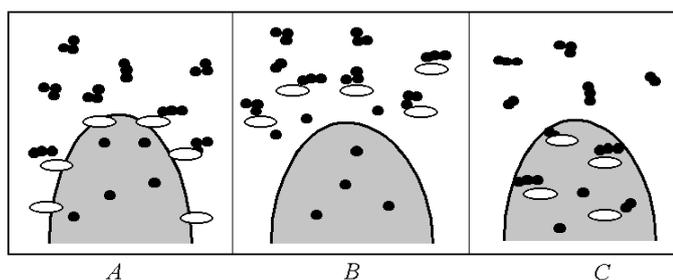


Рис. 121. Схема процессов ассимиляции:

*A – мембранный; B – внеклеточный; C – внутриклеточный*

При внутриклеточной ассимиляции ферменты цитоплазмы гидролизуют (разлагают) небольшие молекулы питательных веществ (главным образом димеры: дисахариды, дипептиды и т.д.), проникшие в клетку путем диффузии или путем специального транспорта (эндоцитоза).

Внеклеточное пищеварение осуществляется ферментами, которые выходят из цитоплазмы наружу. Здесь ферменты, как говорят биохимики, атакуют поглощенные организмом субстраты (крупные молекулярные комплексы), разрушают их до димерных или мономерных форм, которые уже способны затем проникать в клетку.

У высших животных и человека этот процесс начинается в ротовой полости и продолжается в полости желудка, сочетаясь с внутриклеточным. Мембранная деполимеризация субстрата происходит на границе и имеет черты как внеклеточного, так и внутриклеточного процессов. Она малоэффективна в отношении крупных надмолекулярных комплексов. Поэтому для таких «лакомых кусочков» многие клетки используют цикл эндоцитоза.

Эндоцитоз (процесс обратный экзоцитозу) начинается с того, что макромолекула питательного вещества прикрепляется к специальному мембранному белку, называемому рецептором. Рецепторы могут перемещаться по плазматической (полужидкой) мембране клетки, перенося с собой лиганды – прикрепленные к ним большие молекулы. Такой перенос оказывается более эффективным, чем случайная диффузия субстрата по мембране. За одну минуту циркулирующий белок может пройти расстояние около 10 мкм, что сравнимо с размерами некоторых клеток. Когда в одном месте собираются до тысячи рецепторов с лигандами, такой участок мембраны начинает впячиваться внутрь клетки и образует сначала ямку, а затем пузырек (везикулу), как это схематично показано на рис. 122. Везикула отпочковывается от мембраны и перемещается в цитоплазму, где с ней соединяется лизосома с ферментами.

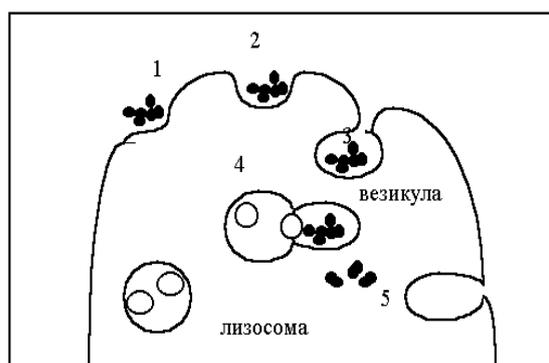


Рис. 122. Схема процесса эндоцитоза

Весь этот цикл происходит довольно быстро, за одну-две минуты.

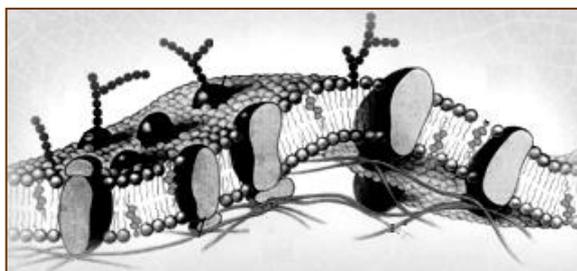
Клетки различных организмов используют тот или другой тип ассимиляции, в зависимости от их эволюционного пути. Эндоцитоз и внутреннее пищеварение характерно для низших организмов, у высших животных и человека основные роли играют процессы полостного гид-

Оболочка лизосомы предохраняет содержимое цитоплазмы от химического действия ферментов. Когда две оболочки входят в контакт и объединяются, ферменты переходят в везикулу и расщепляют пищевой субстрат, который поступает в цитоплазму, а белки оболочки везикулы возвращаются в мембрану клетки.

ролиза и мембранного всасывания. Между ними существует функциональная связь, поскольку конечные продукты полостной деполимеризации служат исходным сырьем для мембранных процессов. В любом случае именно через мембрану клетки проходят встречные потоки веществ.

Оценка роли мембран возросла в последние годы, когда были начаты исследования механизма гормонального управления межклеточным обменом веществ. Например, известно, что клетки печени вырабатывают глюкозу в ответ на появление в крови гормона адреналина. Каким образом внешнее (по отношению к клетке) химическое воздействие запускает процесс выработки глюкозы?

Было предложено несколько моделей строения плазматической мембраны клеток, наиболее полной является твердокаркасная жидкокристаллическая модель (рис. 123).



*Рис. 123. Модель строения мембраны клеток*

По ней основу всякой клеточной мембраны составляет двойной слой липидов (жирных кислот). Головные части молекул липидов гидрофильны, то есть хорошо смачиваются водой и водными растворами. Хвостовые цепи, наоборот, водоотталкивающие, гидрофобны, энергия их взаимодействия между собой превосходит энергию их взаимодействия с молекулами воды. Головные части формируют внешние поверхности мембран, а гидрофобные концы обращены внутрь. Бислоем весьма стабилен и, в то же время, имеет свойства жидкости. В одну или сразу в обе поверхности бислоя встраиваются крупные молекулы белков различного назначения: циркулирующие (переносчики лигандов), коммутационные, рецепторы и эффекторы. С внутренней стороны мембраны имеется ажурный каркас с элементами дальнего порядка (свойственного кристаллам), он построен из микронитей (микрофиламент) спектрина, которые закреплены за некоторые коммутационные белки, встроенные в бислою мембраны.

Такая жидко-твердая структура допускает локальные и общие перестройки с различной степенью кооперативности. При этом структурное возмущение, распространяющееся по мембране после посадки гор-

мона или медиатора (химического передатчика сигнала) на соответствующий только ему рецептор, приводит к изменению координации и каталитической активности других мембранно-связанных ферментов. По такому механизму передаются межрецепторные сигналы (взаимодействия). Например, инсулин через свой рецептор изменяет свойства совершенно другой белковой молекулы –  $\beta$ -адренорецептора.

В мембране имеются каналы различного диаметра, стенками которых служат молекулы белков. Через эти каналы свободно могут проходить в обе стороны молекулы воды, некоторые ионы (натрия и калия) и некоторые кислотные остатки (фосфорных кислот, аминокислоты).



*Рис. 124. Схема ионного канала и рецептора*

Часть каналов открыта постоянно (рис. 124), другие открываются только тогда, когда связанные с ними ферменты расщепляют молекулы субстрата (при мембранном пищеварении).

В результате реакции конформация фермента заметно изменяется, так что канал открывается и отщепленные частицы могут войти в цитоплазму клетки (пример конформационного перехода). Сигнал на фермент натриевого канала может быть передан также от конформационного перехода на соседнем рецепторе.

Более сложные процессы передачи информации на уровне клетки происходят с участием мессенджеров (белков-посланников). В середине 80-х гг. прошлого века выяснилось, что центральное место в передаче межклеточных управляющих сигналов занимают *G*-белки, такое название они получили из-за приспособленности для связи с гуаниновыми нуклеотидами ГТФ и ГДФ. *G*-белки прикреплены к внутреннему слою мембраны и могут передвигаться по нему от рецептора к эффектору (рис. 125).

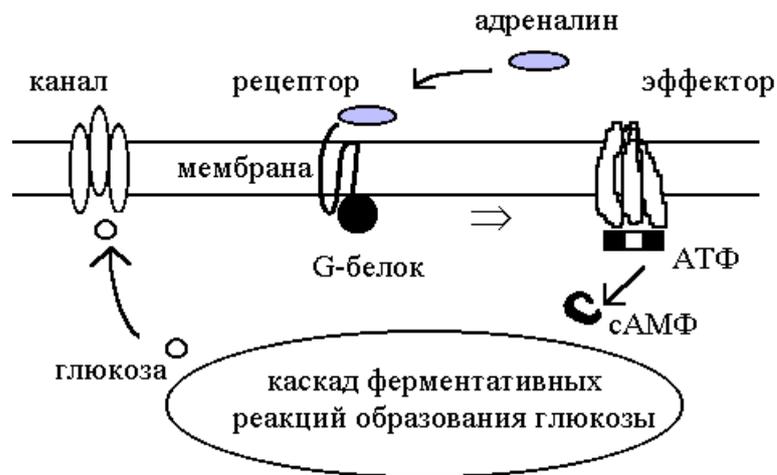


Рис. 125. Схема процессов с участием G-белка

Мембранные процессы с участием G-белков происходят по общей, универсальной схеме. После того как адреналин (или другой гормон) прикрепляется к наружному концу своего рецептора, выделяющаяся энергия связи передается на другом конце рецептора G-белку, это стимулирует обмен белка с присоединенным к нему гуаниндифосфатом. Обмен происходит с выделением энергии, и G-белок диссоциирует, от него отделяется его компонент  $\beta$ -субчастица (она несет ГТФ) и быстро мигрирует к белку-эффектору. Это первый этап процесса.

Второй этап начинается после того, как связывание  $\beta$ -субчастицы с эффектором переводит в возбужденное состояние его электронную оболочку.

В возбужденном состоянии химическая активность молекул повышается и становятся возможными новые реакции, в обычных условиях не протекающие. В рассматриваемом случае эффектор становится катализатором превращения аденозинтрифосфата (АТФ) в циклический аденозинметафосфат, обозначенный как сАМФ (рис. 122). Активное состояние сохраняется до тех пор, пока не произойдет гидролиз (отщепление одной фосфатной группы):



Тогда  $\beta$ -субчастица возвращается назад, возбужденное состояние эффектора снимается, и он прекращает создавать сАМФ. Таким образом, время «включенного» состояния эффектора задается временем протекания реакции гидролиза фосфатной цепи гуанинового нуклеотида в составе субчастицы G-белка. Можно говорить о том, что обнаружен механизм таймера, или своеобразного реле времени, на молекулярном

клеточном уровне. По-видимому, организм человека воспринимает течение времени благодаря этой реакции, которая длится от 0,1 с до 0,5 с.

Наработанные за время активного состояния эффектора молекулы сАМФ запускают каскад ферментативных реакций образования глюкозы из животного крахмала гликогена. Такие реакции давно изучены и хорошо воспроизводятся в лабораторных условиях. Образованная глюкоза выходит через мембранные каналы в межклеточное пространство или в кровяное русло. Это ответ клетки на внешнее «послание» о необходимости для организма некоторого количества глюкозы. В месте ее использования (например в мышцах) происходит потребление энергии глюкозы (рис. 109).

Зачем природе потребовался такой (на первый взгляд усложненный) вариант передачи информации? Дело в том, что при таком механизме действия происходит большое усиление начального сигнала. Будучи в возбужденном состоянии, эффектор преобразует сотни молекул АТФ на одну молекулу первичного, внешнего для клетки, мессенджера (в данном случае молекулы адреналина), появляются сотни мессенджеров вторичных (до 500 в нашем случае) в цитоплазме клетки. За сопоставимое время через открытый канал мембраны успели бы пройти всего один или два иона и эффективность управления была бы низкой.

Процессы передачи межклеточного взаимодействия с участием *G*-белков имеют большое распространение в живых организмах. Считают, что они играют роль в различении запахов, когда количество воспринимаемых первичных ароматических молекул чрезвычайно мало. Эти белки могут регулировать работу ионных каналов в мембранах. Например, циклический сГМФ поддерживает в открытом состоянии натриевый канал. *Gm*-белок включает эффектор, который превращает сГМФ в нециклический ГМФ. После этого канал для ионов натрия закрывается и клетка в целом приобретает электрический заряд.

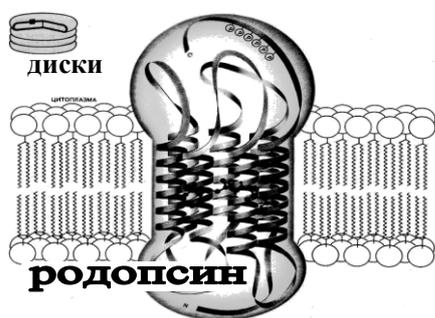


Рис. 126. Молекула родопсина в мембране диска

Дополним теперь описание механизма зрения человека. В молекуле родопсина присутствует *Gm*-белок трансдуцин (рис. 126). Он контролирует белок-эффектор фосфодиэстеразу, которая превращает сГМФ в ГМФ. Процесс идет с усилением начального сигнала (фотовозбуждения одной молекулы ретиналя, описанного ранее в п. 5.4.1) в 500 раз! Кроме того *G*-белки служат своеобразными часовыми механизмами

в организмах, время гидролиза ГТФ → ГДФ оказывается на уровне интервалов, вполне различаемых человеком.

Человек «чувствует» время потому, что в его клетках имеется такое важное соединение, как гуанинтрифосфат!

### 7.5.3. Взаимодействие нервных клеток

Мозг человека содержит большое количество нервных клеток (нейронов), их число сопоставимо с количеством звезд в галактике. В среднем каждый из  $10^{12}$  нейронов имеет до 10 000 контактов с другими, поэтому мозг представляет собой огромную сеть взаимосвязей. Функционирование мозга изучают с различных точек зрения: как орган психической деятельности, как информационную сеть, как систему управления жизнедеятельностью человека. При этом используют как физические методы исследования (например томографию, термографию, энцефалографию), так и методы биохимии. Если первая группа методов дает сравнительно интегральную картину тепловых или электромагнитных полей, генерируемых мозгом, то вторая группа методов направлена на изучение внутриклеточных и межклеточных процессов. В частности, в последние годы были предприняты попытки сравнения энцефалограмм ребенка, еще не умеющего как следует управлять своими эмоциями, и далай-ламы, способного мысленными усилиями влиять на жизнедеятельность своего организма (рис. 127).



Рис. 127. Исследование электромагнитной активности мозга

Работы в области биохимии мозга в последние годы привели к изменению концепции памяти человека. Если в прошлом развитие памяти связывали с наличием извилин в неокортексе (новая кора мозга), суть современной концепции можно выразить лозунгом: «Память человека заключена в синапсах!». Чтобы подойти к этому заключению, необходимо предварительно рассмотреть общие процессы взаимодействия нервных клеток. Оказалось, что и здесь не обходится без участия G-белков.

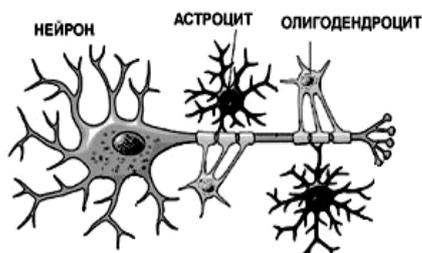


Рис. 128. Три основных типа клеток мозга

На рис. 128 показана форма отдельного нейрона и его партнеров – глиальных клеток: астроцита и олиго-

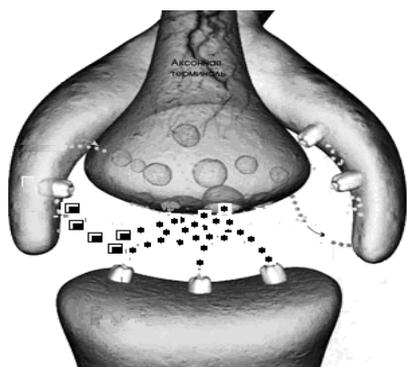
дендрокита. Это основные типы клеток, в разных количественных пропорциях составляющие все отделы головного мозга человека. Считают, что олигодендрокиты выполняют в основном конструкционную функцию, скрепляя и поддерживая форму того или другого отдела мозга. Астроциты не только создают иммунный барьер между плазмой крови и нейронами, но и участвуют в управлении передачей сигналов. Основными элементами нейрона являются цитозоль клетки с ядром и аппаратом синтеза белков-нейромедиаторов, аксоны и дендриты. Ветвистые дендриты собирают входные сигналы от соседей, аксон проводит выходной сигнал к другим клеткам, с которыми он соединяется контактами-синапсами. По аксону (его длина от 1 мм до 1 м и более) распространяется электрический сигнал, скорость которого зависит от толщины слоя миелина на аксоне. При этом сигнал распространяется «прыжками» от одного перехвата Ренье к другому и его скорость достигает 100 м/с (рис. 129).



*Рис.129. Распространение электрического потенциала по аксону*

Вдоль аксона, внутри его, движутся также везикулы с нейромедиаторами (синтезированными в цитозоле), но их скорость составляет всего 6–7 см/ч. Синапс, место контакта разветвлений аксона с мембраной других нейронов, является местом передачи и усиления сигнала. При этом определенную управляющую роль, как оказалось, играют и астроциты. Характерной чертой синаптической связи является ее односторонняя проводимость.

Рассмотрим последовательность процессов, которые происходят в синаптической щели, т. е. в промежутке между пресинаптическим нейроном и постсинаптическим нейроном. На рис. 130 щель охватывается еще и отростком астроцита. На поверхности мембран всех клеток имеются рецепторы и управляемые ионные каналы, в пресинаптическом нейроне имеется запас везикул с нейромедиатором.



*Рис. 130. Процессы в синаптической щели*

Когда по аксону к синаптической щели поступит сигнал (потенциал действия), он будет уловлен отростком астроцита (см. стрелку в правой части рис. 130). Под действием этого сигнала из астроцита выходят ионы двухвалентного кальция  $Ca^{2+}$ , прохо-

дящие через ионные каналы в пресинаптическое окончание. Было установлено, что четыре иона  $\text{Ca}^{2+}$  стимулируют выход везикулы на поверхность мембраны, где происходит экзоцитоз, т. е. выброс молекул нейромедиатора в синаптическую щель.

В частности, это могут быть молекулы дофамина, глутамата и др. Они «высаживаются» на соответствующие рецепторы на поверхности мембраны постсинаптического окончания. Это запускает процесс с участием *G*-белков. Как это было описано выше, часть *G*-белка переходит к белку-эффектору и начинается цикл выработки вторичного медиатора сАМФ с большим усилением сигнала, при этом длительность цикла контролируется гидролизом ГТФ. Если бы не было механизма отключения производства сАМФ, то процесс мог бы пойти не контролируемо, с быстрым расходом всех запасов.

Вторичные медиаторы запускают, в свою очередь, цепь последующих реакций, которые могут сопровождаться психическим «эффектом вознаграждения». Дофаминсодержащие клетки находятся в самой глубине мозга, в верхней части ствола мозга. Одна дофаминовая клетка может иметь синаптическую связь с 5 млн других нейронов! Отсюда возбуждение передается в лимбическую систему и в лобную часть неокортекса. Установлено, что лимбическая система контролирует непроизвольное поведение и наследственные реакции, т. е. врожденную основу эмоций. При этом циркуляция возбуждений по сети нейронов охватывает сферу не только эмоций, но и памяти и области прогноза развития событий.

Следует сказать, что дофамин является предшественником норадреналина и адренолина. Эти нейромедиаторы образуются из тирозина, – аминокислоты, которая поступает в организм человека только с пищей. Это одна из так называемых незаменимых аминокислот. Названные вещества участвуют:

- в активации бодрствования центральной нервной системы;
- регуляции центров биологических потребностей;
- регуляции эмоций (азарта, любопытства, удовольствия и т. д.).

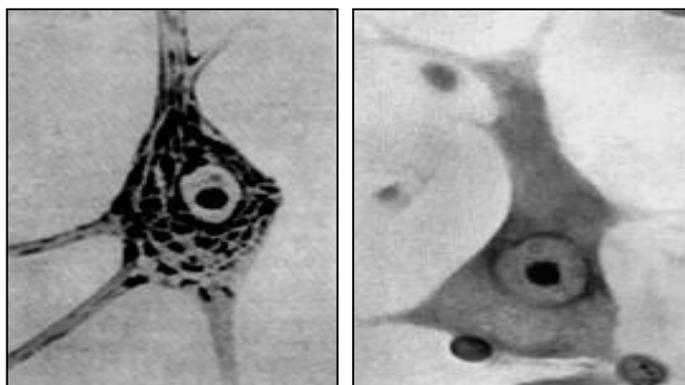
Не случайно, что через них проявляется действие на человека психотропных препаратов или наркотиков. Так, например, под действием героина происходит обильный неконтролируемый выброс дофамина в синаптическую щель. Это приводит к усиленному возбуждению лимбической системы, и наблюдается кратковременная эйфория измененного сознания, причем превалирует активация биологических, подсознательных реакций, тех, что остались в человеке от животного.

Затем вступает в действие обратная связь. Она осуществляется двумя путями. Во-первых, на мембране пресинаптического окончания

есть белки-переносчики, которые переносят избыточные молекулы дофамина на внешнюю сторону синапса, где они запускают реакцию торможения выброса медиатора из везикул. В частности, вырабатывается динорфин, который в конечном счете блокирует работу «системы вознаграждения». Во-вторых, отросток астроцита выбрасывает молекулы, которые «перехватывают» дофамин, не позволяя ему осуществить посадку на дофаминовые рецепторы (рис. 130, левая часть). Таким образом мозг подстраивается к избытку нейромедиатора в синапсах. Поэтому для достижения прежнего психического эффекта требуется бóльшая доза наркотика, поскольку организм человека оказывается в определенной мере подготовленным к нейтрализации его действия.

Механизм влияния кокаина несколько другой: он блокирует работу обратных переносчиков дофамина, тем самым увеличивая во много раз время присутствия дофамина в синаптической щели.

В результате многократного приема психотропных веществ нейроны мозга человека погибают (рис. 131, правая часть).



*Рис. 131. Нормальный нейрон (слева) и погибший (справа)*

В нормальном нейроне хорошо различим аппарат синтеза необходимых нейрону белков, под действием наркотиков эти структуры в цитозоле оказываются полностью разрушенными. А ведь нервные клетки не делятся и не восстанавливаются.

### **7.6. Физические способы ускорения обмена веществ**

В процессе эволюции из простейших одноклеточных организмов образовались многоклеточные. При этом размеры клеток остались в пределах одного порядка величин. Почему размеры клеток так малы (1–20 мкм)? В чем выгода деления клеток вместо роста их размеров? Во многом причины чисто физические, обусловленные объективным действием физических законов.

Все живые организмы стремятся ускорить обмен веществ – это способствует быстрому росту, достижению половой зрелости и воспроизводству, то есть выживанию вида в целом. Обмен веществ зависит от двух факторов: от скорости подхода питательных веществ к клетке и от скорости химических реакций в клетке. Эксперимент показывает, что скорость реакций внутри клетки обычно выше скорости подхода питательных веществ. Каким образом одноклеточные организмы могут увеличить скорость подхода необходимых продуктов питания?

Рассмотрим простую модель неподвижного одноклеточного организма в виде закрепленной сферы (см. рис. 132). Если клетка неподвижна, то основным процессом транспорта является диффузия. По определению это направленный поток молекул данного сорта, вызванный градиентом их концентрации. В отличие от упорядоченного механического перемещения, диффузия поддерживается тепловым хаотическим движением всех молекул окружающей среды. Пока есть различие концентраций внутри организма и вне его, диффузионный транспорт питательного вещества (например сахара) к клетке происходит.

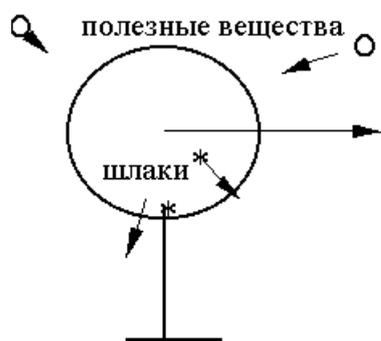


Рис. 132. Схема встречной диффузии веществ

В результате частичного усвоения образуются отходы (шлаки), это может быть просто вода и углекислый газ (как при окислении сахара или глюкозы), аммиак, мочевина, угольная кислота  $H_2CO_3$ , продукты распада гемоглобина (урохром) и других белков. В окружающей клетку

среде концентрация таких веществ мала и возникает встречная диффузия шлаков из объема клетки.

Что будет происходить вокруг неподвижной клетки? Во-первых, обеднение слоя питательных веществ, во-вторых, накопление в приповерхностном (наружном) слое молекул отходов. Это приводит к уменьшению соответствующих градиентов концентраций, и потоки веществ уменьшаются. Клетка начинает голодать и отравляться шлаками. Простейший способ избежать подобной ситуации – использование механического перемещения. Некоторые простейшие организмы «предпочли» двигаться сами в окружающей их среде, другие выработали приспособления для активного влияния на среду: реснички, ворсинки, жгутики, с их помощью создается

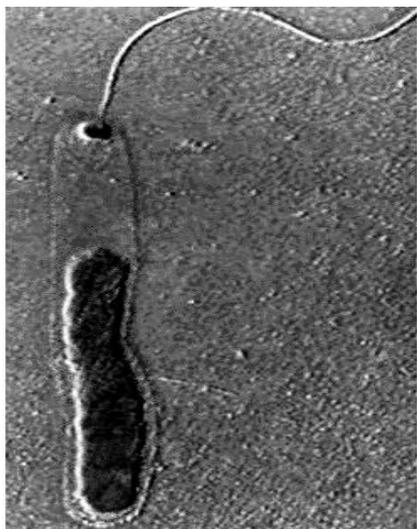


Рис. 133. Бактерия со жгутиком

движение среды в приповерхностном слое, вызывающее приток питательных и рассеяние отработанных веществ. У многих простейших организмов имеются жгутики, окончания которых вращаются с угловой скоростью 50 оборотов за секунду (рис. 133). Эта величина сопоставима со скоростью вращения валов макроскопических моторов – 3000 оборотов в минуту! Так как масса клетки мала, жгутик может создавать значительное ускорение при небольшой силе тяги.

Бактериальные жгутики представляют собой тонкие полые нити длиной 15–20 нм, стенки которых образованы молекулами белка флагалина, жгутик прикреплен к базальному тельцу в мембране клетки. Считают, что оно приводит жгутик во вращение за счет разности потенциалов на поверхности мембраны. Если диффузию можно назвать пассивным видом транспорта веществ, то механическое движение создает транспорт активный.

Необходимость движения диктуется ещё одним обстоятельством – энерговыделением клетки. Оно может быть значительным, если сравнивать удельные величины. Подсчитано, что на единицу объема бактерия выделяет больше энергии, чем Солнце! Этот результат получается просто потому, что объем бактерии очень мал, при делении на малую величину результат получается значительным, даже от выделения небольшой энергии химических реакций.

Законы термодинамики едины для неживого и живого, и коэффициент полезного действия биологической машины не может достигать единицы. Часть энергии обязательно преобразуется в тепловыделение, без достаточного теплообмена с внешней средой клетка будет перегреваться до такой степени, что это будет несовместимо с её жизнью (из-за денатурации белков например). Механическое движение в среде усиливает теплообмен и снижает температуру одноклеточных организмов.

Однако для процессов теплообмена критическим параметром является отношение объема (в котором находятся источники тепла) к поверхности теплообмена. Мы приняли сферическую модель простейшего организма, для неё это отношение равно максимально возможному (наибольший объем к наименьшей поверхности). С точки зрения теплообмена это самый плохой вариант (из-за малости площади обмена). Для цилиндра ситуация становится лучше – при равных объемах поверхность цилиндра в 1,6 раз больше. Поэтому форма клеток эритроцитов (красных кровяных телец) ближе к цилиндрической, чем к сферической. Эритроциты имеют форму круглой «лепешечки», несколько вдавленной в средней её части.

При любой геометрической форме тел их объемы растут пропорционально кубу характеристического размера, а поверхность растет про-

порционально его *квадрату*. Можно сказать, что поверхность «не успевает» за ростом объема, когда с течением времени масса одноклеточного организма возрастает (особенно при хорошем питании). К чему это приводит?

Как теплообмен, так и обмен потоками веществ происходит через поверхность клетки. Если величина поверхности отстает от оптимального размера, то клетка начинает голодать. Кроме того, будет затруднен вывод шлаков, некоторые из них в большом количестве действуют как отравляющие вещества (к примеру аммиак). Выход из кризисного состояния подсказывают законы природы: чтобы продолжался процесс накопления массы живого вещества, клетка должна радикально изменить форму, то есть разделиться. Простые арифметические расчеты покажут Вам, что при условии  $M = M_1 + M_2$  отношение суммарной площади двух капель к суммарному их объему будет больше, чем для одной большой капли.

Так что можно сказать, что ограничение характеристических размеров клеток микронным уровнем является объективным требованием законов физики, химии и геометрии. Они должны действовать как на Земле, так и на других планетах, где созданы подходящие для жизни условия. В качестве иллюстрации к сказанному на рис. 134 показана форма простейших бактерий. Сначала это сферы – кокки, затем происходит удвоение до диплококков, потом появляются стрептококки и далее – бациллы, вибрионы, спирохеты.

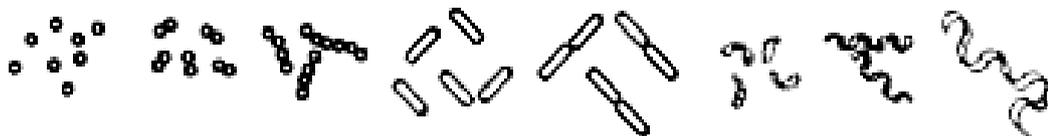


Рис. 134. Форма простейших организмов – бактерий.  
Слева направо: кокки, диплококки, стрептококки, бациллы,  
диплобациллы, вибрионы, спириллы, спирохеты

### **Задания для самостоятельной работы**

1. Перечислите названия планет Солнечной системы, начиная от Солнца. Знаете ли Вы об исключении Плутона из числа планет Солнечной системы (переведен в группу малых планет, куда входят Сесна, Куазуоар и другие малые небесные тела)?
2. Перечислите, какие отдельные слои выделяют в атмосфере Земли в порядке их удаления от поверхности Земли.

3. В качестве антисептического мероприятия в операционных палатах производят их освещение ультрафиолетовой лампой. Как Вы думаете, почему?
4. Запишите в рабочей тетради какую-либо фразу из 5–6 слов. Вставьте между ними «интроны» в виде – интрон № 1– интрон № 2 – и т. д. Затем имитируйте процедуру альтернативного сплайсинга, «вырезая» из текста интроны так, чтобы сшивались слова фразы по разным вариантам. Не переставляйте местами слова фразы, вырезайте все последующие слова вместе с «интронами». Сколько вариантов Вы сможете получить в итоге?