

АТОМНО-МОЛЕКУЛЯРНАЯ СТРУКТУРА БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

1. АТОМНЫЙ СОСТАВ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

В живых организмах обнаруживаются только 40 наиболее легких элементов из 92 природных химических элементов, присутствующих в земной коре. Причем из этих 40 только 27 существенны для жизнедеятельности организмов, остальные элементы (например, висмут, свинец, олово, кадмий, сурьма, таллий и др.) являются загрязняющими примесями. Атомный состав даже очень разных по уровню сложности организмов различается значительно меньше, чем состав любого организма отличается от состава литосферы (рис. 1).

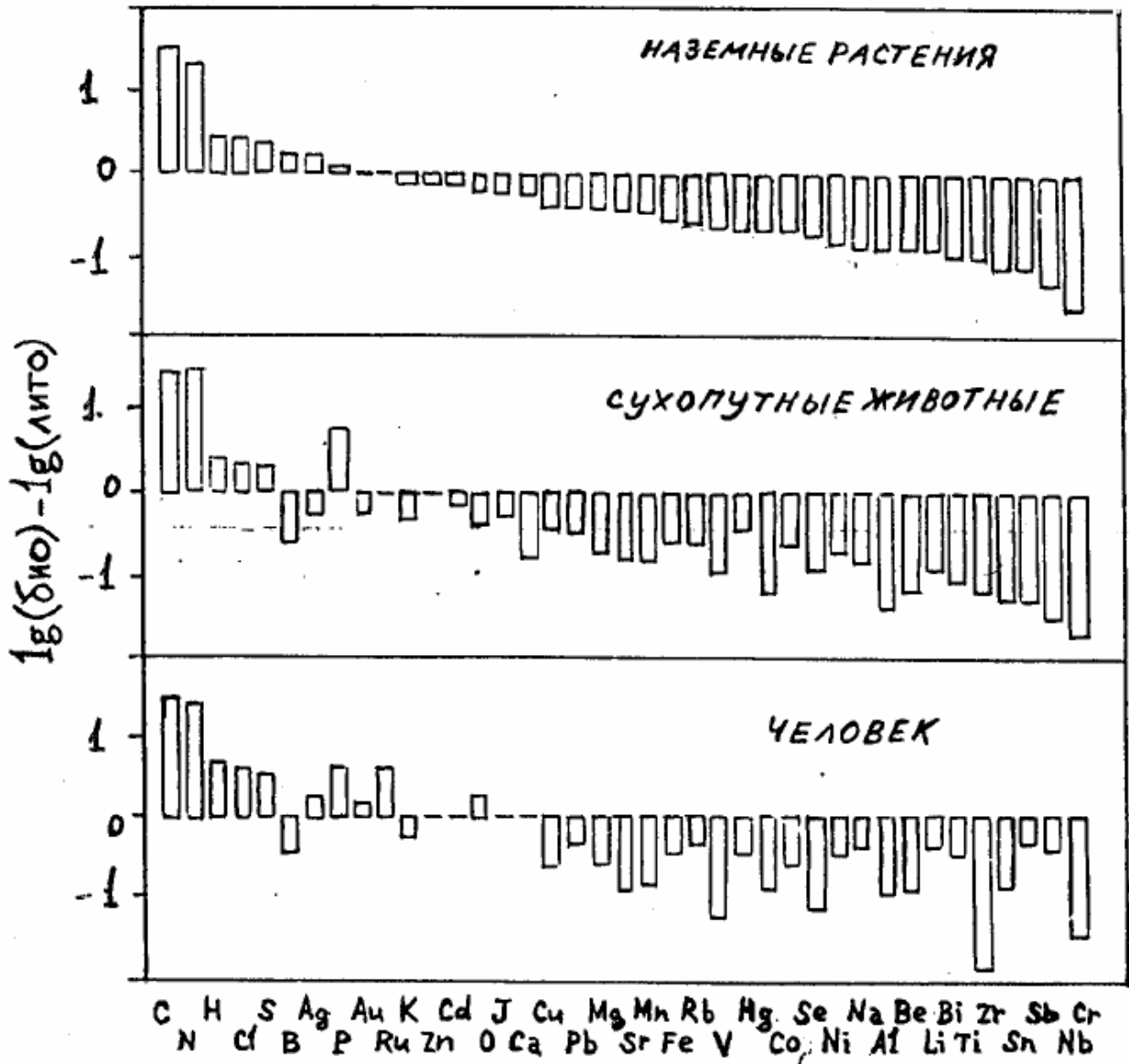


Рис. 1. Сравнение атомного состава живых организмов и литосферы. Из-за различий в содержании разных химических элементов, достигающих нескольких порядков, использована разность двух логарифмических шкал

На долю четырех химических элементов - С, О, Н и N - приходится около 98% веса организма. Из этих элементов состоят все органические соединения, поэтому их называют ОРГАНОГЕНАМИ. Остальные элементы, составляющие организм, подразделяются на МАКРОЭЛЕМЕНТЫ (К, S, P, Cl, Mg, Na, Ca и Fe), которые содержатся в количестве 0,01-0,1 весовых %, и МИКРОЭЛЕМЕНТЫ (Zn, Cu, I, F, Mn, B, Br, Co, Mo, Si, Ba, Se, V, Cr, Ni), содержание которых меньше 0,01%.

Несмотря на малые количества, микроэлементы выполняют некоторые незаменимые функции (например, входят в состав ферментов), поэтому недостаток любого из них приводит к серьезным нарушениям обмена веществ. Избыток микроэлементов столь же опасен из-за возможности их вступления в неспецифические химические реакции. Необходимо, чтобы их концентрации были почти постоянными, т.е. менялись в очень малых пределах от 10^{-4} до 10^{-6} долей весовых процентов. Хотя организмы обладают способностью выведения избытка микроэлементов и тяжелых металлов, они не всегда могут справиться с этой задачей, особенно в условиях техногенного загрязнения, последствия которого еще во многом не ясны

Возникновение и существование земной жизни, очевидно, стало возможно лишь благодаря уникальной способности углерода образовывать большие молекулы. Из-за малых размеров и наличия во внешней оболочке четырех электронов атом углерода может образовывать четыре прочные ковалентные связи с другими атомами. Наиболее важное значение имеет способность атомов углерода соединяться друг с другом, образуя цепи и кольца и создавая в результате большие и сложные молекулы, на размеры которых не накладывается никаких ограничений. До некоторой степени аналогичной способностью обладает Si, что дало повод для рассуждений о возможности существования внеземной жизни на основе соединений кремния. Однако он уступает углероду в устойчивости соединений, содержащих структуры из одинаковых атомов. После углерода наиболее длинные цепи из одинаковых атомов известны для серы.

Каждый из химических элементов имеет несколько изотопов. Они обладают почти одинаковыми химическими свойствами, однако молекулы, содержащие легкие изотопы, подвижнее, чем молекулы, содержащие тяжелые изотопы, и химические связи, образуемые тяжелыми изотопами, прочнее, чем такие же связи, образуемые легкими изотопами. Поэтому молекулы, содержащие легкий изотоп, легче вступают в химические реакции и такие процессы, как диффузия, абсорбция, испарение и т.д. В результате углерод живых организмов оказывается обогащенным изотопом ^{12}C по отношению к исходному для всего живого углероду атмосферного CO_2 , потому что в процессе фотосинтеза растения предпочтительно поглощают $^{12}\text{CO}_2$, а органический кислород оказывается обогащен изотопом ^{18}O сильнее, чем вода и кислород атмосферы, но меньше, чем атмосферный углекислый газ. Это явление называется БИОЛОГИЧЕСКИМ ФРАКЦИОНИРОВАНИЕМ ИЗОТОПОВ.

Тело человека состоит из $\sim 7 \cdot 10^{27}$ атомов, объединенных в сильно неравномерную физическую структуру. Хотя в теле человека обнаруживаются обычно 41 элемент (см. табл. 1) CHON составляют 99% от всех атомов. Практически 87% атомов тела человека – это или водород или кислород.

Таблица 1

Атомный состав тела человека среднего телосложения мужского пола весом 70 кг

Элемент	Символ	Число атомов	Элемент	Символ	Число атомов
Водород	H	$4,22 \cdot 10^{27}$	Кадмий	Cd	$3 \cdot 10^{20}$
Кислород	O	$1,61 \cdot 10^{27}$	Бор	B	$2 \cdot 10^{20}$
Углерод	C	$8,03 \cdot 10^{26}$	Марганец	Mn	$1 \cdot 10^{20}$
Азот	N	$3,9 \cdot 10^{25}$	Никель	Ni	$1 \cdot 10^{20}$
Кальций	Ca	$1,6 \cdot 10^{25}$	Литий	Li	$1 \cdot 10^{20}$
Фосфор	P	$9,6 \cdot 10^{24}$	Барий	Ba	$8 \cdot 10^{19}$
Сера	S	$2,6 \cdot 10^{24}$	Йод	I	$5 \cdot 10^{19}$
Натрий	Na	$2,5 \cdot 10^{24}$	Олово	Sn	$4 \cdot 10^{19}$
Калий	K	$2,2 \cdot 10^{24}$	Золото	Au	$2 \cdot 10^{19}$
Хлор	Cl	$1,6 \cdot 10^{24}$	Цирконий	Zr	$2 \cdot 10^{19}$
Магний	Mg	$4,7 \cdot 10^{23}$	Кобальт	Co	$2 \cdot 10^{19}$
Кремний	Si	$3,9 \cdot 10^{23}$	Цезий	Cs	$7 \cdot 10^{18}$
Фтор	F	$8,3 \cdot 10^{22}$	Ртуть	Hg	$6 \cdot 10^{18}$
Железо	Fe	$4,5 \cdot 10^{22}$	Мышьяк	As	$6 \cdot 10^{18}$
Цинк	Zn	$2,1 \cdot 10^{22}$	Хром	Cr	$6 \cdot 10^{18}$
Рубидий	Rb	$2,2 \cdot 10^{21}$	Молибден	Mo	$3 \cdot 10^{18}$
Стронций	Sr	$2,2 \cdot 10^{21}$	Селен	Se	$3 \cdot 10^{18}$
Бром	Br	$2 \cdot 10^{21}$	Бериллий	Be	$3 \cdot 10^{18}$
Алюминий	Al	$1 \cdot 10^{21}$	Ванадий	V	$8 \cdot 10^{17}$
Медь	Cu	$7 \cdot 10^{20}$	Уран	U	$2 \cdot 10^{17}$
Свинец	Pb	$3 \cdot 10^{20}$	Радий	Ra	$8 \cdot 10^{10}$
Всего				$6,71 \cdot 10^{27}$	

2. МОЛЕКУЛЯРНЫЙ СОСТАВ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ

Так же, как и по атомному составу, по содержанию основных классов молекул различные организмы не сильно отличаются друг от друга. Соматические атомы обычно присутствуют в комбинированной форме в виде ионов или молекул, а не отдельных атомов. Молекулы, представляющие особый интерес для наномедицины, объединены в клетки или свободно циркулируют в плазме крови или внутритканевой жидкости. В таблице 2 представлено основное молекулярное содержание типичной клетки человека, из которого по подсчету молекул 99,5% составляют вода и соли, и которое включает около 5000 различных типов молекул. Тело человека состоит из $\sim 10^5$ различных молекулярных компонент, в большинстве – белков (протеинов). К 1998 году, по крайней мере, $\sim 10^4$ белков были упорядочены, $\sim 10^3$ были отображены пространственно и около 7000 структур (включая протеины, пептиды, вирусы, протеино-нуклеиновые кислотные комплексы, нуклеиновые кислоты и углеводы) зарегистрировано в Белковом банке данных, который в настоящее время располагается в Национальной лаборатории в Брукхэвене (Brookhaven). Учитывая настоящую скорость развития технологий, вероятно последовательности и трехмерные или четырехмерные структуры всех белков человека будут известны во втором десятилетии 21 века.

Молекулярный состав типичной живой клетки приведен в таблице 2.

Таблица 2
Оценка макромолекулярного состава типичной клетки человека размером 20 мкм

Молекула	Масса, %	Молекулярный вес (Дальтоны)	Число молекул	% Молекул	Число видов молекул
Вода	65	18	$1,74 \cdot 10^{14}$	98,73	1
Др. неорганические вещества	1,5	55	$1,31 \cdot 10^{12}$	0,74	20
Липиды	12	700	$8,4 \cdot 10^{11}$	0,475	50
Др. органические вещества	0,4	250	$7,7 \cdot 10^{10}$	0,044	200
Белки	2	50000	$1,9 \cdot 10^{10}$	0,011	5000
РНК	1,0	10^6	$5 \cdot 10^7$	$3 \cdot 10^{-5}$	-
ДНК	0,1	10^{11}	46	$3 \cdot 10^{-11}$	-
Всего	100	-	$1,76 \cdot 10^{14}$	100	-

* Дальтон (Да) - принятая в биологии единица массы, практически равная массе атома водорода (т.е. 1.0000 по шкале атомных масс).

2.1. ВОДА

Вода - это самое распространенное соединение в живых организмах. Она заполняет клетки и межклеточные пространства и представляет собой ту среду, в которой осуществляются диффузия веществ, химические реакции и взаимодействия макромолекул (белков и нуклеиновых кислот) друг с другом. Кроме того, вода сама непосредственно участвует во многих химических реакциях клетки. Два свойства воды – *способность образовывать водородные связи и обратимая ионизация* - оказываются весьма существенными для протекания внутриклеточных процессов.

Строение молекулы воды

Что же представляет собой идеальная «чистая» вода с физической точки зрения? Как и большинство веществ, вода состоит из молекул, а последние из атомов. Структура атома следующая: вокруг положительно заряженного протонного ядра на определенных уровнях по различным орбитам движутся отрицательно заряженные электроны, образующие электронное облако. Число электронов в каждой оболочке для атома каждого элемента строго определенное. Так, у атома водорода лишь одна оболочка с единственным электроном, а у атома кислорода – две оболочки: внутренняя с двумя электронами и внешняя с шестью. *Образование молекулы воды из двух атомов водорода и одного атома кислорода*

показано на рис. 3. два атома водорода замещают вакансию двух недостающих (до восьми) электронов наружной оболочки для ее устойчивости.

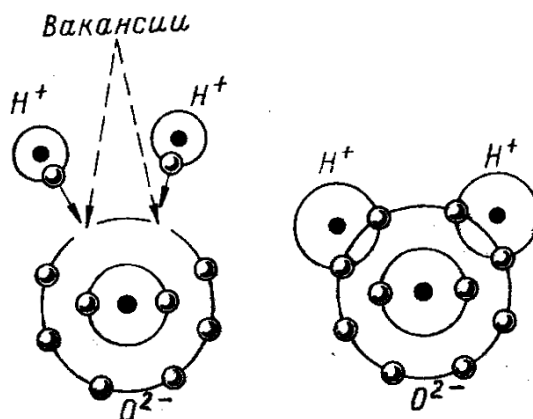


Рис. 2

Можно было бы предполагать, что атом кислорода и два атома водорода в молекуле воды образуют у центрального атома кислорода угол, близкий к 180° . Однако в действительности он значительно меньше – всего $104^\circ 27'$ (рис. 3), что приводит к неполной компенсации внутримолекулярных сил, избыток которых обуславливает асимметрию распределения зарядов, создающую полярность молекулы воды.

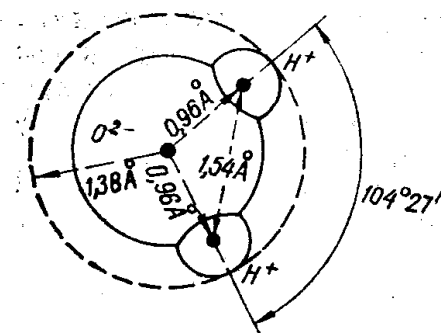


Рис. 3

Атомы кислорода и водорода обладают разным сродством к электрону (электроотрицательностью), и, хотя молекула воды в целом электрически нейтральна, на кислороде локализуется частичный отрицательный, а на атомах водорода - частично положительный заряды. Благодаря такому пространственному разделению зарядов соседние молекулы могут электростатически притягиваться друг к другу. Такой тип электростатического притяжения между частичными зарядами электронейтральных молекул называется ВОДОРОДНОЙ СВЯЗЬЮ, поскольку два электроотрицательных атома оказываются связаны через атом водорода (рис.4). Водородные связи характерны не только для воды. Как будет описано далее, белки и нуклеиновые кислоты содержат большое число внутримолекулярных водородных связей, которые играют важную роль в организации структуры и функционировании этих макромолекул.

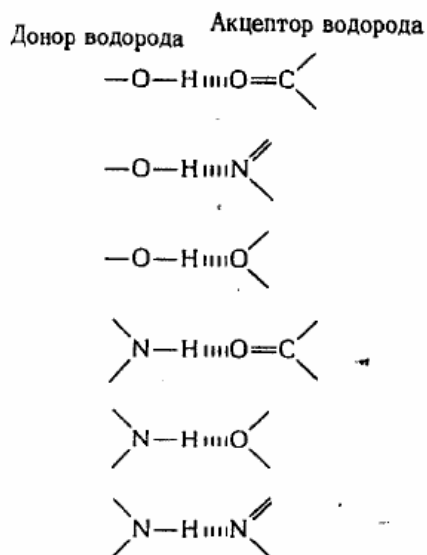


Рис. 4. Водородные связи. В связях этого типа атом водорода неравномерно распределен между двумя электроотрицательными атомами: атом, с которым водород связан ковалентно, служит донором водорода, а электроотрицательный атом другой молекулы – акцептором. В биологических системах электроотрицательными атомами водородных связей служат кислород, азот и иногда углерод.

Длина водородной связи варьирует от 0,26 до 0,31 нм

Водородные связи намного слабее ковалентных. Энергия водородных связей в жидкой воде (т.е. энергия, необходимая для разрушения одной связи) составляет примерно 18,8 кДж/моль, тогда как энергия ковалентных связей Н-О в молекулах воды равна 460 кДж/моль. Молекулы в жидкой воде находятся в непрерывном тепловом движении, поэтому образующиеся водородные связи постоянно и быстро разрываются и вновь восстанавливаются. Среднее время жизни водородной связи при комнатной температуре не превышает $1,57 \cdot 10^{-9}$ с. Каждая молекула воды в принципе может образовывать водородные связи максимально с четырьмя соседними молекулами, однако при комнатной температуре в любой данный момент каждая молекула воды образует водородные связи в среднем с 3,4 других молекул.

Многочисленные схемы строения молекулы воды являются гипотетическими, построенными на косвенных наблюдениях приборами некоторых признаков поведения и свойств молекул и атомов. При этом следует помнить, что ни атомы, ни молекулы не имеют четких границ из-за неопределенности как формы, так и точных размеров орбит, по которым движутся электроны, образующие по сути дела электронное облако, зависящее от энергетического состояния электрона (рис. 5). Последнее может быть спокойным или возбужденным, что зависит, в частности, и от температуры. Отсюда разноречивость в значениях вычисленных радиусов, а также схематичность гипотетических моделей атомов и молекул (см. рис. 2, 3, 5).

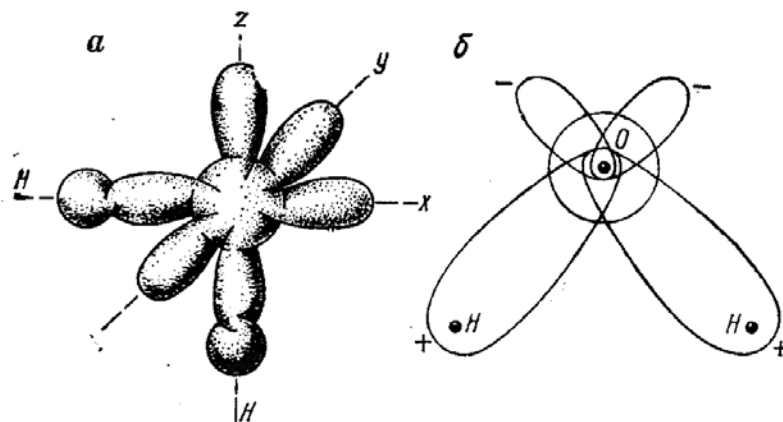


Рис. 5. Гипотетические модели молекулы воды.

а – электроны не сосредоточены в одной точке, а размазываются по орбите, которая соответствует не линии, а оболочке в форме электронного облака (орбиты электронов двух атомов, водорода шарообразны; орбиты двух внутренних электронов атомов кислорода шарообразны, а наружных представлены в форме объемных восьмерок, направленных по трем ординатным осям); б – орбиты двух атомов водорода сильно вытянуты.

Изотопные разновидности воды

Атомы водорода и кислорода, образующие воду, или окись водорода, могут иметь различные массовые числа и отличаться друг от друга своими физико-химическими свойствами, но при этом они имеют одинаковый электрический заряд атомных ядер и поэтому занимают в периодической системе элементов одно и то же место. Такие разновидности атомов одного и того же химического элемента называются изотопами. Известны пять водородов и пять кислорода. Правда, по два из них (^4H , ^5H , ^{14}O и ^{15}O) радиоактивны и очень короткоживущи. Например, длительность существования водорода ^4H – $4 \cdot 10^{-11}$ с. Такие короткоживущие изотопы из нашего рассмотрения исключены.

Итак, наиболее широко известны следующие изотопы водорода: протий ^1H (с относительной атомной массой 1), дейтерий ^2H или D (с относительной атомной массой 2) и тритий ^3H или T (с относительной атомной массой 3), наиболее тяжелый, но слаборадиоактивный водород (его период полураспада 12,3 года), и изотопы кислорода: ^{16}O , ^{17}O и ^{18}O . Эти шесть изотопов могут образовывать 18 изотопических разновидностей воды: $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$; $^1\text{HD}^{16}\text{O}$; D_2^{16}O ; $^1\text{HT}^{16}\text{O}$; DT^{16}O ; T_2^{16}O ; $^1\text{H}_2^{17}\text{O}$; $^1\text{HD}^{17}\text{O}$; D_2^{17}O ; $^1\text{HT}^{17}\text{O}$; DT^{17}O ; T_2^{17}O ; $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$; $^1\text{HD}^{18}\text{O}$; D_2^{18}O ; $^1\text{HT}^{18}\text{O}$; DT^{18}O ; T_2^{18}O .

		изотопы кислорода					
		^{16}O		^{17}O		^{18}O	
изотопы водорода	^1H протий	$^1\text{H}_2^{16}\text{O}$	$^1\text{HD}^{16}\text{O}$	$^1\text{H}_2^{17}\text{O}$	$^1\text{HD}^{17}\text{O}$	$^1\text{H}_2^{18}\text{O}$	$^1\text{HD}^{18}\text{O}$
	$^2\text{H}=\text{D}$ дейтерий	D_2^{16}O	$^1\text{HT}^{16}\text{O}$	D_2^{17}O	$^1\text{HT}^{17}\text{O}$	D_2^{18}O	$^1\text{HT}^{18}\text{O}$
	$^3\text{H}=\text{T}$ тритий	T_2^{16}O	DT^{16}O	T_2^{17}O	DT^{17}O	T_2^{18}O	DT^{18}O

Тритий и кислород-17 обнаружены в природных водах только в виде следов, а дейтерий и кислород-18 – в ощутимых количествах, которые мы приводим в табл. 3.

Таблица 3

Изотопный состав природной воды

Молекула воды	Содержание % от всей воды
$^1\text{H}_2^{16}\text{O}$	99,73
$^1\text{H}_2^{18}\text{O}$	0,2
$^1\text{H}_2^{17}\text{O}$	0,04
$^1\text{HD}^{16}\text{O}$	0,02
$^1\text{HD}^{18}\text{O}$	0,00006
$^1\text{HD}^{17}\text{O}$	0,00001
D_2^{16}O	0,000003
D_2^{18}O	0,000000009
D_2^{17}O	0,000000001

Объединив и осреднив изотопные составные природной воды, можем сказать, следующее: в земных водах содержатся «легкой» воды – 99,75, тяжелой кислородной – 0,18 и тяжелой водородной – 0,017%.

Все соединения водорода с кислородом, а также водород и кислород отдельно, как эмпирически установлено, составляют родственные и изменчивые структурные частицы, могущие переходить при некоторых условиях одна в другую и обратно, ионизироваться и рекомбинироваться. Например (отбрасывая изотопические разновидности водорода и кислорода, приведенные выше), можно назвать следующие соединения: легкая вода H_2O , перекись водорода H_2O_2 , перигидроксил HO_2 , заряженная молекула легкой воды H_2O^+ , гидрооксоний H_3O^+ , гидратированный электрон e_{aq}^- возбужденная молекула воды –экситон H_2O^- , гидроксил OH^- , гидроксил-моногидрат H_3O_2 , ион кислорода O^- , ион водорода H^+ , поливодород H_2O_3 и гиперводород H_2O_4 .

Чистая вода в любых агрегатных состояниях представляет собой еще не расшифрованную, чрезвычайно гибкую, изменчивую равновесную структурную смесь пара, льда и жидкости, зависящую от малейших изменений давления, температуры и разнообразных энергетических полей.

Биполярный характер молекулы воды делает ее значительно лучшим растворителем, чем большинство других общеизвестных жидкостей. В воде растворяются очень многие вещества, причем растворимость некоторых веществ определяется способностью воды образовывать водородные связи с гидроксильными и карбоксильными группами других молекул. Кроме того, высокое межмолекулярное сцепление в воде, обусловленное образованием водородных связей, имеет следствием аномально высокие по сравнению с большинством других жидкостей удельную теплоемкость и теплоту испарения воды. Эти особенности воды важны для поддержания постоянства внутренней температуры живыми организмами. При изменении температуры внешней среды в клетке происходит поглощение или выделение тепла благодаря разрыву или новообразованию водородных связей между молекулами воды. Таким образом, колебания температуры внутри клетки, несмотря на резкие ее изменения во внешней среде, ослабляются; вода выступает в роли термостата. Благодаря высокой теплоте испарения организмы могут эффективно защищаться от перегрева, поскольку на испарение 1 г воды с поверхности листа или в виде пота с поверхности кожи расходуется 2,26 кДж тепловой энергии.

Хотя молекулы воды обладают лишь слабо выраженной способностью к обратимой ионизации, образуя при этом ионы гидрооксония (H_3O^+) и гидроксила (OH^-) играют исключительно важную роль в биологических процессах. Поскольку молярная концентрация иона гидрооксония мала, ее принято выражать через величину ее отрицательного десятичного логарифма, который обозначается символом рН:

$$\text{pH} = -\lg([\text{H}_3\text{O}^+]).$$

От величины рН очень сильно зависят структура, растворимость и биологическая активность макромолекул.

2.2. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ИОНЫ

Из неорганических веществ клетки большая часть находится в виде солей – либо диссоциированных на ионы, либо в твердом состоянии. Среди первых большое значение имеют катионы K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} которые обеспечивают такое важнейшее свойство живых организмов, как раздражимость. Концентрации катионов и анионов в клетке и в среде ее обитания, как правило, сильно отличаются. Например, внутри животной клетки концентрация калия равна 140 мМ, а натрия - от 5 до 15 мМ, тогда как в межклеточной или внешней среде мало калия (5 мМ) и довольно высокая концентрация натрия (145 мМ). Как будет видно из дальнейшего изложения, это различие в концентрации ионов между клеткой и средой выполняет специальную функцию создания разности потенциалов на плазматической мембране и, пока клетка жива, активно поддерживается. После смерти клетки содержание ионов в клетке и среде быстро выравнивается.

От солей в значительной мере зависят поступление воды в клетку и буферные свойства клеток и тканей. Клеточные мембраны проницаемы для молекул воды и непроницаемы для крупных молекул и ионов. Если в среде содержание воды более высокое, чем в клетке, то выравнивание концентрации воды между клеткой и средой происходит путем проникновения воды из среды в клетку. На этом свойстве, например, основано всасывание воды корнями растений.

У всех живых организмов внутриклеточные и межклеточные жидкости имеют характерную и постоянную величину рН, которая поддерживается с помощью буферных систем, состоящих из слабой кислоты (донор протона) и сопряженного с ней основания (акцептор протона). **Буферностью** называют способность клетки поддерживать слабощелочную реакцию своего содержимого на постоянном уровне. Буферные растворы характеризуются тем, что внесение в них или образование в процессе обмена веществ небольших количеств кислоты или щелочи не оказывает влияния на значения рН вследствие образования соединений с карбонатами, фосфатами или органическими молекулами. **Две наиболее важные буферные системы - это фосфатная и бикарбонатная системы.**

Донором протона в фосфатной буферной системе служит ион H_2PO_4^- , а акцептором протона – ион HPO_4^{2-} . Эта система обладает максимальной эффективностью вблизи рН 6,86, способна сопротивляться изменениям рН в интервале 6,1 – 7,7 и обеспечивает достаточную буферную емкость внутриклеточной жидкости. Донором протона в бикарбонатной буферной системе служит угольная кислота H_2CO_3 , а акцептором протона – ион HCO_3^- . Особенностью этой системы является то, что угольная кислота образуется в результате обратимой гидратации растворенной двуокиси углерода, которая в свою очередь находится. Поэтому величина рН бикарбонатного буфера зависит от парциального давления CO_2 в газовой фазе. Бикарбонатная система служит главной буферной системой плазмы крови и эффективно функционирует вблизи рН 7,4. **Внутри клетки буферность обеспечивается главным образом**

анионами H_2PO_4^- . Во внеклеточной жидкости и в крови роль буфера играют H_2CO_3^- и HCO_3^{2-} .

Некоторые неорганические ионы (например, Ca^{2+} и Mg^{2+}) участвуют в регуляции каталитической способности многих белков-ферментов, связываясь с ними и тем самым активируя, другие (такие как Cu^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+}) сами входят в состав реакционного центра некоторых ферментов. Ион Ca^{2+} играет важную роль в проведении нервного импульса и мышечном сокращении, а неорганический фосфат является необходимым компонентом внутриклеточной АТФ-зависимой системы переноса энергии. Неорганические соли содержатся в клетке не только в растворенном, но и в твердом состоянии, выполняя структурную функцию. В частности, прочность и твердость костной ткани и раковинам моллюсков придает нерастворимый гидроксиапатит, состав которого можно приблизительно описать формулой $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]_3$.

2.3. УГЛЕВОДЫ

Углеводы, или сахараиды, – органические вещества с общей формулой $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_m$. У большинства углеводов число молекул воды соответствует количеству атомов углерода. На долю углеводов приходится до 80% сухого вещества некоторых растительных тканей и до 20% некоторых животных тканей. В животной клетке углеводы находятся в количествах, не превышающих 1–2, иногда 5%. Наиболее богаты углеводами растительные клетки, где их содержание в некоторых случаях достигает 90% сухой массы (клубни картофеля, семена и т.д.). Углеводы бывают простыми и сложными.

Простейшими углеводами, встречающимися в живых организмах, являются моносахариды, имеющие общую формулу $(\text{CH}_2\text{O})_n$, где $n=3-7$. В зависимости от числа атомов углерода в молекуле моносахариды называют триозами – 3 атома, тетрозами – 4, пентозами – 5 или гексозами – 6 атомов углерода. Из шестиуглеродных моносахаридов – гексоз – наиболее важны глюкоза, фруктоза и галактоза. Глюкоза содержится в крови (0,08— 0,12%). Пентозы – рибоза и дезоксирибоза – входят в состав нуклеиновых кислот и АТФ.

Практически все природные моносахариды, так же как и аминокислоты, могут существовать в D-форме и в L-форме, но, в отличие от аминокислот, почти все моносахариды живых организмов относятся к D-ряду. Моносахариды, содержащие 5 и более атомов углерода, в растворах существуют в виде замкнутых циклических структур (рис. 6). Основными моносахаридами живых организмов являются D-глюкоза, D-фруктоза, D-рибоза (входит в состав РНК) и 2-дезокси-D-рибоза (входит в состав ДНК).

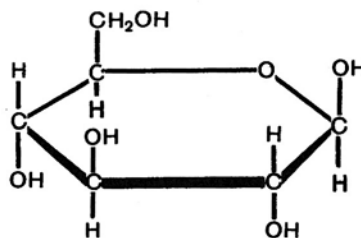


Рис. 6

Моносахариды могут соединяться друг с другом, образуя ГЛИКОЗИДНУЮ СВЯЗЬ, которая образуется между гидроксильной группой одного моносахарида и альдегидной группой или кетогруппой другого моносахарида. При этом отщепляется молекула воды, и

образуется *дисахарид* (рис. 6). Присоединение аналогичным путем дополнительных моносахаридов приводит к образованию *олигосахаридов* все возрастающей длины (*трисахаридов, тетрасахаридов* и т.д.) вплоть до очень больших молекул *полисахаридов*, содержащих сотни и тысячи моносахаридных остатков. Поскольку у каждого моносахарида имеется несколько свободных гидроксильных групп, способных образовывать связь с другим моносахаридом или каким-либо иным соединением, число возможных структур полисахаридов исключительно велико. Даже простейший дисахарид из двух остатков глюкозы может быть образован 11-ю различными гликозидными связями, а три различные гексозы (например, глюкоза, фруктоза и галактоза), соединяясь между собой, способны образовать несколько тысяч различных трисахаридов.

В живых организмах углеводы выполняют структурную, энергетическую и специальные функции. Основными структурными полисахаридами служат: у растений - *целлюлоза и пектины*, а у животных и грибов - *хитин*.

Целлюлоза - самое распространенное органическое соединение на Земле, поскольку из нее построены клеточные стенки растений. В частности, древесина и хлопок почти целиком состоят из целлюлозы. В день на каждого живущего на Земле человека растения синтезируют примерно 50 кг целлюлозы. Целлюлоза - прочное, волокнистое, водонерастворимое вещество, каждая молекула которого состоит из 104 и более остатков D-глюкозы, соединенных в неразветвленную цепь посредством *b-1,4-гликозидных* связей. Полимерные цепи целлюлозы сильно вытянуты и соединены друг с другом водородными связями.

Хитин, как и целлюлоза, - линейный неразветвленный полисахарид, однако структурными единицами его служит не D-глюкоза, а *N-ацетил-D-глюкозамин*. Из хитина построены прочные нерастворимые покровы ракообразных и насекомых, а также клеточные стенки грибов. Хитиновый каркас многих ракообразных усилен за счет включений карбоната кальция.

Углеводы служат главным оперативным источником энергии в клетках. В результате последовательного ряда реакций окисления глюкоза и другие моносахариды распадаются до CO_2 и H_2O и высвобождающаяся при этом химическая энергия используется клеткой. Для запасаания энергии впрок используются полисахариды, построенные из повторяющихся остатков глюкозы, - *крахмал* (у растений) и *гликоген* (у животных). Когда необходима энергия, молекулы глюкозы отщепляются от крахмала или гликогена, а при избытке глюкозы ее молекулы присоединяются к полимерным цепям крахмала или гликогена и удлиняют их. Таким образом, резервные полисахариды все время меняют свой размер в зависимости от потребности организма в энергии.

Крахмал представляет собой смесь двух полимеров D-глюкозы - *a-амилозы* и *амилопектина*. *a-амилоза* состоит из длинных неразветвленных цепей $n \approx 10^8$ с молекулярной массой от нескольких тысяч до $57 \cdot 10^5$, построенных из остатков D-глюкозы, соединенных *a-1,4-гликозидными* связями. Амилопектин также имеет высокую молекулярную массу, но, в отличие от *a-амилозы*, его молекулы сильно разветвлены. В неразветвленных участках амилопектина остатки D-глюкозы соединены *a-1,4-гликозидными* связями, а в местах ветвления - *a-1,6-гликозидными* связями.

Гликоген - сильно разветвленный полисахарид, так же, как и амилопектин, состоящий из остатков D-глюкозы, связанных *a-1,4-гликозидными* связями, а в местах ветвления - *a-1,6-гликозидными* связями. Больше всего гликогена содержится в клетках печени, где на его долю приходится до 7% общего веса органа. В клетках печени гликоген присутствует в виде крупных гранул, состоящих в свою очередь из меньших гранул, каждая из которых образована одной сильно разветвленной молекулой со средней молекулярной массой в несколько миллионов. С этими гранулами прочно связаны ферменты, ответственные за синтез и распад гликогена.

К полисахаридам со специальными функциями относятся очень сложные соединения, биохимические функции которых не всегда известны точно, например, *камеди* и *слизи*. Кроме того, углеводы могут ковалентно связываться с белками и липидами, образуя *гликопротеины* и *гликолипиды*. Как правило, такие гибридные молекулы входят в состав оболочек клеток, и их олигосахаридная часть участвует в процессах межклеточного узнавания и рецепции сигнальных молекул. Жесткость олигосахаридных структур, их растворимость в воде и огромное разнообразие возможных конфигураций делают их наиболее подходящими для выполнения этих функций. Гликопротеины, в которых на долю полисахарида приходится основная часть молекулы - более 95%, называются *протеогликаны*. Они входят в состав основного вещества, заполняющего пространство между клетками в большинстве тканей, а у бактерий служат структурной основой клеточных стенок.

2.4. ЛИПИДЫ

Жиры (липиды) представляют собой соединения высокомолекулярных жирных кислот и трехатомного спирта глицерина. Жиры не растворяются в воде, они гидрофобны (от греч. *hydor* — вода и *phobos* — страх). В клетках всегда есть и другие сложные гидрофобные жироподобные вещества, называемые *липоидами*.

Содержание жира в клетке колеблется в пределах 5–15% от массы сухого вещества. В клетках жировой ткани количество жира возрастает до 90%. Накапливаясь в клетках жировой ткани животных, в семенах и плодах растений, жир служит запасным источником энергии.

К липидам относятся продукты взаимодействия жирных кислот со спиртами (*простые липиды*), аминокспиртами и др. соединениями (*сложные липиды*), *простагландины* и *изопреноидные липиды* (например, каротиноиды, хлорофилл, витамины Е и К).

Триацилглицеролы - простые липиды, представляющие собой эфиры трехосновного спирта глицерола и трех жирных кислот (рис. 7). Они бывают различных типов в зависимости от природы трех остатков жирных кислот, присоединенных к гидроксильным группам глицерина. Большинство природных жиров и масел представляют собой сложные смеси триацилглицеролов, в состав которых входят жирные кислоты, различающиеся как по длине цепи, так и по степени насыщенности связей. Триацилглицеролы, содержащие остатки только насыщенных жирных кислот, при комнатной температуре имеют консистенцию твердого вещества, а триацилглицеролы с высоким содержанием ненасыщенных жирных кислот - жидкие при комнатной температуре.

Основная функция триацилглицеролов в живых организмах - это запасание энергии. Для этого они накапливаются в цитозоле клеток запасующих тканей (например, подкожной клетчатки) в виде мелкодисперсной эмульсии масляных капелек и могут занимать почти весь объем запасующей клетки. В расчете на единицу веса триацилглицеролы запасают вдвое больше энергии, чем углеводы, и, накапливаясь в больших количествах, могут обеспечивать энергетический обмен организма в течение нескольких недель, тогда как в форме гликогена организм может запастись энергией не более чем на сутки. Однако энергия, запасенная в углеводах, становится доступна для использования организмом быстрее, чем запасенная в форме триацилглицеролов. Поэтому полисахариды (крахмал и гликоген) и жиры (триацилглицеролы) работают как оперативная и долговременная системы запасания энергии соответственно. Дополнительно триацилглицеролы могут служить для теплоизоляции и как источник воды: при окислении триацилглицеролов образуется вдвое больше воды, чем из углеводов, и это используется пустынными животными, а толстый подкожный слой жировой клетчатки надежно защищает тюленей, моржей, пингвинов и других полярных теплокровных животных от холода.

Воска - простые липиды, представляющие собой эфиры, образованные насыщенными или ненасыщенными жирными кислотами (с числом углеродных атомов от 14 до 36) и длинноцепочечными спиртами (с числом углеродных атомов от 16 до 22) (рис. 6). У позвоночных секретируемые кожными железами воска выполняют функцию защитного покрытия, смазывающего и смягчающего кожу и предохраняющего ее от воды. У водоплавающих птиц выделяемые копчиковой железой воска придают перьевому покрову водоотталкивающие свойства. Примерами животных восков служат также пчелиный воск и спермацет, содержащийся в черепной полости кашалота. Листья многих субтропических растений тоже покрыты защитным слоем воска, который препятствует избыточной транспирации в условиях засушливого климата.

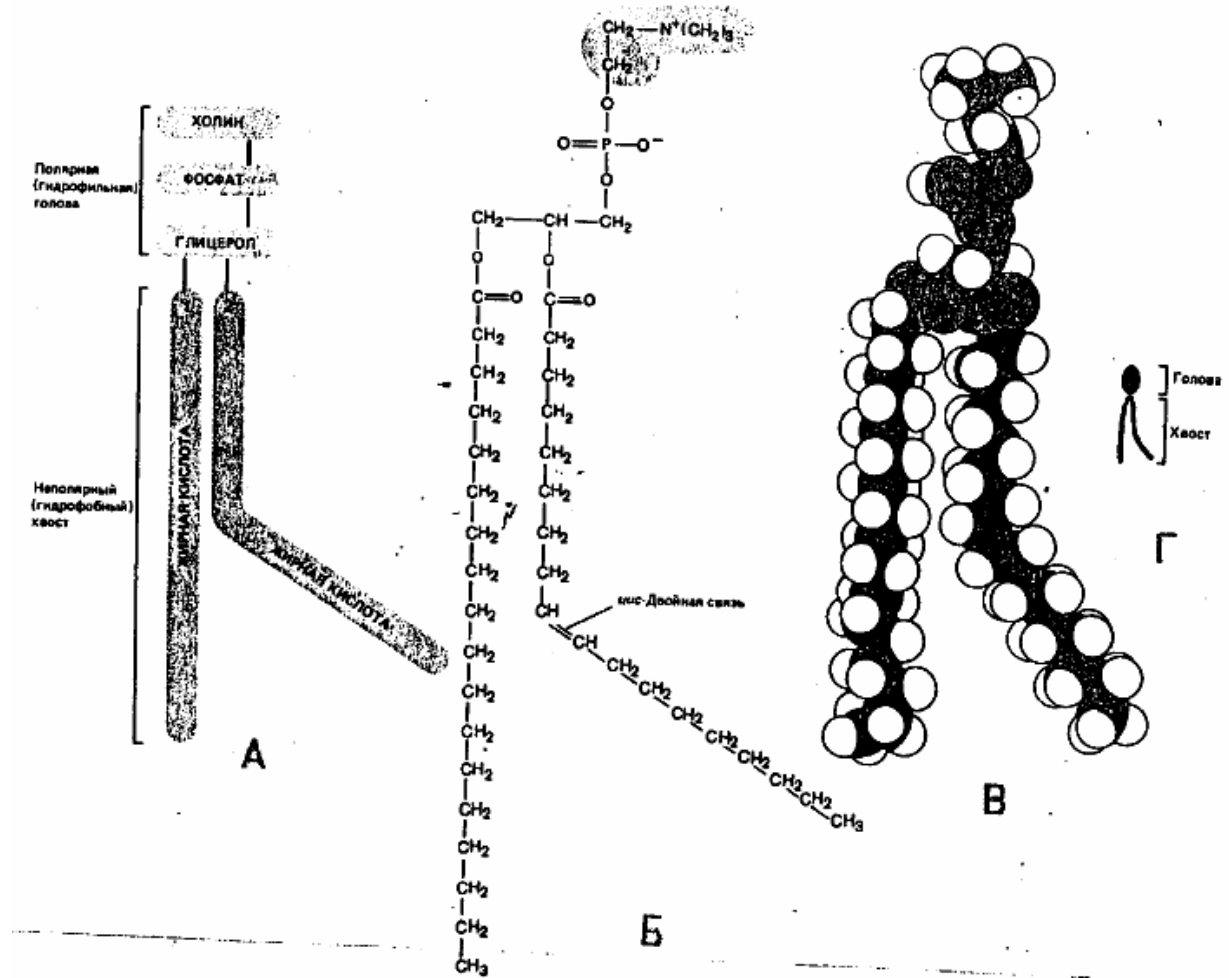


Рис. 7

Фосфолипиды - сложные липиды, похожие на триацилглицеролы наличием жирных кислот, связанных с глицеролом. Однако в фосфолипидах глицерол связан не с тремя, а лишь с двумя цепями жирных кислот, а оставшееся свободное место в молекуле глицерола занимает фосфатная группа, которая в свою очередь соединена с молекулой полярного спирта, различного для разных фосфолипидов (рис. 7). Полярный спирт образует как бы "голову" молекулы фосфолипида, к которой через глицерол присоединены два неполярных "хвоста".

Сфинголипиды - сложные липиды, которые тоже имеют полярную "голову" и два неполярных "хвоста", один из которых является остатком длинноцепочечной жирной

кислоты, а другой - остатком длинноцепочечного аминоспирта *сфингозина* (или его производного). Из фосфолипидов и сфинголипидов построены все клеточные мембраны.

2.5. РАЗНООБРАЗИЕ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ НА АТОМНОМ И МОЛЕКУЛЯРНОМ УРОВНЯХ

Подводя итог краткому рассмотрению химического строения живых организмов, можно сделать вывод, что колоссальное разнообразие живых организмов, наблюдающееся в природе, определяется не атомным, а молекулярным разнообразием, которое носит в основном *комбинаторный характер*. Действительно, тысячи разнообразных больших и сложных молекул, входящих в состав живых организмов, построены лишь из 30 основных простых органических молекул, играющих роль строительных блоков: 20 L-аминокислот, 5 азотистых оснований (урацил, тимин, цитозин, аденин и гуанин), 2 сахара (D-глюкоза и D-рибоза), 1 азотсодержащий спирт (холин), 1 6-атомная насыщенная жирная кислота (пальмитиновая) и 1 3-атомный спирт (глицерол). При этом в случае нерегулярных полимеров (белки и нуклеиновые кислоты) их разнообразие определяется разнообразием чередования нескольких типов мономеров, а в случае регулярных полимеров (полисахариды) - разнообразием химических связей между однотипными мономерами.

Огромное разнообразие биологических молекул предопределяет еще более значительное разнообразие взаимодействий между ними. Такое разнообразие имеет тенденцию к взрывному росту из-за образования все новых объектов в результате взаимодействия уже существующих, и, следовательно, комбинаторный принцип строения основных биологических веществ представляется совершенно необходимым для эволюции живых организмов, поскольку, вероятно, только таким образом может эффективно возникать новый материал для отбора.

Литература

<http://bio.fizteh.ru/>

<http://www.nanomedicine.com>

Дерпгольц. Мир воды

БСЭ