

О.В. Мосин

ВСЁ О ДЕЙТЕРИИ И ТЯЖЁЛОЙ ВОДЕ

Тяжёлая вода (*оксид дейтерия*) — обычно этот термин применяется для обозначения тяжёловодородной воды. Тяжёловодородная вода имеет ту же химическую формулу, что и обычная вода, но вместо атомов водорода содержит два тяжёлых изотопа водорода — атомы дейтерия. Формула тяжёловодородной воды обычно записывается как: D_2O или 2H_2O . Внешне тяжёлая вода выглядит как обычная — бесцветная жидкость без вкуса и запаха.

Молекулы тяжёловодородной воды были впервые обнаружены в природной воде Гарольдом Юри в 1932 году. А уже в 1933 году Гильберт Льюис получил чистую тяжёловодородную воду.

Свойства тяжёлой воды

Молекулярная масса	20,03
Температура плавления	3,81°C
Температура кипения	101,43°C
Растворимость	Мало растворима в диэтиловом эфире смешивается с этанолом
Плотность ρ	1,1042 г/см ³ (при 25°C)
Давление паров	10 мм.рт.ст (при 13.1°C), 100 мм.рт.ст.(при 54°C)
Показатель преломления σ	1,32844 (при 20°C)
Стандартная энтальпия образования ΔH	-294,6 кДж/моль (ж) (при 298 К)
Стандартная энергия Гиббса G	-243,48 кДж/моль (ж) (при 298 К)
Стандартная энтропия образования S	75,9 Дж/моль·К (ж) (при 298 К)
Стандартная мольная теплоёмкость C_p	84,3 Дж/моль·К (жг) (при 298 К)
Энтальпия плавления $\Delta H_{пл}$	5,301 кДж/моль
Энтальпия кипения $\Delta H_{кип}$	45,4 кДж/моль
Критическое давление	31,86 МПа
Критическая плотность	0,363 г/см ³

В природных водах соотношение между тяжёлой и обычной водой составляет 1:5500 (в

предположении, что весь дейтерий находится в виде тяжёлой воды D_2O , хотя на самом деле он частично находится в составе полутяжёлой воды, см. ниже).

Тяжёлая вода токсична лишь в слабой степени, химические реакции в её среде проходят несколько медленнее, по сравнению с обычной водой, водородные связи с участием дейтерия несколько сильнее обычных. Эксперименты над млекопитающими показали, что замещение 25% водорода в тканях дейтерием приводит к стерильности, более высокие концентрации приводят к быстрой гибели животного. Однако некоторые микроорганизмы способны жить в 70% растворе D_2O в H_2O) (простейшие) и даже в чистой тяжёлой воде (бактерии). Человек может без видимого вреда для здоровья выпить стакан тяжёлой воды, весь дейтерий будет выведен из организма через несколько дней. Таким образом, тяжёлая вода менее токсична, чем, например, поваренная соль.

Тяжёлая вода накапливается в остатке электролита при многократном электролизе воды. На открытом воздухе тяжёлая вода быстро поглощает пары обычной воды, поэтому можно сказать, что она гигроскопична. Производство тяжёлой воды очень энергоёмко, поэтому её стоимость довольно высока (ориентировочно 200-250 долларов за кг).

Важнейшим свойством тяжёловодородной воды является то, что она практически не поглощает нейтроны, поэтому используется в ядерных реакторах для торможения нейтронов и в качестве теплоносителя. Она используется также в качестве изотопного индикатора в химии и биологии. В физике элементарных частиц тяжёлая вода используется для детектирования нейтрино; так, крупнейший детектор солнечных нейтрино SNO (Канада) содержит 1 килотонну тяжёлой воды.

Выделяют также **полутяжёлую** (или дейтериевую) воду, у которой только один атом водорода замещен дейтерием. Формулу такой воды записывают так: DHO или 2HNO .

Термин **тяжёлая вода** применяют также по отношению к воде, у которой любой из атомов заменен тяжёлым изотопом:

- к тяжёлокислородной воде (в ней лёгкий изотоп кислорода ^{16}O замещен тяжёлыми изотопами ^{17}O или ^{18}O),
- к тритиевой и сверхтяжёлой воде (содержащей вместо атомов 1H его радиоактивный изотоп тритий 3H).

Если подсчитать все возможные различные соединения с общей формулой H_2O , то общее количество возможных «тяжёлых вод» достигнет 48. Из них 39 вариантов —

радиоактивные, а стабильных вариантов всего девять:
 $H_2^{16}O$, $H_2^{17}O$, $H_2^{18}O$, $HD^{16}O$, $HD^{17}O$, $HD^{18}O$, $D_2^{16}O$, $D_2^{17}O$, $D_2^{18}O$.
 На сегодняшний день в лабораториях получены не все варианты тяжёлой воды

СВОЙСТВА ТЯЖЁЛОЙ ВОДЫ

ТЯЖЁЛАЯ ВОДА по химическому составу представляет собой оксид дейтерия D_2O с кислородом природного изотопного состава; молекулярная масса тяжёлой воды 20,02760; это бесцветная жидкость без запаха и вкуса. Оксид водорода природного изотопного состава с тяжелым изотопом кислорода ^{18}O называется тяжелоокислородной водой, молярная масса 20,0157. Оксид протодейтерия HDO имеет мол. м. 19,02140. В смесях D_2O с H_2O с большой скоростью протекает $D_2O + D_2O \rightleftharpoons 2HDO$ с константой равновесия K , близкой к 4,0 при 300-400 К. Поэтому дейтерий при малом содержании присутствует в воде почти целиком в форме HDO , а при высоком - в форме D_2O .

В поверхностных водах отношение $D/(H+D)=(1,32-1,51) \cdot 10^{-4}$, в прибрежной морской воде $D/(H + D) = (1,55 - 1,56) \cdot 10^{-4}$, по международному стандарту воды SMOW (Standard Marine Ordinary Water) $D/H= 1,5576 \cdot 10^{-4}$. Для природных вод СНГ чаще всего характерны отрицательные отклонения от SMOW на $(1,0 - 1,5) \cdot 10^{-5}$, в отдельных случаях до $(6,0-6,7) \cdot 10^{-5}$, но встречаются и положительные отклонения до $2,0 \cdot 10^{-5}$. В условном пересчете на D_2O (в природной воде дейтерия содержится в форме HDO) природное содержание тяжёлой воды 0,0145 - 0,0146 мол. %.

СВОЙСТВА. Для тяжёлой воды температура кипения 101,44 °С, т.пл. 3,823 °С; $t_{крит}$ 643,89 К, $p_{крит}$ 21,66 МПа, критич. молярный объем 56,1 см³; $DH_{исп}^0$ 45,391 кДж/моль, $DH_{пл}^0$ 6,01 кДж/моль; плотн. при 20 °С 1,10539 г/см³, приведенная к воде 1,10735, макс. плотн. 1,10602 г/см³ при 11,24 °С; скорость звука в Т. в. 1386 м/с (20 °С); 67,8 мН/м (20 °С).

Кристаллы D_2O имеют такую же структуру, как и кристаллы обычного льда, различие в размерах элементарной ячейки очень мало (0,1%). Изменение объема при плавлении тяжелого льда 1,57 см³/моль (0,97 значения изменения объема для H_2O). Молярный объем твердой D_2O при 273,15 К ~ 19,670 см³. См. также табл. 1.

Т а б л. 1. - СВОЙСТВА ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ И ЕЕ НАСЫЩЕННОГО ПАРА

Т, К	Давление, Уд. объем, см ³ /г	$DH_{исп}^0$
	Кпа	кДж/кг
	жидкость	пар

293,15	2,01	0,0009047	60,45	2281,4
313,15	6,59	0,0009091	19,66	2230,7
333,15	18,3	0,0009170	7,517	2180,7
353,15	46,4	0,0009274	3,273	2128,2
373,15	96,4	0,0009403	1,582	2074,1
393,15	191,1	0,0009556	0,8326	2017,6

Табл. 2.- ПОЛОЖЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ В ИК СПЕКТРЕ

Характер	HDO		D ₂ O	
	пар	жидкость	пар	жидкость
Колебания				
Симметричные валентные	2724	2500	2672	2389
Антисимметричные валентные	3708	3400	2788	2550
Деформационные	—	—	1179	1208

Тяжёлая вода менее летуча, чем H₂O. Отношение значений давления паров H₂O и D₂O в интервале 277-387 К: $\ln = -70,87/T + 33630/T^2$.

Это отношение с ростом температуры уменьшается до 1 при 498 К, при температурах выше 498 К D₂O становится более летучей, чем H₂O.

Давление пара тяжёлой воды над кристаллогидратами солей на 10-20% ниже по сравнению с H₂O. Показатель преломления тяжёлой воды 1,328300, рефракция R 3,679, поляризуемость $1,45962 \cdot 10^{-24}$ см³ при 293,15 К и длине волны 589,3 НМ.

Растворимость, а также растворяющая способность D₂O, как правило, ниже, чем у H₂O, хотя известны и обратные эффекты. Так, р-римость в D₂O ниже, чем в H₂O, у сулеймы при 0 °С на 42%, K₂Cr₂O₇ при 5 °С на 33,5%, K₂SO₄ при 25 °С на 20,5%. Растворимость D₂O в органических жидкостях по сравнению с H₂O снижается при 25 °С в триэтилаmine на 30%, CS₂ на 21,0%, бензоле на 17%, CHCl₃ на 15%, хлорбензоле на 12%. Наблюдается также изменение критической температуры растворения, например.: в системе C₃H₇COOD - D₂O на 22,4 К, C₆H₅OD - D₂O на 19,9 К.

Тяжёлая вода слабее ионизирована, чем H₂O. Константа ионизации D₂O при 298,15 К $\lg K = -14,71$. Значения χ (78,06 при 298,15 К), дипольного момента ($6,24 \cdot 10^{-30}$ Кл·м) и диамагнитной восприимчивости (при 293,15 К $-1,295 \cdot 10^{-5}$) D₂O почти не отличаются от тех же величин для H₂O. Подвижность паров D₃O⁺ в одной и той же среде на 28,5% ниже, чем у H₃O⁺, а OD⁻ - на 39,8% ниже, чем у OH⁻. Для многих других ионов различие

подвижностей в среде H_2O и D_2O составляет около 18%. Константа диссоциации слабых кислот и оснований снижается в D_2O по сравнению с H_2O , например: для уксусной кислоты $0,51 \cdot 10^{-5}$ в D_2O и $1,7 \cdot 10^{-5}$ в H_2O , для бензойной кислоты соответственно $1,95 \cdot 10^{-5}$ и $6,09 \cdot 10^{-5}$.

Большая прочность связи $\text{D} - \text{O}$, чем $\text{H} - \text{O}$, обуславливает различия в кинетике реакций тяжёлой воды и воды. Протолитические реакции и биохимические процессы в D_2O значительно замедлены. Однако существуют и такие реакции, скорость которых в тяжёлой воде выше, чем в H_2O . В основном это реакции, катализируемые ионами D^+ и H^+ или OD^- и OH^- .

ПОЛУЧЕНИЕ. Тяжёлая вода для ядерной техники должна иметь концентрацию не менее 99,81 молярных % D_2O . Современное мировое производство тяжёлой воды составляет несколько тысяч тонн в год. Основные страны-производители - Канада, США, Индия, Норвегия. Получают тяжёлую воду из обычной воды или водорода. Ввиду малости коэффициента разделения и низкого содержания в сырье производство тяжёлой воды разделяют на 2 стадии - начальное концентрирование (от природной концентрации до 5-10% в пересчете на D_2O) и конечное концентрирование (от 5-10% до 99,8% D_2O). Основные промышленные способы на первой стадии: изотопный обмен между водой и H_2S в двух-, трехступенчатой каскадной системе противоточных колонн при низкой температуре; многоступенчатый электролиз воды в сочетании с каталитическим изотопным обменом между водой и водородом; низкотемпературная ректификация жидкого водорода с последующим сжиганием D_2 с кислородом; изотопный обмен между водородом и аммиаком в присутствии KNH_2 . Для конечного концентрирования тяжёлой воды используют ректификацию воды под вакуумом или электролиз.

ПРИМЕНЕНИЕ. Тяжёлая вода является замедлителем быстрых нейтронов; коэффициент замедления нейтронов 5700, поперечное сечение захвата тепловых нейтронов $0,46 \cdot 10^{-30}$ м² (для воды соответствующие величины 61 и $0,33 \cdot 10^{-28}$ м²). Поэтому тяжёлую воду применяют главным образом в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя в энергетических и исследовательских ядерных реакторах на тепловых нейтронах (тяжеловодные реакторы). Также перспективно использование тяжёлой воды как источника D_2 для термоядерного синтеза. Тяжёлая вода также - источник дейтронов в ускорителях частиц, изотопный индикатор, растворитель в спектроскопии ядерного магнитного резонанса

Тяжёлая вода замедляет биологические процессы, действует угнетающе на живые организмы.

Литература. : Кишенбаум И., Тяжелая вода. Физические свойства и методы анализа, пер. с англ., М., 1953; Шатеништейн А.И., Изотопный анализ воды, 2 изд., М., 1957; Казавчинский Я. З., Тяжелая вода, тепло-физические свойства, М.-Л., 1963; Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Катальников С. Г., Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике, М., 1987. Я. Д. Зельвенский.

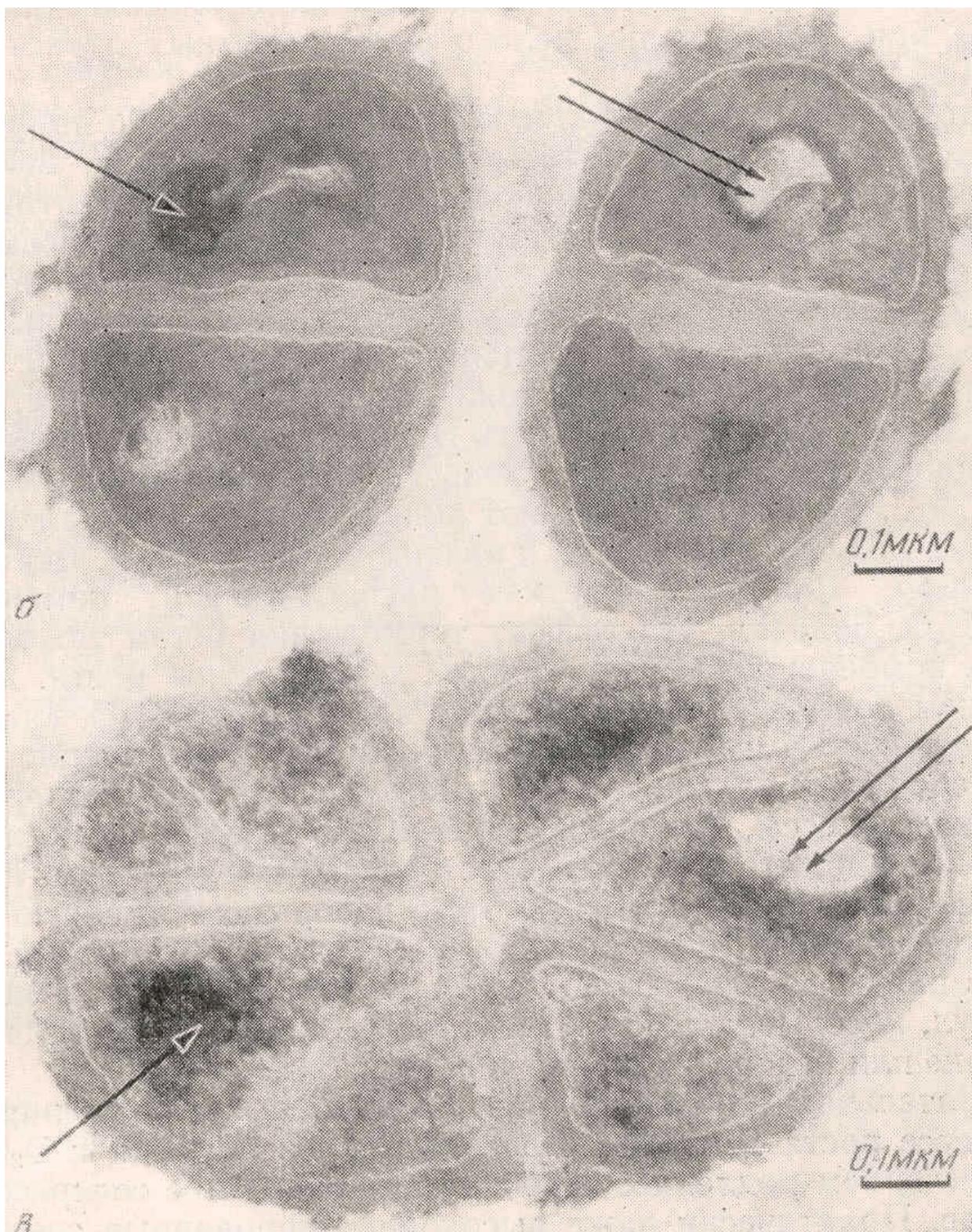
Тяжёлая вода и биологические процессы

Тяжелая вода играет значительную роль в различных биологических процессах. Различные исследователи независимо друг от друга установили, что тяжелая вода действует отрицательно на растительные и живые организмы. Но всё же, как показали исследования многие клетки бактерий, водорослей и растений могут быть адаптированы к

росту на тяжёлой воде. Как сообщил ведущий научный сотрудник Пушинского института теоретической и экспериментальной биофизики РАН Виктор Кутышенко, в ходе экспериментов было установлено, что чайный гриб адаптируется к воде, на 98% состоящей из тяжелой, всего за сутки. Это рекорд среди исследованных до сих пор организмов. Грибы помещали в среду, где, кроме тяжелой воды, содержались чайный настой и протонированная глюкоза. За адаптацией наблюдали по скорости утилизации глюкозы и накопления промежуточных метаболитов: этилового спирта и уксусной кислоты. Содержание метаболитов измеряли с помощью ЯМР-спектрометра. При пересадке в тяжелую воду рост чайного гриба на сутки приостанавливался, а затем возобновлялся, хотя и с меньшей скоростью, чем в контроле. Это рекорд по адаптации к воде из дейтерия, большинству микроорганизмов для этого нужны недели и месяцы, а прежнему чемпиону - хлорелле - 6 суток.

Подопытных собак, крыс и мышей поили водой, треть которой была заменена тяжелой водой. Через недолгое время начиналось расстройство обмена веществ животных, разрушались почки. При увеличении доли тяжелой воды животные погибали. И наоборот, снижение содержания дейтерия на 25% ниже нормы в воде, которую давали животным, благотворно сказалось на их развитии: свиньи, крысы и мыши дали потомство, во много раз многочисленнее и крупнее обычного, а яйценосность кур поднялась вдвое.

И тогда раздались голоса в пользу полного изъятия дейтерия из употребленной в пищу воды. Это привело бы к ускорению обменных процессов в организме человека, а, следовательно, к увеличению его физической и интеллектуальной активности. Но вскоре возникли опасения, что полное изъятие из воды дейтерия приведет к сокращению общей длительности человеческой жизни. Ведь известно, что наш организм почти на 70% состоит из воды. И в этой воде 0,015% дейтерия. По количественному содержанию (в атомных процентах) он занимает 12-е место среди химических элементов, из которых состоит организм человека. В этом отношении его следует отнести к разряду микроэлементов. Вот тут то дейтерий сразу попадает на первое место. Содержание таких микроэлементов как медь, железо, цинк, молибден, марганец в нашем теле в десятки и сотни раз меньше, чем дейтерия. Что же случится, если удалить весь дейтерий? На этот вопрос науке еще предстоит ответить. Пока же несомненным является тот факт, что, меняя количественное содержание дейтерия в растительном или животном организме, мы можем ускорять или замедлять ход жизненных процессов.



Электронные микрофотографии клеток микрококка *M. Lysodeikticus*; б – клетки, выращенные на протонированной среде, в – дейтерированные клетки, выращенные на тяжёловодородной среде (по данным В. А. Ерёмина и Л. Н. Чекулаевой, 1978).

Как сообщил ведущий научный сотрудник Пуцдинского института теоретической и экспериментальной биофизики РАН Виктор Кутышенко, в ходе экспериментов было установлено, что чайный гриб адаптируется к воде, на 98% состоящей из тяжелой, всего

за сутки. Это рекорд среди исследованных до сих пор организмов. Грибы помещали в среду, где, кроме тяжелой воды, содержались чайный настой и протонированная глюкоза. За адаптацией наблюдали по скорости утилизации глюкозы и накопления промежуточных метаболитов: этилового спирта и уксусной кислоты. Содержание метаболитов измеряли с помощью ЯМР-спектрометра. При пересадке в тяжелую воду рост чайного гриба на сутки приостанавливался, а затем возобновлялся, хотя и с меньшей скоростью, чем в контроле. Это рекорд по адаптации к воде из дейтерия, большинству микроорганизмов для этого нужны недели и месяцы, а прежнему чемпиону - хлорелле - 6 суток.

Аномалии воды

- 1) Лёд плавает на поверхности водоёма, $\rho(\text{льда}) = 0,92 \text{ г/см}^3$, $\max \rho(\text{воды}) \text{ при } +4^\circ\text{C} = 1 \text{ г/см}^3$
- 2) При замерзании воды происходит расширение объёма.
- 3) Самая большая теплоёмкость (в 3100 раз больше, чем у воздуха; в 4 раза больше, чем у горных пород).

Кислотно-основные свойства

Запасы воды на Земле:

в морях и океанах - 1,4 млрд. км³

в ледниках - 30 млн. км³

в реках и озёрах - 2 млн. км³

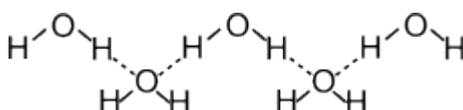
в атмосфере - 14 тыс. км³

в живых организмах - 65%

Молекула полярна; угол $\text{H}-\text{O}-\text{H}$ $-104,5^\circ$; связь $\text{O}-\text{H}$ ковалентная полярная.

Вода является дипольным растворителем (растворяет многие газы, жидкие и твёрдые вещества).

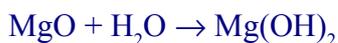
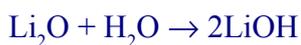
Между молекулами воды - водородные связи:



1) Вода – слабый электролит:



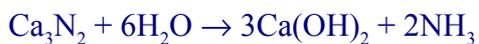
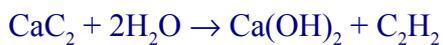
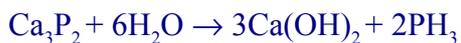
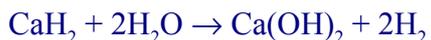
2) Вода – амфотерное вещество. Она реагирует как с основными оксидами (оксидами щелочных и щелочноземельных металлов), так и с кислотными оксидами (кроме SiO_2).



3) Гидролиз некоторых солей приводит к их полному разложению:



4) Вода разлагает гидриды, фосфиды, карбиды, нитриды и некоторые другие бинарные соединения активных металлов с неметаллами:

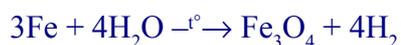
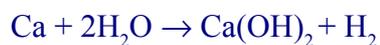
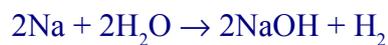


5) Молекулы воды с некоторыми солями дают кристаллогидраты:

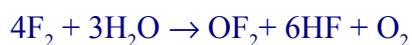


Окислительно-восстановительные свойства

- 6) С активными металлами (стоящими в ряду напряжений металлов до Mg включительно) образуется щёлочь и водород, а с металлами средней активности (стоящими в ряду напряжений металлов от Mg до Pb) - оксид и водород:



- 7) С галогенами (продукты различны):



Вода, в состав которой входит изотоп водорода дейтерий, является тяжёлой водой **D₂O**

Физические свойства	D ₂ O	H ₂ O
Молекулярная масса	20	18
Плотность при 20°C (г/см ³)	1,1050	0,9982
t° кристаллизации (°C)	3,8	0
t° кипения (°C)	101,4	100

Химические реакции с тяжёлой водой протекают медленнее, чем с обычной водой. Поэтому D₂O накапливается при длительном электролизе H₂O.

ВОДА ОБЫКНОВЕННАЯ И НЕОБЫЧНАЯ

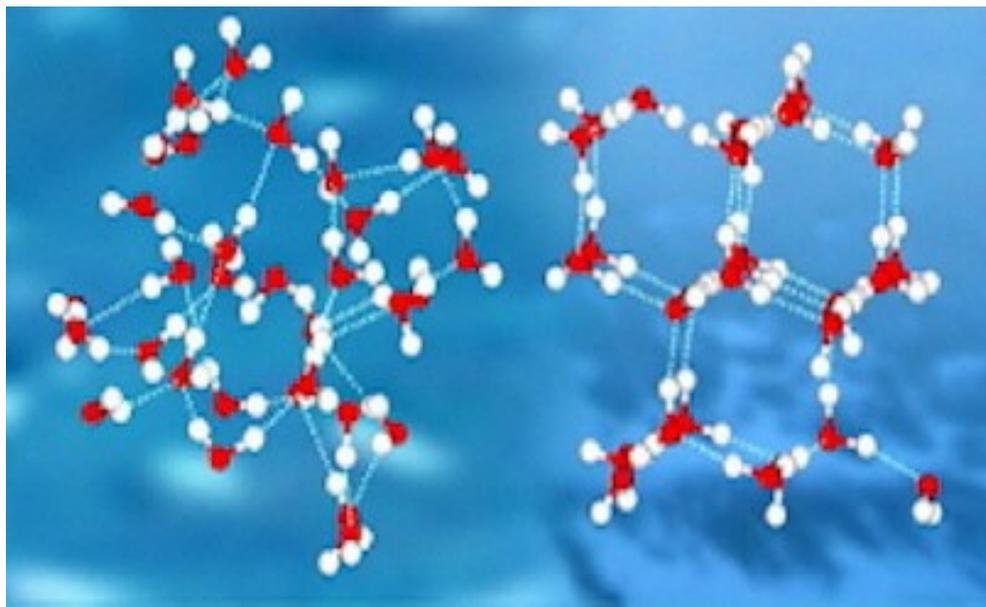


Рис. Структура воды (слева) и льда (справа)

Вода — самое распространенное вещество на Земле. 3/4 поверхности земного шара покрыты водой в виде океанов, морей, рек и озер. Много воды находится в газообразном состоянии в виде паров в земной атмосфере; в виде огромных масс снега и льда на вершинах гор и в полярных странах. В недрах земли также находится вода, пропитывающая почву и горные породы.

Природная вода не бывает совершенно чистой. Наиболее чистой является талая и дождевая вода, но и она содержит незначительные количества различных природных примесей. Количество примесей в пресных водах находится в пределах от 0,01 до 0,1 % (масс.). Морская вода содержит 3,5% (масс.) растворенных веществ, главную массу которых составляет обыкновенная поваренная соль.

Вода, содержащая значительное количество солей кальция и магния, называется жесткой в отличие от мягкой воды - дождевой. Жесткая вода уменьшает процесс

пенообразования, а на стенках котлов образует накипь.

Чтобы очистить природную воду от взвешенных в ней частиц, ее фильтруют сквозь слой пористого вещества, например, активированного угля, керамзита, обожженной глины и др. При фильтровании больших количеств воды пользуются фильтрами из песка и гравия. Фильтры задерживают также большую часть бактерий. Кроме того, для обеззараживания питьевой воды ее хлорируют; для полной стерилизации воды требуется не более 0,7 г хлора на 1 т воды.

Фильтрованием можно удалить из воды только нерастворимые примеси. Растворенные вещества удаляют из нее путем перегонки (дистилляции) или ионного обмена.

Вода имеет очень большое значение в жизни растений, животных и человека. Происхождение жизни на Земле обязано воде. В организме вода представляет собой среду, в которой протекают химические процессы, обеспечивающие жизнедеятельность организма; кроме того, вода принимает участие в целом ряде биохимических реакций как растворитель.

Вода очень необычная по своим физико-химическим свойствам субстанция. Плотность воды при переходе ее из твердого состояния в жидкое не уменьшается, как у других веществ, а возрастает. При нагревании воды от 0 до 4°C плотность ее также увеличивается. При 4°C вода имеет максимальную плотность, при дальнейшем нагревании ее плотность уменьшается. Это свойство воды очень ценно для жизни. Если бы при понижении температуры и при переходе из жидкого состояния в твердое плотность воды изменялась, как это происходит у подавляющего большинства веществ, то при приближении зимы поверхностные слои природных вод охлаждались бы до 0°C и опускались на дно, освобождая место более теплым слоям, и так продолжалось бы до тех пор, пока вся масса водоема не приобрела бы температуру 0°C. Тогда бы вода замёрзла, образуя ледяные льдины погружались бы на дно и водоем промерзал бы на всю его глубину. Многие формы жизни в воде были бы невозможны. Но так как наибольшей плотность вода достигает при 4 °C, то перемещение ее слоев, вызываемое охлаждением, заканчивается при достижении этой температуры. При дальнейшем понижении температуры охлажденный слой, обладающий меньшей плотностью, остается на поверхности, замерзает и тем самым защищает лежащие ниже слои от дальнейшего охлаждения и замерзания.

Большое значение имеет тот факт, что вода обладает аномально высокой теплоемкостью [4,18 Дж/(г К)]. Поэтому в ночное время, а также при переходе от лета к зиме вода остывает медленно, а днем или при переходе от зимы к лету так же медленно нагревается, являясь, таким образом, регулятором температуры на земном шаре.

Молекула воды имеет угловое строение; входящие в ее состав ядра образуют равнобедренный треугольник, в основании которого находятся два протона, а в вершине — ядро атома кислорода. Межъядерные расстояния O—H близки к 0,1 нм, расстояние между ядрами атомов водорода равно 0,15 нм. Из восьми электронов, составляющих внешний электронный слой атома кислорода в молекуле воды две электронные пары образуют ковалентные связи O—H, а остальные четыре электрона представляют собой две неподеленных электронных пары.

Атом кислорода в молекуле воды находится в состоянии sp^2 -гибридизации. Поэтому валентный угол HON ($104,3^\circ$) близок к тетраэдрическому ($109,5^\circ$). Электроны, образующие связи O—H, смещены к более электроотрицательному атому кислорода. В результате атомы водорода приобретают эффективные положительные заряды, поскольку на них создаются два положительных полюса. Центры отрицательных зарядов неподеленных электронных пар атома кислорода, находящиеся на гибридных - орбиталях, смещены относительно ядра атома и в свою очередь создают два отрицательных полюса.

Молекулярная масса парообразной воды равна 18 ед. Но молекулярная масса жидкой воды, определяемая путем изучения ее растворов в других растворителях оказывается более, высокой. Это происходит из-за того, что в жидкой воде происходит ассоциация отдельных молекул воды в более сложные агрегаты (кластеры). Такой вывод подтверждается и аномально высокими значениями температур плавления и кипения воды. Ассоциация молекул воды вызвана образованием между ними водородных связей.

По своей структуре вода представляет собой иерархию правильных объемных структур, в основе которых лежит кристаллоподобные образования, состоящие из 57 молекул и взаимодействующие друг с другом за счет свободных водородных связей. Это приводит к появлению структур второго порядка в виде шестигранников, состоящих из 912 молекул воды. Свойства кластеров зависят от

того, в каком соотношении выступают на поверхность кислород и водород. Конфигурация элементов воды реагирует на любое внешнее воздействие и примеси, что объясняет чрезвычайно лабильный характер их взаимодействия. В обычной воде совокупность отдельных молекул воды и случайных ассоциатов составляет 60% (деструктурированная вода), а 40% - это кластеры (структурированная вода).

В твердой воде (лед) атом кислорода каждой молекулы участвует в образовании двух водородных связей с соседними молекулами воды. Образование водородных связей приводит к такому расположению молекул воды, при котором они соприкасаются друг с другом своими разноименными полюсами. Молекулы образуют слои, причем каждая из них связана с тремя молекулами, принадлежащими к тому же слою, и с одной — из соседнего слоя. Структура льда принадлежит к наименее плотным структурам, в ней существуют пустоты, размеры которых несколько превышают размеры молекулы.

При плавлении льда его структура разрушается. Но и в жидкой воде сохраняются водородные связи между молекулами: образуются ассоциаты — обломки структур льда, — состоящих из большего или меньшего числа молекул воды. Однако в отличие от льда каждый ассоциат существует очень короткое время: постоянно происходит разрушение одних и образование других агрегатов. В пустотах таких “ледяных” агрегатов могут размещаться одиночные молекулы воды; при этом упаковка молекул воды становится более плотной. Именно поэтому при плавлении льда объем, занимаемый водой, уменьшается, а ее плотность возрастает.

По мере нагревания воды обломков структуры льда в ней становится все меньше, что приводит к дальнейшему повышению плотности воды. В интервале температур от 0 до 4°C этот эффект преобладает над тепловым расширением, так что плотность воды продолжает возрастать. Однако при нагревании выше 4°C преобладает влияние усиления теплового движения молекул и плотность воды уменьшается. Поэтому при 4°C вода обладает максимальной плотностью.

При нагревании воды часть теплоты затрачивается на разрыв водородных связей (энергия разрыва водородной связи в воде составляет примерно 25 кДж/моль). Этим объясняется высокая теплоемкость воды. Водородные связи между молекулами воды полностью разрываются только при переходе воды в пар.

Диаграмма состояния воды (или фазовая диаграмма) представляет собой графическое изображение зависимости между величинами, характеризующими состояние системы, и фазовыми превращениями в системе (переход из твердого состояния в жидкое, из жидкого в газообразной и т. д.). Для однокомпонентных систем обычно используются диаграммы состояния, показывающие зависимость фазовых превращений от температуры и давления; они называются диаграммами состояния в координатах P — T . На рисунке приведена диаграмма состояния воды. Любой точке на диаграмме отвечают определенные значения температуры и давления.

Диаграмма показывает те состояния воды, которые термодинамически устойчивы при определенных значениях температуры и давления. Она состоит из трех кривых, разграничивающих все возможные температуры и давления на три области, отвечающие льду, жидкости и пару.

Рассмотрим каждую из кривых более подробно. Начнем с кривой OA , отделяющей область пара от области жидкого состояния. Представим себе цилиндр, из которого удален воздух, после чего в него введено некоторое количество чистой, свободной от растворенных веществ, в том числе от газов, воды; цилиндр снабжен поршнем, который закреплен в некотором положении. Через некоторое время часть воды испарится и над ее поверхностью будет находиться насыщенный пар. Можно измерить его давление и убедиться в том, что оно не изменяется с течением времени и не зависит от положения поршня. Если увеличить температуру всей системы и вновь измерить давление насыщенного пара, то окажется, что оно возросло. Повторяя такие измерения при различных температурах, найдем зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры. Кривая OA представляет собой график этой зависимости: точки кривой показывают те пары значений температуры и давления, при которых жидкая вода и водяной пар находятся в равновесии друг с другом — сосуществуют. Кривая OA называется кривой равновесия жидкость—пар или кривой кипения. В таблице приведены значения давления насыщенного водяного пара при нескольких температурах.

Попытаемся осуществить в цилиндре давление, отличное от равновесного, например, меньшее, чем равновесное. Для этого освободим поршень и поднимем его. В первый момент давление в цилиндре, действительно, упадет, но вскоре равновесие восстановится: испарится добавочно некоторое количество воды и

давление вновь достигнет равновесного значения. Только тогда, когда вся вода испарится, можно осуществить давление, меньшее, чем равновесное. Отсюда следует, что точкам, лежащим на диаграмме состояния ниже или правее кривой ОА, отвечает область пара. Если пытаться создать давление, превышающее равновесное, то этого можно достичь, лишь опустив поршень до поверхности воды. Иначе говоря, точкам диаграммы, лежащим выше или левее кривой ОА, отвечает область жидкого состояния.

До каких пор простираются влево области жидкого и парообразного состояния? Наметим по одной точке в обеих областях и будем двигаться от них горизонтально влево. Этому движению точек на диаграмме отвечает охлаждение жидкости или пара при постоянном давлении. Известно, что если охлаждать воду при нормальном атмосферном давлении, то при достижении 0°C вода начнет замерзать. Проводя аналогичные опыты при других давлениях, придем к кривой ОС, отделяющей область жидкой воды от области льда. Эта кривая — кривая равновесия твердое состояние — жидкость, или кривая плавления,— показывает те пары значений температуры и давления, при которых лед и жидкая вода находятся в равновесии.

Двигаясь по горизонтали влево в области пара (в нижней части диаграммы), аналогичным образом придем к кривой ОВ. Это—кривая равновесия твердое состояние—пар, или кривая сублимации. Ей отвечают те пары значений температуры к давлению, при которых в равновесии находятся лед и водяной пар.

Все три кривые пересекаются в точке О. Координаты этой точки—это единственная пара значений температуры и давления, при которых в равновесии могут находиться все три фазы: лед, жидкая вода и пар. Она носит название тройной точки.

Кривая плавления исследована до весьма высоких давлений, В этой области обнаружено несколько модификаций льда (на диаграмме не показаны).

Справа кривая кипения оканчивается в критической точке. При температуре, отвечающей этой точке,—критической температуре— величины, характеризующие физические свойства жидкости и пара, становятся одинаковыми, так что различие между жидким и парообразным состоянием исчезает.

Существование критической температуры установил в 1860 г. Д. И. Менделеев, изучая свойства жидкостей. Он показал, что при температурах, лежащих выше критической, вещество не может находиться в жидком состоянии. В 1869 г. Эндриус, изучая свойства газов, пришел к аналогичному выводу. Критические температура и давление для различных веществ различны. Так, для водорода $t_c = -239,9\text{ }^\circ\text{C}$, $p_c = 1,30\text{ МПа}$, для хлора $t_c = 144\text{ }^\circ\text{C}$, $p_c = 7,71\text{ МПа}$, для воды $t_c = 374,2\text{ }^\circ\text{C}$, $p_c = 22,12\text{ МПа}$.

Одной из особенностей воды, отличающих ее от других веществ, является понижение температуры плавления льда с ростом давления. Это обстоятельство отражается на диаграмме. Кривая плавления ОС на диаграмме состояния воды идет вверх влево, тогда как почти для всех других веществ она идет вверх вправо.

Преобразования, происходящие с водой при атмосферном давлении, отражаются на диаграмме точками или отрезками, расположенными на горизонтали, отвечающей $101,3\text{ кПа}$ (760 мм рт. ст.). Так, плавление льда или кристаллизация воды отвечает точке D, кипение воды—точке E, нагревание или охлаждение воды — отрезку DE и т. п.

Диаграммы состояния изучены для ряда веществ, имеющих научное или практическое значение. В принципе они подобны рассмотренной диаграмме состояния воды. Однако на диаграммах состояния различных веществ могут быть особенности. Так, известны вещества, тройная точка которых лежит при давлении, превышающем атмосферное. В этом случае нагревание кристаллов при атмосферном давлении приводит не к плавлению этого вещества, а к его сублимации - превращению твердой фазы непосредственно в газообразную.

Молекулы воды отличаются большой устойчивостью к нагреванию. Однако при температурах выше $1000\text{ }^\circ\text{C}$ водяной пар начинает разлагаться на составляющие воду водород и кислород. Процесс разложения вещества в результате его нагревания называется термической диссоциацией. Термическая диссоциация воды протекает с поглощением теплоты. Поэтому, согласно принципу равновесия французского учёного Ле Шателье, чем выше температура, тем в большей степени разлагается вода. Однако даже при $2000\text{ }^\circ\text{C}$ степень термической диссоциации воды не превышает 2%, т.е. равновесие между газообразной водой и продуктами ее диссоциации — водородом и кислородом — все еще остается смещенным в сторону воды. При охлаждении же ниже $1000\text{ }^\circ\text{C}$ равновесие

практически полностью сдвигается в этом направлении.

Вода — очень реакционноспособное вещество. Оксиды многих металлов и неметаллов соединяются с водой, образуя основания и кислоты; некоторые соли образуют с водой кристаллогидраты; наиболее активные металлы взаимодействуют с водой с выделением водорода.

Вода обладает также каталитической способностью. В отсутствие следов влаги практически не протекают некоторые обычные реакции; например, хлор не взаимодействует с металлами, фтороводород не разъедает стекло, натрий не окисляется в атмосфере воздуха.

Вода способна соединяться с рядом веществ, находящихся при обычных условиях в газообразном состоянии, образуя при этом так называемые гидраты газов. Примерами могут служить соединения ксенона, хлора и углеводородов, которые выпадают в виде кристаллов при температурах от 0 до 24 °С (обычно при повышенном давлении соответствующего газа). Подобные соединения возникают в результате заполнения молекулами газа (“гостя”) межмолекулярных полостей, имеющих в структуре воды (“хозяина”); они называются соединениями включения или клатратами.

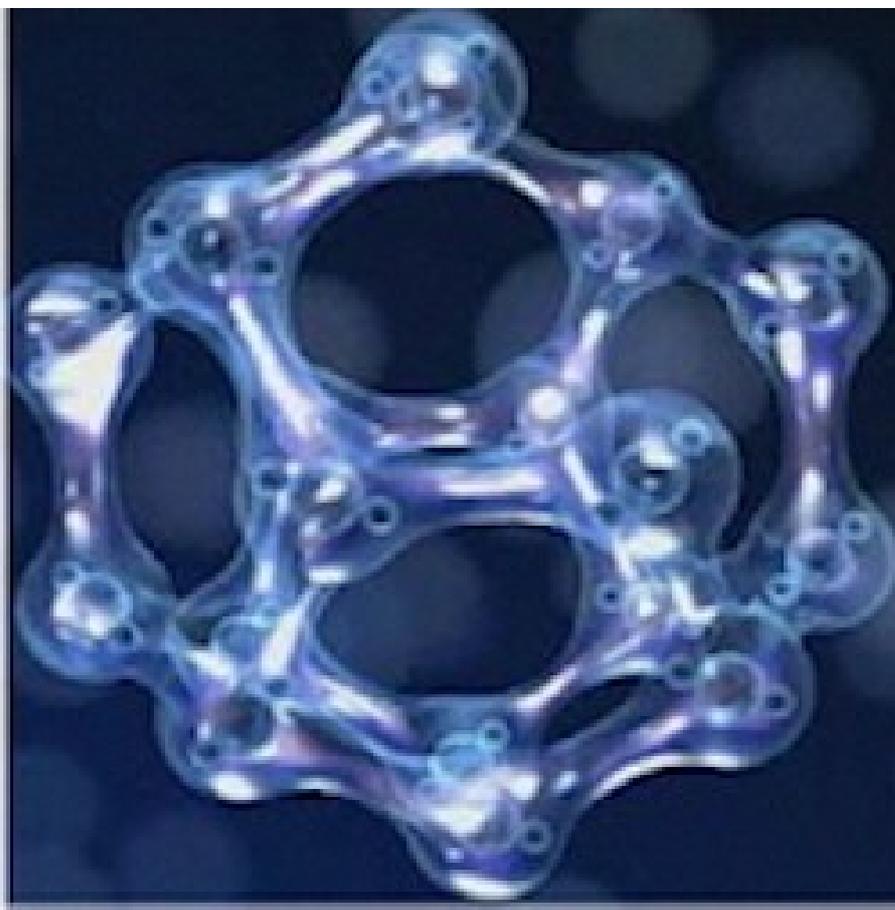


Рис. Клатратная модель воды. Видны отдельные кластеры.

В клатратных соединениях между молекулами “гостя” и “хозяина” образуются лишь слабые межмолекулярные связи; включенная молекула не может покинуть своего места в полости кристалла преимущественно из-за пространственных затруднений. Поэтому клатраты — неустойчивые соединения, которые могут существовать лишь при сравнительно низких температурах.

Клатраты используют для разделения углеводородов и благородных газов. В последнее время образование и разрушение клатратов газов (пропана и некоторых других) успешно применяется для обессоливания воды. Нагнетая в соленую воду при повышенном давлении соответствующий газ, получают льдоподобные кристаллы клатратов, а соли остаются в растворе. Похожую на снег массу кристаллов отделяют от маточного раствора и промывают. Затем при некотором повышении температуры или уменьшении давления клатраты разлагаются, образуя пресную воду и исходный газ, который вновь используется для получения клатрата. Высокая экономичность и сравнительно мягкие условия осуществления этого процесса делают его перспективным в качестве промышленного метода опреснения морской воды.

При электролизе обычной воды, содержащей наряду с обычными молекулами воды также образуется незначительное количество молекул тяжелой и полутяжелой HOD воды, образованных тяжелым изотопом водорода. Поэтому при длительном электролизе воды остаток постепенно обогащается молекулами этих соединений. Из такого остатка после многократного повторения электролиза ученым в 1933 г. впервые удалось выделить небольшое количество воды состоящей почти на 100% из молекул дейтерия и получившей название тяжелой.

По своим свойствам тяжелая вода заметно отличается от обычной воды. Реакции с тяжелой водой протекают медленнее, чем с обычной, константы диссоциации молекулы тяжелой воды меньше таковых для обычной воды. Тяжелую воду применяют в качестве замедлителя нейтронов в ядерных реакторах. Из-за высокой энергоёмкости производства из природного сырья её стоимость составляет 200–250 долларов за 1 кг. После распада СССР в России производство тяжелой воды отсутствует. В то же время в стране накопилось значительное количество разбавленной тяжелой воды, загрязненной тритием за счёт деятельности атомных АЭС. Также имеется необходимость переработки снятых с

вооружения боеприпасов, в процессе которой образуются тяжеловодные отходы. Эти отходы могут служить сырьем для получения тяжелой воды.

Российскими учёными из ПИЯВ разработаны на опытных установках оригинальные технологии получения и очистки тяжелой воды. В 1995 была введена в эксплуатацию первая в России и одна из первых в мире опытно-промышленная установка на основе метода изотопного обмена в системе вода-водород и электролиза воды (ЭВИО).

Характеристика качества изотопной продукции получаемой на установках ПИЯФ

Наименование	Содержание дейтерия	Содержание примесей	Содержание трития
Тяжелая вода реакторного качества	> 99,8% ат.	Электропроводность - $<5 \cdot 10^{-4}$ См/м Окисляемость (KMnO_4) - <10 мг/кг Хлориды - $<0,1$ мг/кг	4-400 МБк/кг (10^{-4} - 10^{-2} Ки/кг)
Тяжелая вода для медицины и науки	99,80 - 99,99% ат.	Электропроводность - $<5 \cdot 10^{-4}$ См/м Окисляемость (KMnO_4) - <10 мг/кг	< 74 кБк/кг ($1 \cdot 2 \cdot 10^{-6}$ Ки/кг)
Газообразный дейтерий высокой чистоты	99,8 – 99,9% ат.	Кислород (O_2) - $< 10^{-4}$ - 10^{-6} % об. Азот (N_2) - $<1 \cdot 10^{-3}$ - 10^{-5} % об.	0,4-40 кБк/л (10^{-8} - 10^{-6} Ки/л)
Вода с пониженным содержанием изотопа дейтерия	Менее 10^{-3} % (более чем на порядок ниже, чем в природной воде)	Определяется требованиями заказчика	< 1 Бк/кг (ниже, чем в природной воде)

Высокая эффективность установки ЭВИО дает возможность получать тяжелую воду с содержанием дейтерия $> 99,995$ % ат. Отработанная в ПИЯФ технология обеспечивает высокое качество тяжелой воды, включая глубокую очистку тяжелой воды от трития до остаточной активности, позволяющей без ограничений использовать тяжелую воду в медицинских и научных целях. Возможности установки позволяют полностью обеспечить

потребности российских предприятий и организаций в тяжелой воде и дейтерии, а также экспортировать часть продукции. За время работы для нужд Росатома и других предприятий России были произведены более 20 тонн тяжелой воды и десятки килограммов газообразного дейтерия.

При эксплуатации тяжеловодных реакторов тяжелая вода загрязняется протием, например, при натекании паров воды из атмосферы, а тритий образуется в тяжелой воде вследствие захвата нейтронов атомами дейтерия. Разрабатывается проект установки изотопной очистки тяжелой воды из реакторов атомных АЭС. С помощью этой установки содержание трития в тяжелой воде должно поддерживаться на уровне $7,4 \cdot 10^{10}$ Бк/кг тяжелой воды, а изотопная концентрация тяжелой воды не ниже, чем 99,8 % тяжелой воды.

ТЯЖЁЛАЯ ВОДА. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ЖИВОТНЫХ

При изменении изотопного состава молекул происходят изменения параметров химических реакций, в которых участвуют эти молекулы. Наибольший изотопный эффект наблюдается на дейтерии. Химические реакции с участием дейтерия, в отличие от протия, протекают с меньшей скоростью из-за большей энергии активации. Скорость ферментных реакций с участием протия в 4–5 раз выше, чем с дейтерием. Так, по теории абсолютных скоростей разрыв C^2H -связей может происходить быстрее, чем CH -связей, подвижность иона $^2H^+$ меньше, чем подвижность H^+ , константа ионизации тяжелой воды несколько меньше константы ионизации обычной воды. При этом различают первичные и вторичные изотопные эффекты дейтерия в зависимости от того, какое положение занимает атом дейтерия в молекуле.

Но наиболее чувствительными к изотопным эффектам дейтерия оказались биологические системы [1]. Присутствие дейтерия в биологических системах приводит к изменениям структуры и свойствам жизненно-важных макромолекул таких как дезоксирибонуклеиновые кислоты (ДНК) и белки. Наиболее важными для структуры макромолекулы связи являются водородные (дейтериевые) связи. Они формируются между соседними атомами дейтерия (водорода) и гетероатомами кислорода, углерода, азота, серы и т.д. и играют главную роль в определении структуры макромолекулярных цепей и как эти структуры взаимодействуют с другими соседними макромолекулярными структурами, а также с тяжелой водной окружающей среды.

Конформация двойной спирали макромолекулы ДНК и макромолекул белков изменяются в присутствии тяжёлой воды так, чтобы макромолекулы обычных белков, помещённые в тяжелую воду имеют более устойчивую пространственную структуру за счёт вторичных изотопных эффектов тяжёлой воды [2]. Вероятно, именно поэтому тяжёлая вода проявляет стабилизирующий эффект на пространственную структуру спирали макромолекул посредством формирования многочисленных непостоянных маложивущих легкообмениваемых на водород (дейтерий) водородных связей с карбоксильными, карбонильными, гидроксильными, сульфидными и амино группами макромолекул. В то время как ковалентные связи атома дейтерия с водородом C-2H могут синтезироваться в молекулах только *de novo*, т.е. в процессе биосинтеза. И эти связи приводят к дестабилизации дейтерированных молекул.

Серьезное изменение в биохимии клетки связано в её способности делиться в присутствии тяжёлой воды. Тяжёлая вода замедляет скорость деления клетки (митоз) в стадии профазы и особенно этот эффект выражен для быстро делящихся клеток. Этот эффект пропорционален концентрации тяжёлой воды в среде [3].

В процессе роста клеток на тяжёлой воде в них синтезируются макромолекулы, в которых атомы водорода в углеродном скелете полностью замещены на дейтерий. Такие дейтерированные макромолекулы претерпевают адаптационные модификации, необходимые для нормального функционирования клетки в тяжёлой воде. Их активность и биологические свойства могут быть совершенно иными, чем их протонированные аналоги. Но эти изменения не единственны; физиология, морфология, цитология клетки, а также генетический аппарат клетки также подвергается воздействию и модификации в тяжёлой воде.

Способность к адаптации к тяжёлой воде у разных родов и видов бактерий различная и может варьировать в пределах таксономической группы [4]. Адаптация к тяжёлой воде определяется как таксономической специфичностью организмов, так и особенностями их метаболизма, функционированием различных путей ассимиляции субстратов, а также эволюционной нишей, которую занимает исследуемый объект. При этом чем ниже уровень эволюционного развития организма, тем лучше он приспосабливается к присутствию дейтерия в среде. Для всех организмов рост на тяжёлой воде сопровождался снижением ростовых характеристик [5-8], причём адаптированные к тяжёлой воде клетки сохраняли способность к росту и биосинтезу на тяжеловодородной среде.

Но как ведут себя высшие организмы, если поить их тяжёлой водой? Ответ на этот вопрос дали исследования академика В.И. Бадьина с соавторами [9]. Учёные провели измерения

динамики снижения содержания дейтерия в организме 4-х месячных телят, которых поили водой с пониженным содержанием дейтерия.

Для эксперимента были отобраны три здоровых теленка 4-х месячного возраста. Каждый из них помещался в отдельное стойло. Перед началом эксперимента у животных были взяты пробы мочи, крови и волосяные покровы. Животных измеряли для определения веса. В течение эксперимента телят кормили сеном (1,5–2 кг/сут.) и комбикормом (2 кг/сут.). А поили их очищенной водой с добавкой тяжёлой воды с известным изотопным сдвигом протий/дейтерий.

Затем на второй, пятый и седьмой день эксперимента у животных отбирали мочу и кровь, в которых определяли содержание дейтерия, а также макро- и микроэлементов. Каждый день у телят измеряли пульс, частоту дыхания и температуру тела. В течение всего эксперимента за телятами вели наблюдение ветеринарный врач и зоотехник.

Было установлено, что концентрация дейтерия в моче животных до начала эксперимента оказалась примерно равной концентрации дейтерия в воде Московского региона.

Академик В.И. Бадьин с соавт. [9] пришёл к следующим выводам:

- Потребление животными воды, обедненной дейтерием, приводит к изменению изотопного состава воды мочи.
- Потребление животными очищенной воды, приводило к снижению концентрации кальция в моче.
- Зарегистрировано уменьшение содержания кальция, магния и кадмия в волосяном покрове.
- Произошло увеличение концентрации креатенина в моче и сыворотке крови при сохранении соотношения концентраций кровь/моча.
- Телята, пившие воду, обедненную дейтерием, отличались от обычных телят резвостью и высокой подвижностью.

Таким образом, изотопный эффект т дейтерия может активизировать или угнетать биохимические процессы в организме. Однако, до тех пор, пока не накоплены первичные сведения в области токсикологии дейтерия, исследовать его действие на человеке очень опасно. Первым шагом в практическом использовании обедненной дейтерием воды может быть применение ее в рационе персонала на производстве

тяжелой воды в качестве профилактического средства.

Литература.

1. Crespi H. L. *Biosynthesis and uses of per-deuterated proteins. in: Synt. and Appl. of Isot. Label. Compd. // Ed. R. R. Muccino. - Elsevier. - Amsterdam, 1986 - P. 111-112.*
2. Katz J, Crespi H.L. // *Pure Appl. Chem.* - 1972. - V.32. - P. 221-250.
3. Daboll H. F., Crespi H. L., Katz J. J. // *Biotechnology and Bioengineering.* - 1962. - V. 4. - P. 281-297.
4. Мосин О. В., Карнаухова Е. Н., Пшеничникова А. Б., Складнев Д. А., Акимова О. Л. // *Биотехнология.* - 1993. - N 9. - С. 16-20.
5. Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Юркевич А. М., Швец В. И. // *Биотехнология.* - 1996. - N 3. - С. 3-12.
6. Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Юркевич А. М., Швец В. И. // *Биотехнология.* - 1996. - N 4. - С. 27-35.
7. Складнев Д. А., Мосин О. В., Егорова Т. А., Ерёмин С. В., Швец В. И. // *Биотехнология.* - 1996. - N 5. - С. 25-34.
8. Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Швец В. И. // *Биоорганическая химия.* - 1996. - Т. 22. - N 10-11. - С. 856-869.
9. Бадьин В. И., Дробышевский Ю. В. и др. Отчет о НИР «Разработка препарата и способа его получения для стимуляции жизнедеятельности организма», Фирма «Мед-Чернобыль», 1993 г.

КАК МОЛЕКУЛА ВОДА ХРАНИТ И ПЕРЕДАЁТ ИНФОРМАЦИЮ

Вода благодаря своеобразию своих физических и химических свойств, занимает исключительное положение в природе и играет особо важную роль в жизни человека. Вода занимает 70% земной поверхности и составляет приблизительно 70% массы человека: эмбрион состоит из воды на 95%, в теле новорожденного её – 75%, у взрослого человека – 60%, в старости её количество снижается. Содержание воды в организме идёт по экспоненте: волосы – около 10%, клетки разных тканей 60%, ЦНС – 90%. Объём воды, потребляемой человеком в сутки, составляет 2,5-3,0 литров, столько же воды и

выводится. Если воды выводится на 6-8% больше нормы, то возникает мышечная слабость, головокружение, головная боль и др. явления. Избыточная потеря 10% воды приводит к более тяжёлым изменениям, а – 15-20% - вызывает смерть. Без воды человек может прожить только несколько суток.

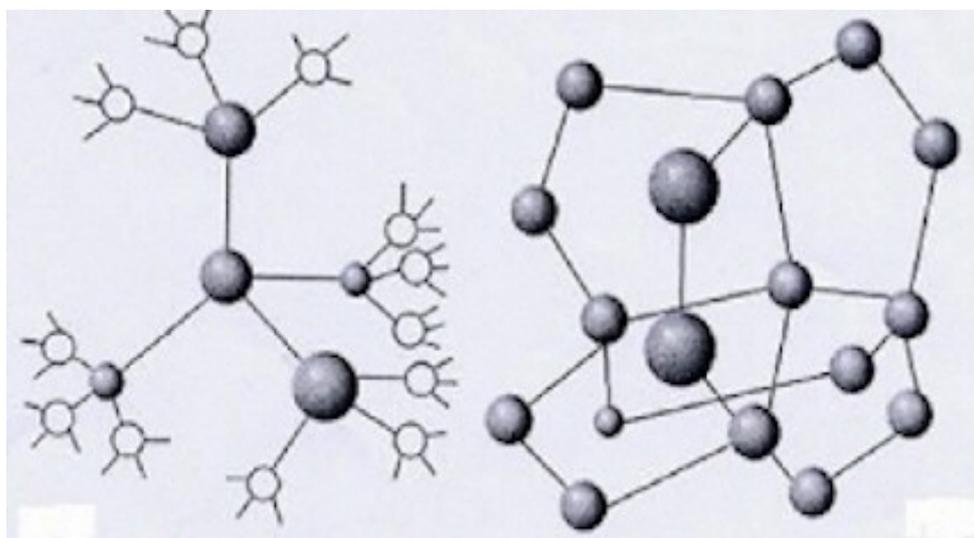


Рис. Структура воды и льда.

Ф. Батмангхелидж доказал, что хронические боли, которые нельзя объяснить инфекцией или повреждением, следует трактовать, в первую очередь, как сигналы хронического обезвоживания в районе наблюдаемой боли, например, боли при диспепсии, ревматоидном артрите, колите, синдроме перемежающейся хромоты, мигрени и головных болях, при синдроме похмелья, а также боли в нижней части спины, ангинозные боли. Локальный недостаток воды вызывает такую же реакцию (боль), как и повреждающее воздействие. Вместе с тем, врачам известны и другие факты: местный избыток воды (отёк), например, при воспалении, также сопровождается болью.

Проблема чистой воды стала одной из важнейших проблем XXI века. Ещё 2000 лет назад выдающийся целитель Авиценна пришёл к выводу о том, что из 1000 болезней 999 связаны с состоянием воды, которую потребляет человек. По данным ВОЗ, почти 80% всех заболеваний вызваны некачественной питьевой водой.

Питьевая вода может быть источником ряда заболеваний. Главный государственный санитарный врач РФ Г.Г. Онищенко указывал, что микробное загрязнение нередко служит причиной кишечных инфекций. В Архангельской, Омской, Челябинской и Кемеровской областях вирусный гепатит А распространяется в основном «водным путём»; в Ростовской области выявлена связь между высокой минерализацией

воды и заболеваемостью мочекаменной болезнью; в Свердловской области обнаружена связь между содержанием хлорорганических соединений в питьевой воде и онкологическими заболеваниями, спонтанными абортами, частотой мутаций в соматических клетках у детей и т.д.

Автор флюктуационного метода очистки воды Ф.Р. Черников считает, что вода хранит “генетическую память” вследствие того, что в структурно-динамических параметрах водной среды (обладающих специфической биологической активностью) остаётся информация о предшествующих воздействиях, включая воздействия самих водоочистительных процессов. Очищенной водой может считаться вода с высоким уровнем структурно-динамических параметров (по типу «талой воды»).

С.В. Зениным на основании данных, полученных тремя физико-химическими методами: рефрактометрии (С.В. Зенин, Б.В. Тяглов, 1994), высокоэффективной жидкостной хроматографии (С.В. Зенин с соавт., 1998) и протонного магнитного резонанса (С.В. Зенин, 1993) построена и доказана геометрическая модель основного стабильного структурного образования из молекул воды (структурированная вода), а затем (С.В. Зенин, 2004) получено изображение с помощью контрастно-фазового микроскопа этих структур. Структурной единицей такой воды является кластер, состоящий из клатратов, природа которых обусловлена дальними кулоновскими силами. В структуре кластеров закодирована информация о взаимодействиях, имевших место с данными молекулами воды. В водных кластерах за счёт взаимодействия между ковалентными и водородными связями между атомами кислорода и атомами водорода может происходить миграция протона (H⁺) по эстафетному механизму, приводящие к делокализации протона в пределах кластера.

Вода является источником сверхслабого и слабого переменного электромагнитного излучения. Наименее хаотичное электромагнитное излучение создаёт структурированная вода. В таком случае может произойти индукция соответствующего электромагнитного поля, изменяющего структурно-информационные характеристики биологических объектов.

Любая система, уровень порядка которой выше минимально приемлемых 60%, начинает саморегуляторное поддержание упорядоченных взаимодействий. Чем выше в воде содержание кластеров, чем более упорядоченная её структура, тем более она способна сама себя воспроизводить, что и наблюдается в живых системах. Это свидетельствует о том, что вода организма человека может выполнять системообразующую роль, с одной стороны, и регуляторную роль - с другой. В этом

отношении интересной является концепция двухкомпонентной системы восстановления повреждённых тканей (К.М. Резников, 2005), где алгоритм восстановления реализуется на уровне структурированной воды.

Роль воды, входящей в состав биологических жидкостей (кровь, лимфа, ликвор и др.), ещё мало освещена в современной литературе, но её значение, как информационного фактора, чрезвычайно велика и требует дальнейшего осмысления. При этом следует учитывать мнение И.Л. Герловина (1990) о том, что любые воздействия на воду и растворы – электрические, магнитные, электромагнитные, ультразвуковые, электрохимические – можно объяснить на основе энергизации виртуальной пары элементарных частиц электрон-позитрон.

Последовательность процесса структурирования биогенной воды была предложена К.М. Резниковым в 2001 году. Эти данные раскрывают процессы передачи информации в живых системах и возможности использования их в лечебных и диагностических целях. При этом понятие «информация» рассматривается как мера организованности движения (взаимодействия и перемещения) частиц в системе.

Конкретные механизмы передачи информации посредством структурированной воды можно рассмотреть в соответствии с моделью К. М. Резникова в виде многоканальной рецепторно-информационной системы, включающей 3 уровня:

1-й – перескок протонов вдоль спирали структурированной воды, характерен вероятнее всего для терминалей, заканчивающихся в области биологически активных точек (БАТ), с одной стороны, и тканей отдельных органов с другой.

2-й - образование протонных сгущений и разряжений вдоль тяжей (коллатералей), состоящих из отдельных спиралей и реализующих передачу информации от нескольких БАТ или от внутренних органов и обратно.

3-й - межкластерный обмен молекулами воды, кластеров, входящих в структуру параллельных тяжей, образующих основу так называемых каналов (меридианов), является центральным звеном передачи информации между БАТ и внутренними органами в обе стороны.

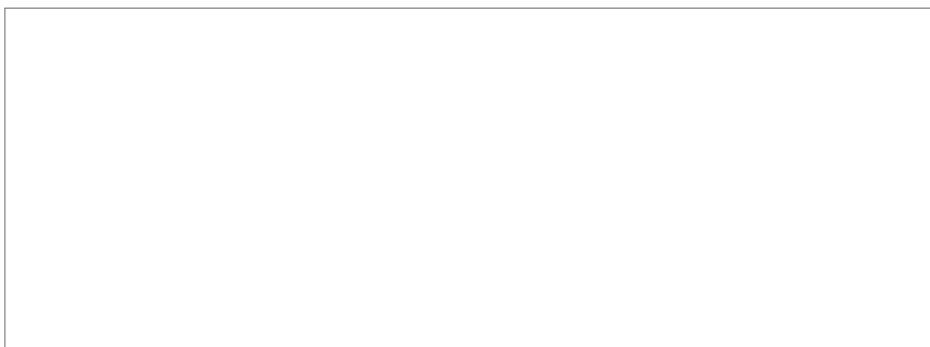


Рис. 1. Многоканальная рецепторно-информационная система организма (фрагмент)

Отдельные кластеры и кластеры, которые наименее длительно существуют, могут быть, с одной стороны, субстратом для построения более сложных структур системы, а с другой передатчиками информации между отдельными клетками.

Эти данные свидетельствуют о том, что если под влиянием какого либо внешнего фактора (микрорганализм, токсин, электромагнитное излучение и т.д.) меняются информационные свойства воды, то изменяются и структурно-функциональные компоненты клеток, тканей и органов. По мнению автора предложенной модели К.М. Резникова изменения информационных возможностей структурированной воды могут быть наиболее ранними признаками возможности возникновения патологических явлений.

К.М. Резников всю рецепторно-информационную систему организма представил следующим образом:

Первая, самая высокая степень обезличенности (осознаваемости) информации (на уровне «да-нет», «+ или – », «много-мало» и т.д.) реализуется на уровне водно-структурной рецепторно-информационной системы (вовлечение в информационный процесс всех клеток организма);

Вторая, меньшая степень обезличенности информации (более обобщённая информация), осуществляется с участием ионов, пептидов, аминокислот на уровне клеточных мембран (определённые клетки организма);

Третья, целенаправленная передача информации (конкретная, адресованная определённой ткани и вызывающая регистрируемые на уровне органов изменения), происходит при участии системы «медиатор-рецептор» (нервная система), «гормон-рецептор» (гормональная система).

Эти три компонента по мнению К. М. Резникова составляют всеобщую (генерализованную) рецепторно-информационную систему, обеспечивающую

информационные взаимодействия, с одной стороны, всех структурных образований организма (клетки и их органеллы, ткани, органы, функциональные системы) по типу «всё знает обо всём», а с другой – непрерывную двустороннюю связь организма с внешней средой. Центральная нервная система, являясь специализированным органом восприятия, обработки, создания новой и передачи информации, может функционировать на основе всех этих 3-х компонентов.

Важное значение имеет мнение С.В. Зенина (2004) о том, что следует различать первичную память воды в виде преобразованной матрицы структурных элементов в ячейке с выводом на поверхность ячейки граней, отображающих рисунок заряда воздействующего соединения, и долговременный «след» воздействия вещества на структурированное состояние воды, когда после многократного согласования информационной передачи между веществом и водой устанавливается окончательно преобразованная матрица структурных элементов в ячейке воды. Это является существенным дополнением к нашим знаниям о деятельности мозга.

Это позволяет объяснить удивительные доказательства информационных свойств воды, показанных японским исследователем Масару Эмото (Masaru Emoto) на примере образования при замерзании образцов воды различных видов кристаллов, форма которых определяется предшествующим воздействием на воду. Согласно его воззрениям, в основе любой вещи лежит источник энергии – вибрационная частота, волна резонанса (определённая волна колебаний электронов атомного ядра). Если учесть, что сознание человека скорее всего определяется квантово-волновыми процессами (К.М. Резников и др., 2003), то вполне понятным становится заключение доктора Эмото о том, что «все вещи лежат в пределах нашего собственного сознания».

Вот какое интересное вещество – вода; вода, без которой невозможно жить; вода, способная хранить “генетическую информацию”.

Список литературы:

- 1. С.В.Зенин, Б.М.Полануер, Б.В.Тяглов. Экспериментальное доказательство наличия фракций воды. Ж. Гомеопатическая медицина и акупунктура. 1997. №2. С.42-46.*
- 2. С.В.Зенин, Б.В.Тяглов. Гидрофобная модель структуры ассоциатов молекул воды. Ж.Физ.химии.1994.Т.68.№4.С.636-641.*
- 3. С.В.Зенин Исследование структуры воды методом протонного магнитного резонанса. Докл.РАН.1993.Т.332.№3.С.328-329.*

4. С.В.Зенин, Б.В.Тяглов. *Природа гидрофобного взаимодействия. Возникновение ориентационных полей в водных растворах. Ж.Физ.химии.1994.Т.68.№3.С.500-503*
5. С.В.Зенин, Б.В.Тяглов, Г.Б.Сергеев, З.А.Шабарова. *Исследование внутримолекулярных взаимодействий в нуклеотидамидах методом ЯМР. Материалы 2-й Всесоюзной конф. По динамич. Стереохимии. Одесса.1975.с.53.*
6. С.В.Зенин. *Структурированное состояние воды как основа управления поведением и безопасностью живых систем. Диссертация. Доктор биологических наук. Государственный научный Центр «Институт медико-биологических проблем» (ГНЦ «ИМБП»). Защищена 1999. 05. 27. УДК 577.32:57.089.001.66.207 с.*
7. В.И.Слесарев. *Отчет о выполнении НИР по теме: «Воздействие фрактально-матричных транспарантов «Айрес» на характеристики структурно-информационного свойства воды». Санкт-Петербург. 2002.*
8. С.В.Зенин, М.Ф.Меркулов, Д.Г.Мирза. *Исследование медико-биологических свойств матричных аппликаторов «Айрес». Результаты апробации матричных аппликаторов «Айрес». СПб,2000.с.14-21.*
9. Масару Эмото. *Послания воды: Тайные коды кристаллов льда. Перев. с англ. М. ООО Издательский дом «София».2005.*
10. Резников К.М. *Вода жизни //Прикладные информационные аспекты медицины. – 2001. – Т.4. - №2. С.3-10*

ВОДА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Существует много технологий получения структурированной воды: омагничивание, замораживание с последующим таянием, процесс электролитического разделения воды на анолит («мертвая» вода) и католит («живая» вода), после чего образуется вода с новыми для нее свойствами, которые появляются не за счет химических воздействий, а за счет изменения волновых характеристик.

Но особые свойства вода приобретает в электрическом поле. Явление электрохимической активации воды (ЭХАВ) было открыто в 1975 г. ЭХАВ –

совокупность электрохимического и электрофизического воздействия на воду в двойном электрическом слое (ДЭС) электрода (либо анода, либо катода) электрохимической системы при неравновесном переносе заряда через ДЭС электронами и в условиях интенсивного диспергирования в жидкости образующихся газообразных продуктов электрохимических реакций. В результате электрохимической активации вода переходит в метастабильное состояние, которое характеризуется аномальными значениями активности электронов и других физико-химических параметров (В.М. Бахир и др., 2001).

Если через воду протекает постоянный электрический ток, то поступление в воду у катода, так же как и удаление электронов из воды у анода, сопровождается серией электрохимических реакций на поверхности катода и анода. В результате образуются новые вещества, изменяется система межмолекулярных взаимодействий, в том числе структура воды как раствора. Получают такую воду с помощью диафрагменного проточного электрохимического реактора (СТЭЛ), включающего в свой состав специальную мембрану (диафрагму), разделяющую воду, находящуюся у катода и воду, находящуюся у анода. Состав электродов (анода и катода) таков, что они могут обмениваться только электронами.

В результате катодной (католит) обработки вода приобретает щёлочную реакцию, её ОВП снижается, уменьшается поверхностное натяжение, снижается количество растворённого кислорода и азота, возрастает концентрация водорода, свободных гидроксильных групп, уменьшается электропроводность, изменяется структура не только гидратных оболочек ионов, но и свободного объёма воды.

При анодной (анолит) электрохимической обработке кислотность воды увеличивается, ОВП возрастает, несколько уменьшается поверхностное натяжение, увеличивается электропроводность, возрастает количество растворённого кислорода, хлора, уменьшается концентрация водорода, азота, изменяется структура воды (Бахир В.М., 1999).

Электрохимически активированные растворы, полученные в специальных установках, в зависимости от силы пропускаемого тока могут быть нескольких видов (Б.И. Леонов, В.М.Бахир, В.И.Вторенко, 1999):

А - анолит кислотный (рН менее 5, ОВП + 800-1200 мВ), активные компоненты HClO , Cl_2 , HCl , $\text{HO}_2\cdot$;

АН -анолит нейтральный (рН 6, ОВП + 600-900 мВ), активные компоненты HClO , O_3 ,

HO·, HO₂·;

АНК - анолит нейтральный (рН 7,7, ОВП + 250-800 мВ), активные компоненты HClO, ClO⁻, HO₂⁻, H₂O₂-1, O₂, Cl·, HO·;

АНД - анолит нейтральный (рН 7,3, ОВП +700-1100 мВ), активные компоненты HClO, HClO₂·, ClO⁻, ClO₂, HO₂⁻, H₂O₂-1, O₂, O₃, Cl·, HO·, O·.

Анолит имеет рН менее 6, а ОВП +500 - + 1100 мВ. Анолит АНК по параметрам острой токсичности при введении в желудок и нанесении на кожу относится к 4 классу малоопасных веществ по ГОСТ 12.1.007-76 и обладает в данном классе минимальной токсичностью. При ингаляционном введении анолит АНК с содержанием оксидантов 0,02% и общей минерализацией 0,25 -0,35% не оказывает раздражающего действия на органы дыхания и слизистые оболочки глаз. При введении внутрь не оказывает иммунотоксического действия и повышения уровня хромосомных aberrаций в клетках костного мозга и, следовательно, не обладает цитогенетической активностью. При нагревании до 400 С биоцидная активность анолита увеличивается на 30-100% (В.М. Бахир и др., 2001).

К - католит щелочной (рН более 9, ОВП - 700-820 мВ), активные компоненты NaOH, O₂⁻, HO₂⁻, HO₂⁻, OH⁻, OH·, HO₂⁻, O₂²⁻;

КН- католит нейтральный (рН равно или более 9, ОВП - 300-500 мВ), активные компоненты O₂⁻, HO₂⁻, HO₂⁻, H₂O₂, H·, OH·.

Католит имеет рН более 8, а ОВП равным минус 200 – минус 800 мВ. Его антибактериальное действие дифференцированное: бактерицидный эффект проявляется относительно энтеробактерий, устойчивыми к нему являются энтерококки и стрептококки группы В, а в отношении грамотрицательных микроорганизмов - только бактериостатическое. Католит с рН ниже 10,5 и ОВП меньше минус 550 не обладает неблагоприятным действием на организм человека и не вызывает токсического эффекта при применении внутрь (В.В. Торопков и др., 2001).

Католит является раствором с аномально усиленными электронодонорными свойствами и, попадая в кровь человека, усиливает её электронодонорный фон на несколько десятков милливольт. Авторы приводят сведения о механизмах действия католита: ускорение процессов регенерации за счёт стимуляции синтеза ДНК; иммунокорригирующее действие; усиление детоксицирующей функции печени; стабилизация проницаемости мембран клеток; нормализация энергетического

потенциала клеток; повышение энергообеспечения клеток путём стимуляции и максимального сопряжения дыхания и процессов окислительного фосфорилирования.

В ВГМА используется, выпускаемая промышленностью (ВНИИМТ- НПО ЭКРАН), установка СТЭЛ, имеющая сертификат Санэпиднадзора РФ, которая модернизирована для получения строго стандартных растворов католита и анолита (устройство и способ получения растворов патентуются). В 1985 г ЭХАВ была официально признана ВАК СССР в качестве нового класса физико-химических явлений. Поручением правительства РФ от 15 января 1998 г. № ВЧ-П12-01044 даны рекомендации министерствам и ведомствам использовать указанные технологии в медицине, сельском хозяйстве, промышленности.

На основании материалов, опубликованных в сборника Второго и Третьего Международных симпозиумов «Электрохимическая активация в медицине, сельском хозяйстве, промышленности», монографии Прилуцкого В.И. и Бахира В.М., (1997) можно привести следующие данные о некоторых свойствах и лечебном действии анолита и католита.

Анолит обладает антибактериальным, противовирусным, антимикозным, антиаллергическим, противовоспалительным, противоотёчным, противозудным и подсушивающим действием, может оказывать цитотоксическое и антиметаболическое действие, не причиняя вреда клеткам тканей человека. Биоцидные вещества в электрохимически активированном анолите, не являются токсичными для соматических клеток, поскольку представлены оксидантами, подобными тем, которые продуцируют клетки высших организмов (В.М. Бахир и др., 2001).

Католит обладает антиоксидантными, иммуностимулирующими, детоксицирующими свойствами, нормализует метаболические процессы (повышение синтеза АТФ, изменение активности ферментов), стимулирует регенерацию тканей (повышает синтез ДНК и стимулирует рост и деление клеток за счёт увеличения массопереноса ионов и молекул через мембраны), улучшает трофические процессы и кровообращение в тканях.

В медицине электроактивированные растворы как анолиты, так и католиты находят достаточно широкое применение. Наиболее широко известно применение анолитов с целью дезинфекции и стерилизации инструментов, помещений, аппаратуры, предметов ухода, кожи и слизистых и т.д., а также для лечения гнойных ран. Испытание анолитов (АН и АНК) показало, что они при экспозиции 5-10 мин для

полоскания полости рта снижают обсемененность микроорганизмами полости рта и глотки в 25-100 раз (В.В.Торопков с соавт., 1999), что подтверждается успешным применением их для полосканий при заболеваниях зева (Л.Г.Баженов с соавт., 1999). Использование смоченных в анолите салфеток позволяет полностью очистить раневые полости при огнестрельных ранах, флегмонах, абсцессах, трофических язвах, маститах, обширных гнойно-некротических поражениях подкожной клетчатки за 3-5 дней, а последующее применение католита в течение 5-7 дней существенно ускоряет репаративные процессы. Имеются также данные о высокой лечебной эффективности электроактивированных растворов при неспецифических и кандидозных кольпитах, эндоцервицитах, резидуальных уретритах, эрозии шейки матки, язвах роговицы, гнойных кератитах, инфицированных ранах кожи век, при коррекции дисбактериоза и иммунных нарушений; при лечении стоматитов, гингивитов, парадонтитов; при заболеваниях желудка; при лечении сальмонеллёза, дизентерии, а также при лечении сахарного диабета, тозиллитов, гнойных отитов, жирной и сухой себореи лица, выпадения волос, контактных алергодерматитов, коррекции морщин. Хороший эффект выявлен при применении католита при гастритах, язвенной болезни желудка, геморрое, дерматомикозе, экземе, аденоме предстательной железы и хроническом простатите, тонзиллите, бронхите, хроническом пиелонефрите, хроническом гепатите, вирусном гепатите, деформирующих артрозах и т.д. (С.А.Алехин, 1997 и др.).

Однако, фармакологических исследований этих растворов, как лекарственных средств, очень мало. Исследования проводятся на кафедре фармакологии Воронежской медицинской академии. В ВГМА установлен ряд других лечебных эффектов электроактивированных водных растворов, изучена токсичность и продолжаются исследования их влияния на сердечно-сосудистую систему, систему крови и кроветворение (А.С. Никитский, Л.И. Трухачёва), на ЦНС (Е.А. Семенова, Е.Д.Сабитова), на двигательную сферу (Н.М. Парфёнова, Ю.Н. Гостева) мочеполовую систему и водно-солевой обмен (Ю.А. Левченко, А.Л. Фатеев) систему пищеварения, дыхания (А.С. Никитский), органы репродукции (А.Д. Брездынюк), состояние зубочелюстной системы (Д.А. Кунин, Ю.Н. Криницына, Н.В. Скурятин), а также при лечении хирургических заболеваний (П.И. Кошелев, А.А. Гридин), психических заболеваний (О.Ю. Ширяев) и др.

Можно также использовать электроактивированные водные растворы в сельском хозяйстве: в животноводстве (профилактика болезней молодняка) и полеводстве (повышение урожайности). Одним из положительных свойств этих растворов является

их дешевизна (2 рубля за литр) и экологичность.

Одним из важных компонентов применения электроактивированных водных растворов является то, что в них отсутствуют информационные характеристики прошлых воздействий на воду и поэтому они не могут ухудшить физиологические процессы организма. Лечебные элементы складываются для анолита, из-за его выраженного противомикробного, противовирусного и противогрибкового действия, что сопровождается противовоспалительным, противоотечным, противоспаечным эффектами.

Литература

Батмангхелидж Ф. Вода для здоровья. / Минск: Попурри, 2004.

Батмангхелидж Ф. Ваше тело просит воды. / Минск: Попурри, 2004.

Бабцова Н.Ф., Комаров И.Ф. Опыт использования установки СТЭЛ в хирургическом отделении. Второй международный симпозиум. Электрохимическая активация. Тез. докладов и краткие сообщения. ч.1. 1999. - С.131-132.

Бахир В.М. Теоретические аспекты электрохимической активации. Второй международный симпозиум. Электрохимическая активация. Тез. докладов и краткие сообщения. ч.1. 1999. С.39-49.

Герловин И.Л. Основы единой теории всех взаимодействий в веществе / Ленинград: Энергоатомиздат. – 1990. – 432 с.

Зенин С.В. Исследование структуры воды методом протонного магнитного резонанса. // Докл. РАН. 1993. Т.332, №3. С. 328.

Зенин С.В., Тяглов Б.В. Гидрофобная модель структуры ассоциатов молекул воды // Журн. физ. Химии, 1994, Т.68. - №4. – С.636.

Зенин С.В., Тяглов Б.В. Природа гидрофобного взаимодействия. Возникновение ориентационных полей в водных растворах. //Журн. физ. Химии, 1994, Т. 68, №3.- С.500.

Зенин С.В., Полануер Б.М., Тяглов Б.В. Экспериментальное доказательство фракций воды.// Журн. «Гомеопатическая медицина и акупунктура», 1998. -№2. –

С.41.

Зенин С.В. Вода. 2003. – 48 с.

Леонов Б.И., Бахир В.М., Вторенко В.И. Электрохимическая активация в практической медицине. / Второй Международный симпозиум "Электрохимическая активация"// Тез. докл. и краткие сообщения. Ч.1.- М.- 1999. С.15-23.

Онищенко Г.Г. Вода и здоровье // Экология и жизнь, 1999, №4.

Резников К.М. Вода жизни // Прикладные информационные аспекты медицины. – 2001. – Т.4. - №2. С.3-10.

Резников К.М., Ширяев О.Ю., Резников М.К. К вопросу о квантово-волновых механизмах психосоматической патологии // Актуальные вопросы психиатрии, наркологии и медицинской психологии. Выпуск 5. Воронеж: Издательство Казачий хутор «Муромский». – 2003. -С. 148-151.

Резников К.М. Добро и зло в зеркале качества здоровья // Прикладные информационные аспекты медицины. – 2004. –Т.-7. -№1. –С.3-10

Резников К.М. Двухкомпонентная модель процессов восстановления структуры и функции при патологии // Прикладные информационные аспекты медицины. – 2005. – Т.8 - № 1-2, С. 3-7.

Торопков В.В.Альтшуль Э.Б., Пересыпкин О.И. Фармакологическая эффективность действия анолитов АН и АНК на слизистые оболочки ротовой полости / Второй Международный симпозиум "Электрохимическая активация"// Тез. докл. и краткие сообщения. Ч.1.- М.- 1999. С.93-95.

Торопков В.В., Альтшуль Э.Б., Торопкова Е.В. Токсикологическая характеристика препарата католит / Третий Международный симпозиум "Электрохимическая активация"// Доклады и краткие сообщения. М.- 2001. С. 57-62.

Черников Ф.Р., Бахир В.М., Дмитриев Н.Н., Кожемякин А.М. Физические способы коррекции динамической структуры воды / Третий Международный симпозиум "Электрохимическая активация"// Доклады и краткие сообщения. М.- 2001. С.46-50.

Алехин С.А., Байбеков И.М, Гариб Ф.Ю., Гительман Д.С. и др. «Живая» вода –

ДЕЙТЕРИЙ. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ

Дейтерий (тяжелый водород) – один из двух стабильных изотопов водорода, ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона. Молекула дейтерия двухатомна. Содержание в природном водороде – 0,012–0,016%. Температура плавления – 254,5° С, температура кипения – 249,5° С. Тяжелая вода (оксид дейтерия) – изотопная разновидность воды; плотность 1,1, температура плавления – 3,8° С, температура кипения – 101,4° С.

В 1932 одно за другим следовали выдающиеся открытия в области физики: были открыты нейтрон и позитрон, разработана протоно-нейтронная теория строения ядер и релятивистская квантовая механика, построен первый циклотрон и изобретен электронный микроскоп, проведена первая реакция ядерного синтеза, экспериментально измерена скорость движения молекул. Недаром физики назвали этот год *anno mirabilis* – год чудес. В этом же году был открыт и второй изотоп водорода, названный дейтерием (от греческого *deuteros* – второй, символ D).

Но что нового можно обнаружить в обычной воде? В начале XIX века лондонский врач и химик Уильям Праут выдвинул гипотезу, согласно которой из самого легкого элемента – водорода могли возникнуть все остальные элементы путем конденсации. В этом случае атомные массы всех элементов должны быть кратны массе атома водорода. Определения атомных масс, которые оказались дробными, эту гипотезу не подтвердили, и химики часто осмеивали её как лишённую научного содержания.

В 1917 немецкий ученый К. Шерингер предположил, что атомы разных элементов построены не только из протия (от греческого *protos* – первый), т.е. «легкого» водорода с атомной массой 1, а из разных изотопов водорода. К тому времени уже было известно, что один и тот же элемент может иметь изотопы с разной массой.

Больших успехов в открытии изотопов нерадиоактивных элементов достиг английский физик Фрэнсис Уильям Астон с помощью сконструированного им масс-спектрографа. В этом приборе изучаемые атомы или молекулы бомбардируются пучком электронов и

превращаются в положительно заряженные ионы. Пучок этих ионов далее подвергается действию электрического и магнитного поля, и их траектории отклоняются от прямой. Это отклонение тем сильнее, чем больше заряд иона и чем меньше его масса. Из значений отклоняющих напряжений непосредственно получают относительные массы ионов. А из интенсивности пучка ионов с данной массой можно судить об относительном содержании в образце этих ионов.

Гипотеза Шерингера предполагала, что и у самого легкого элемента – водорода тоже могут быть изотопы. Однако попытки обнаружить тяжелый водород, предпринятые в 1919 Отто Штерном и Максом Фольмером, оказались безуспешными. Не удалось обнаружить его и Астону. Это означало одно из двух: либо у водорода тяжелого изотопа вовсе нет, либо его содержание в природном водороде слишком мало и чувствительности имевшегося в распоряжении Астона прибора недостаточно для его обнаружения. Правильным оказалось второе предположение, однако тяжелый водород прятался от исследователей в течение еще многих лет, маскируясь под ошибки эксперимента.

В 1927 Астон очень точно для того времени измерил отношение масс атомов водорода и кислорода-16; у него получилось 1,00778:16,0000, что, казалось, находится в прекрасном соответствии с результатами самых точных измерений атомной массы водорода химическим путем: у химиков это отношение получалось равным 1,00777:16,0000. Однако единодушие физиков и химиков было недолгим: оказалось, что природный кислород, с которым работали химики, – плохой эталон для измерения атомных масс, поскольку кислород представляет собой смесь изотопов, причем их относительное содержание в разных источниках не вполне постоянно. Точные измерения в начале 30-х соотношения $18\text{O}:16\text{O} = 1:630$ существенным образом изменили все прежние расчеты и данные об атомных массах. Пришлось в срочном порядке отказываться от «химической» шкалы атомных масс и переходить на «физическую» шкалу, основанную на кислороде-16. Такой пересчет данных химических анализов дал отношение масс $\text{H}:16\text{O} = 1,00799:16,0000$, что уже заметно отличалось от измерений Астона. Кто же ошибся – физики или химики, выполнившие определения атомных масс? И те и другие ручались за точность своих определений, расхождение в результатах далеко выходило за пределы экспериментальных ошибок.

В 1931 было высказано предположение о том, что причина небольшого расхождения – наличие в обычном водороде более тяжелого изотопа. Расчеты показали, что расхождение

устраняется в том случае, если на 5000 атомов обычного водорода приходится всего один атом его вдвое более тяжелой разновидности атомов дейтерия. Дело оставалось за малым – обнаружить этот изотоп экспериментально. Но как это сделать, если его действительно так мало? С учетом чувствительности имевшейся в то время аппаратуры выход был один: сконцентрировать тяжелый водород, увеличив тем самым его содержание в обычном водороде, – примерно так же, как концентрируют спирт, перегоняя его смесь с водой. Если перегонять смесь обычного и тяжелого водорода, остаток должен обогащаться более тяжелым изотопом. После этого можно было снова попытаться обнаружить тяжелый изотоп водорода аналитически.

В конце 1931 группа американских физиков – Гарольд Юри со своими учениками, Фердинандом Брикведде и Джорджем Мерфи, взяли 4 л жидкого водорода и подвергли его фракционной перегонке, получив в остатке всего 1 мл, т.е. уменьшив объем в 4 тысячи раз. Этот последний миллилитр жидкости после ее испарения и был исследован спектроскопическим методом. Талантливый спектроскопист Гарольд Клейтон Юри заметил на спектрограмме обогащенного водорода новые очень слабые линии, отсутствующие у обычного водорода. При этом положение линий в спектре точно соответствовало проведенному им квантово-механическому расчету предполагаемого атома дейтерия. Соотношение интенсивностей линий нового изотопа (Юри назвал его дейтерием) и обычного водорода показало, что в исследованном обогащенном образце нового изотопа в 800 раз меньше, чем обычного водорода. Значит, в исходном водороде тяжелого изотопа еще меньше. Но насколько?

Пытаясь оценить так называемый коэффициент обогащения при испарении жидкого водорода, исследователи поняли, что в своих опытах использовали самый неподходящий источник водорода. Дело в том, что он был получен, как обычно, путем электролиза воды. А ведь при электролизе легкий водород должен выделяться быстрее, чем тяжелый. Получается, что образец был сначала обеднен тяжелым водородом, а затем снова обогащался им!

После того, как дейтерий был обнаружен спектроскопически, Эдвард Уошберн предложил разделять изотопы водорода электролизом. Эксперименты показали, что при электролизе воды легкий водород действительно выделяется быстрее, чем тяжелый. Именно это открытие стало ключевым для получения тяжелого водорода. Статья, в которой сообщалось об открытии дейтерия, была напечатана весной 1932, а уже в июле были

опубликованы результаты по электролитическому разделению изотопов. В 1934 за открытие тяжелого водорода Юри была присуждена Нобелевская премия по химии. (Уошберн тоже был представлен к премии, но скончался в том же году, а по положению о Нобелевских премиях они вручаются только прижизненно.)

Когда был открыт нейтрон, стало ясно, что в ядре дейтерия, в отличие от протия, помимо протона находится также нейтрон. Поэтому ядро дейтерия – дейтрон вдвое тяжелее протона; его масса в углеродных единицах равна 2,0141018. В среднем в природном водороде содержится 0,0156% дейтерия. В прибрежной морской воде его немного больше, в поверхностных водах суши – меньше, в природном газе – еще меньше (0,011–0,013%). По химическим свойствам дейтерий схож с протием, но огромное различие в их массах приводит к заметному замедлению реакций с участием атомов дейтерия. Так, реакция дейтерированного углеводорода R–D с хлором или кислородом замедляется, в зависимости от температуры, в 5–10 раз по сравнению с реакцией R–H. С помощью дейтерия можно «пометить» водородсодержащие молекулы и изучить механизмы их реакций. Так, в частности, были изучены реакции синтеза аммиака, окисления углеводородов, ряд других важных процессов.

Роль дейтерия в молекулярной ЭВОЛЮЦИИ

Учёные считают, что Вселенная, сформировавшаяся в результате “Большого взрыва” несколько десятков миллиардов лет тому назад, была значительно горячее и плотнее, чем сейчас и состояла, в основном, из двух элементов – водорода и гелия. Дейтерий сформировался в последующие мгновения эволюции Вселенной в результате столкновения свободного нейтрона и протона при температурах миллион градусов Цельсия. А ещё позже два атома дейтерия сформировали дейтерон и вошли в состав в ядро гелия, который состоит из двух протонов и двух нейтронов.

Таким образом, дейтерий может служить своеобразным индикатором эволюции Вселенной, поскольку количество дейтерия в мире постоянно. Вплоть до настоящего времени считалось, что в процессе формирования гелия израсходовались почти все

дейтероны, и лишь 10 тысяч дейтеронов остались неизрасходованными. Исходя из этого количества дейтерия в мире, природная распространённость дейтерия составляла по расчётам не более 0.015% (от общего числа всех атомов водорода)

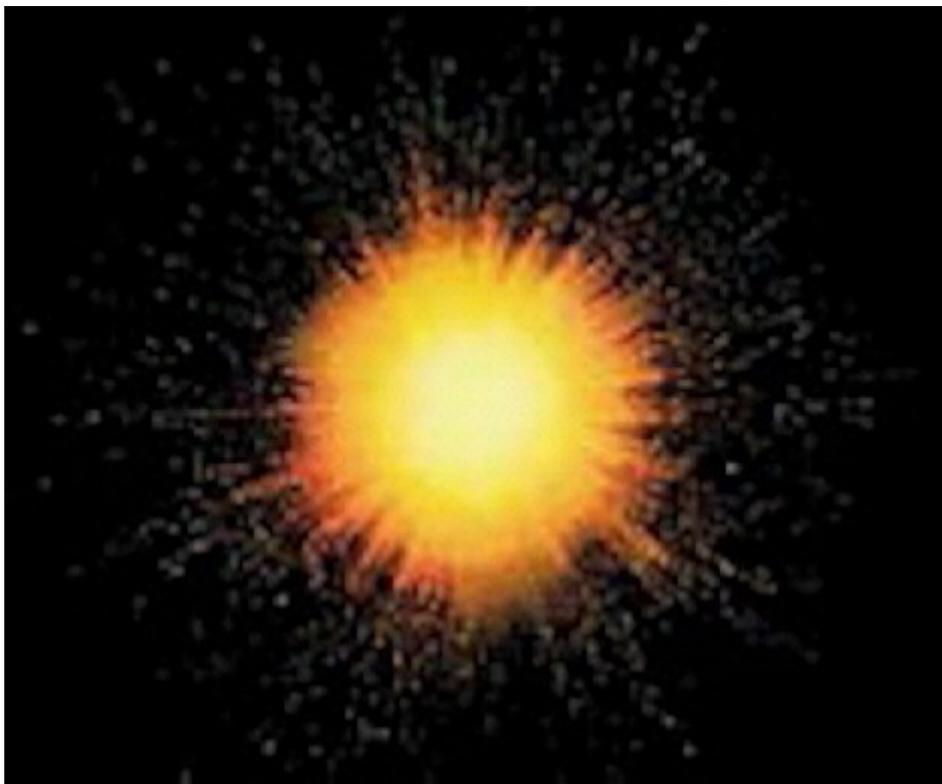


Рис. “Большой взрыв”

Совсем недавно проводя наблюдения Млечного Пути, американские учёные обнаружили что дейтерия — тяжёлого водорода – содержится в нём значительно больше, чем об этом говорили данные предыдущих исследований. По мнению астронома Джеффри Лински (Jeffrey L. Linsky) из университета Колорадо (University of Colorado), руководившего исследованием, эта новая информация может радикальным образом изменить теоретические положения о формировании звёзд и галактик.

Тяжёлый водород "прятался" от телескопов за скоплениями межзвёздной пыли и часто был недоступен для наблюдений в силу своей непрозрачности.

Астрономы использовали данные ультрафиолетового телескопа FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer). Дейтерий создаёт характерное свечение в ультрафиолетовом диапазоне, благодаря которому разглядеть тяжёлый водород удалось именно с помощью FUSE.

До настоящего времени считалось, что природная распространённость дейтерия составляет не более 0.015% (от общего числа всех атомов водорода). Это количество зависит как от природы вещества, так и от общего количества материи, сформированной в ходе эволюции Вселенной. Теперь очевидно, что дейтерия в природе намного больше, чем предполагалось ранее.

Но с чем это может быть связано? Источником дейтерия во Вселенной являются вспышки сверхновых и термоядерные процессы, идущие внутри звёзд. Возможно этим объясняется тот факт, что мировое количество дейтерия повышается в период глобальных потеплений и изменений климата. Однако дейтерий довольно быстро разрушается в этих звёздах.

Дело в том, что наряду с водородом в первые мгновения после Большого взрыва образовалось и огромное количество его изотопа дейтерия. Исходя из предыдущих наблюдений, учёные постановили, что больше трети первоначально образованного дейтерия потратилось на создание звёзд. Однако, оказывается, что дейтерия в Млечном

Пути намного больше, чем предполагали ранее. В частности, на звездообразование потрачена не треть, а всего 15% изотопа и он распределён неравномерно.

В частности, эти данные могут говорить о том, что для формирования звёзд требовалось значительно меньше водорода, превратившегося затем в гелий. Так же это может оказаться существенным основанием для пересмотра теории эволюции галактик и звёзд. Если это так, то необходимо также пересмотреть теорию молекулярной эволюции и эволюции жизни на нашей планете, поскольку жизнь напрямую связана с водой и зарождалась в ней. Но была ли это обычная вода? Ещё 10 лет тому назад автор этой статьи, будучи аспирантом Московской государственной академии тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова в группе академика РАМН В. И. Швеца выдвинул смелое предположение, что первичный “первобытный бульон”, в котором зарождалась жизнь в виде первых коорцерватов, был насыщен тяжёлой водой вследствие того, что в атмосфере Земли не было защитного озонового слоя и вулканические геотермальные и электрические процессы в горячей атмосфере, насыщенной водой могли привести к обогащению гидросферы тяжёлой водой. Но тогда мало кто из учёных увлёкся этой идеей, хоть и напрямую никто не отверг её. И только сейчас стало очевидным, что учёные пренебрегали дейтерием в своих расчётах.

Если это так, то необходимо заново пересмотреть эволюцию всего живого на нашей планете, чтобы смоделировать и предсказать дейтерированные формы жизни. Тем более, что их можно легко создать в современных условиях – макромолекулы ДНК, белков, липидов и сахаров – вот те главные компоненты для конструирования дейтерированных мембран и изучения гидрофобных взаимодействий между дейтерированными молекулами. Отдельный вопрос – генетика дейтерированных клеток и изучение распределения наследственного аппарата, а также физиология, цитология и морфология клетки при росте на тяжёлой воде.

Модели дейтерированных систем довольно легко прогнозировать и конструировать в лабораторных условиях. Нами были получены адаптированные к тяжёлой воде штаммы бактерий, относящиеся к различным таксономическим группам. Характерной особенностью объектов являлось то, что весь биологический материал клетки вместо природного водорода содержал дейтерий.

Дейтерированные клетки адаптированных к максимальной концентрации тяжёлой воды в среде – весьма удобные объекты для исследования. В процессе роста клеток на тяжёлой воде в них синтезируются макромолекулы, в которых атомы водорода в углеродном скелете полностью замещены на дейтерий. Такие дейтерированные макромолекулы претерпевают структурно-адаптационные модификации, необходимые для нормального функционирования клетки в тяжёлой воде. Но эти изменения не единственны; физиология, морфология, цитология клетки, а также генетический аппарат клетки также подвергается воздействию и модификации в тяжёлой воде. Присутствие дейтерия в биологических системах приводит к изменениям структуры и свойствам жизненно-важных макромолекул таких как дезоксирибонуклеиновые кислоты (ДНК) и белки. При этом различают первичные и вторичные изотопные эффекты дейтерия в зависимости от того, какое положение занимает атом дейтерия в молекуле. Наиболее важными для структуры макромолекулы связи являются водородные (дейтериевые) связи. Они формируются между соседними атомами дейтерия (водорода) и гетероатомами кислорода, углерода, азота, серы и т.д. и играют главную роль в определении структуры макромолекулярных цепей и как эти структуры взаимодействуют с другими соседними макромолекулярными структурами, а также с тяжёлой водной окружающей среды. Другое важное свойство определяется самой пространственной структурой тяжёлой воды, которая имеет тенденцию сближать гидрофобные группы макромолекулы, чтобы минимизировать их эффект на водородную (дейтериевую) связь в присутствии молекул тяжёлой воды. Конформация двойной спирали макромолекулы ДНК и макромолекул белков изменяются в присутствии тяжёлой воды так, чтобы макромолекулы обычных белков, помещённые в тяжёлую воду имеют более устойчивую пространственную структуру за счёт вторичных изотопных эффектов тяжёлой воды. Вероятно, именно поэтому тяжёлая вода проявляет стабилизирующий эффект на пространственную структуру спирали

макромолекул посредством формирования многочисленных непостоянных маложивущих легкообмениваемых на водород (дейтерий) водородных связей с карбоксильными, карбонильными, гидроксильными, сульфидными и amino группами макромолекул. В то время как ковалентные связи атома дейтерия с углеродом C-2H могут синтезироваться в молекулах только *de novo*, т.е. в процессе биосинтеза. И эти связи приводят к дестабилизации дейтерированных молекул. Серьезное изменение в биохимии клетки связано в её способности делиться в присутствии тяжёлой воды. Тяжёлая вода замедляет скорость деления клетки (митоз) в стадии профазы и особенно этот эффект выражен для быстро делящихся клеток. Этот эффект пропорционален концентрации тяжёлой воды в среде.

Вероятно, клетка реализует лабильные адаптивные механизмы, которые способствуют функциональной реорганизации работы жизненно-важных систем в тяжёлой воде. Так, например, нормальному биосинтезу и функционированию в тяжёлой воде таких биологически активных соединений, как нуклеиновые кислоты и белки способствует поддержание их структуры посредством формирования водородных (дейтериевых) связей в молекулах. Связи, сформированные атомами дейтерия различаются по прочности и энергии от аналогичных водородных связей. Различия в нуклеарной массе атома водорода и дейтерия косвенно могут служить причиной различий в синтезах нуклеиновых кислот, которые могут приводить в свою очередь к структурным различиям и, следовательно, к функциональным изменениям в клетке.

Ферментативные функции и структура синтезируемых белков также изменяются при росте клеток на тяжёлой воде, что может отразиться на процессах метаболизма и деления клетки. Некоторые исследователи сообщают, что после обратного изотопного (^1H - ^2H)-обмена ферменты не прекращают своей функции, но изменения в результате изотопного замещения за счет первичного и вторичного изотопных эффектов, а также действие тяжёлой воды как растворителя (большая структурированность и вязкость по сравнению с обычной водой) приводили к изменению скоростей и специфичности ферментативных реакций в тяжёлой воде.

В общих чертах, при попадании клетки в дейтерированную среду из неё не только исчезает протонированная вода за счет реакции обмена вода-тяжёлая вода, но и происходит очень быстрый изотопный (^1H - ^2H)-обмен в гидроксильных, карбоксильных, сульфгидрильных и аминогруппах всех органических соединений, включая нуклеиновые кислоты, липиды, белки и сахара. Известно, что в этих условиях только C-H связь не подвергается изотопному обмену и вследствие этого только соединения со связями типа C- ^2H могут синтезироваться *de novo*.

Возможно эффекты, наблюдаемые при адаптации к тяжёлой воде связаны с образованием в тяжёлой воде конформаций молекул с иными структурно-динамическими свойствами, чем конформаций, образованных с участием водорода, и поэтому имеющих другую активность и биологические свойства. Так, по теории абсолютных скоростей разрыв C ^2H -связей может происходить быстрее, чем C-H-связей, подвижность иона $^2\text{H}^+$ меньше, чем подвижность H^+ , константа ионизации тяжёлой воды несколько меньше константы ионизации обычной воды. С точки зрения физиологии, наиболее чувствительными к замене H^+ на $^2\text{H}^+$ могут оказаться аппарат биосинтеза макромолекул и дыхательная цепь, т. е., именно те клеточные системы, которые используют высокую подвижность протонов и высокую скорость разрыва водородных связей.

Учёным предстоит ещё много работы в этом направлении. Но первый шаг уже сделан - мы научились получать клетки различных микроорганизмов, адаптированные к росту на максимальной тяжёлой воде, которые будучи полностью дейтерированными являются уникальными объектами для изучения молекулярной эволюции.

Литература.

1. Мосин О. В., Карнаухова Е. Н., Пиеничникова А. Б., Складнев Д. А., Акимова О. Л. // Биотехнология. - 1993. - N 9. - С. 16-20.
2. Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Юркевич А. М., Швец В. И. // Биотехнология. - 1996. - N 3. - С. 3-12.
3. Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Юркевич А. М., Швец В. И. // Биотехнология. - 1996. - N 4. - С. 27-35.
4. Складнев Д. А., Мосин О. В., Егорова Т. А., Ерёмин С. В., Швец В. И. // Биотехнология. - 1996. - N 5. - С. 25-34.
5. Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Швец В. И. // Биоорганическая химия. - 1996. - Т. 22. - N 10-11. - С. 856-869.

Тяжёлая вода и рак

Из существующих изотопов водорода в природе преобладает изотоп с массой 1 (протий). Другой стабильный изотоп с массой 2, дейтерий, встречается довольно редко и составляет всего 0,015%. Третий изотоп, имеющий массу 3 (тритий), нестабилен и находится в природе в таких малых количествах, что его можно считать искусственным изотопом. Одно из наиболее важных отличий протия (H) и дейтерия (D) - разница в массах, поэтому химические связи дейтерия более стабильны, и для их разрыва требуется большая энергия, что сказывается на скорости химических реакций. По этой причине в тяжелой дейтериевой воде растворимость солей и газов меньше, чем в обычной. Тяжелая вода имеет большую вязкость, иную проводимость и другие особенности. Разумеется, и по биологическим свойствам тяжёлая вода несколько отличается.

Российские исследователи давно обнаружили, что тяжелая вода тормозит рост бактерий, водорослей, грибов, высших растений и культуры тканей животных. А вот вода со сниженной до 50% концентрацией дейтерия (так называемая "бездейтериевая" вода) обладает антимутагенными свойствами, способствует увеличению биомассы и количества семян, ускоряет развитие половых органов и стимулирует сперматогенез у птиц.

За рубежом пробовали поить тяжелой водой мышей со злокачественными опухолями. Та вода оказалась по настоящему мертвой: и опухоли губила, и мышей. Российские исследователи взялись за "облегченную" воду.

Эксперименты проводили на 3 моделях перевиваемых опухолей: карцинома легких Льюис, быстро растущая саркома матки и рак шейки матки, который развивается медленно. "Бездейтериевую" воду исследователи получали по технологии, разработанной в Институте космической биологии. В основе метода лежит электролиз дистиллированной воды. В опытных группах животные с перевитыми опухолями получали воду с пониженным содержанием дейтерия, в контрольных группах - обычную. Животные начали пить "облегченную" и контрольную воду в день перевивки опухоли и получали ее до последнего дня жизни.

Вода с пониженным содержанием дейтерия задерживает появление первых узелков на месте перевивки рака шейки матки. На время возникновения узелков других типов опухоли облегченная вода не действует. Но во всех опытных группах, начиная с первого дня измерений и практически до завершения эксперимента, объем опухолей был меньше, чем в контрольной группе. К сожалению, хотя тяжёлая вода и тормозит развитие всех исследованных опухолей, жизнь экспериментальным мышам она не продлевает.

Загадочный дейтерий и его свойства

ДЕЙТЕРИЙ (от греческого deuterios-второй) (тяжелый водород) D, стабильный изотоп водорода с нуклеарной массой 2 ат. ед.

Ядро атома дейтерия - дейтерон состоит из одного протона и одного нейтрона, причём энергия связи между ними равна 2,23 МэВ.

Поперечное сечение ядерной реакции (n, \square) $53 \cdot 10^{33} \text{ м}^2$, поперечное сечение захвата тепловых нейтронов дейтеронами $15 \cdot 10^{32} \text{ м}^2$ (для протонов $3 \cdot 10^{29} \text{ м}^2$). Молекула двухатомна, длина связи 0,07417 нм; основная частота колебаний атомов в молекуле $3118,46 \text{ см}^{-1}$; энергия диссоциации 440 кДж/моль, константа диссоциации $K = p_D^2/p_{D_2} = 4,173 \cdot 10^{73}$ (293,15 К). С другими изотопами водорода дейтерий образует молекулы протодейтерия HD (мол. м. 3,02205) и дейтеротрития DT (мол. м. 5,03034). В прибрежной морской воде соотношение D/(D + H) составляет $(155-156) \cdot 10^6$, в поверхностных водах - $(132-151) \cdot 10^6$, в природном газе - $(110-134) \cdot 10^6$.

Свойства. Коэффициент сжимаемости дейтерия (pV/RT) при 273,15 К: 1,0121 (2,0266 МПа), 1,0624(10,133 МПа), 1,130(20,266 МПа). C° [в Дж/(моль.К)]: 20,81 (20 К), 30,11 (100 К), 29,30 (298 К); теплопроводность 0,135 Вт/(м.К) (25 К); \square $1,23 \cdot 10^2 \text{ мПа.с}$ (293,15 К).

Дейтерий растворяется в жидкостях (например, в бензоле, толуоле, октане, гептане, CCl_4 , CS_2) лучше, чем газообразный водород, причем это различие возрастает с понижением температуры.

Молекула дейтерия может находиться в орто- и пара-состояниях. Ортодейтерий ($o-D_2$) имеет параллельную (одного знака) ориентацию ядерных спинов, а парадейтерий ($p-D_2$) - антипараллельную. Это обуславливает различие магнитных, оптических и термических свойств различных модификаций дейтерия. При обычных условиях дейтерий (нормальный Д., $n-D_2$) представляет собой смесь $2/3$ орто- и $1/3$ пара-модификаций, которые могут взаимно превращаться друг в друга (орто-пара-превращение). Каждой данной конфигурации соответствует определенный равновесный состав (равновесный дейтерий, $r-D_2$). Так, доля $p-D_2$ составляет: 0,333 (при 300 К), 0,251 (60 К), 0,148 (40 К), 0,019 (20 К). При низких температурах термодинамически стабилен $o-D_2$. Самопроизвольное орто-пара-превращение дейтерия при низких температурах происходит очень медленно, что позволяет получить жидкий дейтерий, близкий по составу к нормальному. Орто-пара-превращение ускоряется в присутствии катализаторов (Fe, Cr, Co, Mn, Pd).

Табл. 1. – СВОЙСТВА ДЕЙТЕРИЯ, ПРОТОДЕЙТЕРИЯ И ДЕЙТЕРОТРИТИЯ

Показатель	$n-D_2$	$o-D_2$	$p-D_2$	HD	DT
$t_{крит}$, К	38,35	38,26	–	35,91	39,42
$p_{крит}$, МПа	1,665	1,650	–	1,484	1,773
$T_{крит}$, К	23,67	23,56	37,7	22,14	24,38
Т-ра тройной точки, К	18,73	18,63	18,78	16,60	19,71
$\Delta H_{исп}^0$, Дж/моль	1226,8	–	–	1076	–

Табл. 2. – СВОЙСТВА ЖИДКОГО $n-D_2$

Плотн., г/см ³	γ , Н/м	η , мПа·с	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Т-ра, К
–	$3,567 \cdot 10^{-3}$	0,042	0,126	20
0,1663	$3,131 \cdot 10^{-3}$	0,034	0,130	22
0,1612	$2,694 \cdot 10^{-3}$	0,028	0,134	24

Уравнение температурной зависимости давления пара над твердым и жидким Д.: $\lg 0,0075p$ (Па) = $A - B/T + CT$ (значения A, B и C приведены в табл. 3).

Табл. 3. –ЗНАЧЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ В УРАВНЕНИИ
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ ПАРА D₂

Наименование	Агрегатное состояние	A	B	C
н-D ₂ (66,67% о-D ₂)	жидкий	4,7312	58,4619	0,02671
	твердый	5,1626	68,0782	0,03110
р-D ₂ при 20,4 К (97,8% о-D ₂)	жидкий	4,7367	58,4440	0,02670
	твердый	5,1625	67,9119	0,03102
HD	жидкий	5,04964	55,2495	0,01479
	твердый	4,70260	56,7154	0,04101

Теплота испарения о-D₂ (в Дж/моль): 1202,9 (24,25 К), 1029,5 (30,53 К). Твердый дейтерий имеет тетрагон, объемноцентрированную решетку, $a = 0,338$ нм, $c = 0,560$ нм; т. пл. 18,73 К. Водород и дейтерий не изоморфны, обнаружена их ограниченная взаимная растворимость в твердом состоянии. При 4,2 К предельная растворимость дейтерия в водороде 10% по объему, а растворимость водорода в дейтерии 21%.

По химическим свойствам дейтерий аналогичен водороду, однако скорость реакций при замещении водорода на дейтерий заметно уменьшается, например, при окислении органических соединений водорода с хлором - в 5-10 раз.

При электролизе воды дейтерий выделяется медленнее, чем водород. Важное практическое значение имеют реакции изотопного обмена дейтерия. Константа равновесия реакции $H_2 + D_2 \rightleftharpoons 2HD$ составляет: 1,345 (50 К), 2,903 (200 К), 3,44 (373,15 К), 3,80 (700 К). Осуществляют ее в присутствии катализатора (Pt, Ni). Для реакции $HDO_{(ж)} + D_{2(г)} \rightleftharpoons D_2O_{(ж)} + HD_{(г)}$ (где ж - жидкость, г - газ) константа равновесия: 3,96 (223,15 К), 2,92 (323,15 К), 2,40 (373,15 К). Для р-ции $H_2O_{(ж)} + HD \rightleftharpoons HDO_{(ж)} + H_{2(г)}$ константа равновесия: 4,69 (223,15 К), 3,37 (323,15 К), 2,69 (373,15 К). Изотопный обмен между водой и D₂ или HD может протекать в паровой фазе в присутствии катализаторов (Ni) или в жидкой под давлением (из-за плохой растворимости изотопов водорода в воде) в присутствии катализаторов (в т. ч. гидрофобных) в гомогенной или гетерогенной системе. Некоторые реакции изотопного обмена водорода на дейтерий протекают очень быстро, например, в группах OH (щелочи, спирты) и NH (NH₃, амины).

Важнейшее соединение дейтерия - *тяжелая вода*. Дейтериды соединения, аналогичные гидридам. Большое практическое значение имеет дейтерид лития ⁶LiD – основной компонент заряда термоядерного (водородного) оружия. Для аналитического определения дейтерия применяют масс-спектрометрические, спектральные, хроматографические, а также денсиметрические (путем измерения плотности) методы изотопного анализа.

Получение. Дейтерий выделяют из тяжелой воды, например, электролизом. Дейтерий получают также низкотемпературной ректификацией из водорода или азотоводородной смеси для синтеза NH₃ (водород которой содержит 250-300 м. д. HD). Исходный водород или азото-водородную смесь после тщательной очистки от примесей (O₂ до 10⁹ мольных долей, остальные газы - до 10⁷-10⁸ мольных долей) сжижают и двухступенчатой ректификацией при 22-24 К и обрабатывают HD. Зачем в присутствии катализатора образуется смесь H₂ + D₂ + HD, из которой низкотемпературной ректификацией получают

99,8%-ный газообразный дейтерий. Сжиганием с воздухом или O_2 последний переводят в тяжелую воду.

Применение. Дейтерий в виде тяжелой воды - замедлитель нейтронов в ядерных реакторах. Дейтероны, обычно получаемые путем ионизации атомов дейтерия, используются в качестве бомбардирующих частиц в ядерных реакциях, в частности для получения быстрых нейтронов.

Дейтерий применяется также как изотопный индикатор в научных исследованиях в химии, биологии, физиологии, агрохимии и др. (в т.ч. в опытах с живыми организмами и при диагностич. исследованиях человека).

Соединения дейтерия используются также при спектроскопических исследованиях. Изделия из монокристаллов на основе KD_2PO_4 применяются для создания систем управления и преобразования лазерного излучения.

Дейтерий - ядерное топливо для энергетики будущего, основанной на управляемом термоядерном синтезе. В первых энергетич. реакторах такого типа предполагается осуществить реакцию $D + T \rightarrow He + n + 17,6 \text{ МэВ}$.

Лит.: Выделение дейтерия из водорода методом глубокого охлаждения, М., 1961; Тупицын И. Ф., Тяжелые изотопы водорода, дейтерий и тритий, М., 1961; Андреев Б. М., Зельвенский Я. Д., Катальников С. Г., Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике, М., 1987 Я. Д. Зельвенский.

Дейтерий как экологически чистое ТОПЛИВО

Дейтерий - изотоп водорода с одним "лишним" нейтроном в ядре - экологически чистое, дешевое и доступное в неограниченных количествах топливо, поскольку выделяется из обычной воды. В одной тонне воды его столько, что им можно заменить 250 тонн нефти. Правда соответственно и внимание к нему повышенное пока, лишь в научной среде. Например, ученые из Российского федерального ядерного центра - Всероссийского научно-исследовательского института технической физики (РФЯЦ-ВНИИТФ) города Челябинск-70 предлагают взрывать небольшие термоядерные заряды. По их убеждению, тем самым можно спасти мир от энергетического голода и экологической катастрофы, а страну - от нищеты. Российские оружейники однажды уже спасли мир от третьей мировой войны, создав стратегическое ядерное и термоядерное оружие. Что же они предлагают XXI столетию?

Учёные готовы спроектировать и построить энергоустановку взрывной дейтериевой энергетики (ВДЭ) - "котел взрывного сгорания" (КВС). Это такая железобетонная бочка диаметром около 150 и высотой 200 метров, толщина стенки - 35 метров. Внутри она облицована 20-сантиметровой сталью, а сверху засыпана грунтом толщиной более сотни метров. В этом сооружении, именуемом в проекте "КВС10", внутри защитного слоя

жидкого натрия с помощью дейтериевых взрывов мощностью до 10 килотонн тротилового эквивалента можно каждые полчаса получать 37 гигаватт тепловой энергии, что равноценно 25 миллионам тонн нефтяного эквивалента в год. Разработке концепции взрывной дейтериевой энергетики предшествовало создание специалистами РФЯЦ - ВНИИТФ под руководством академиков Е.И. Забабахина, Е.Н. Аврорина и Б.В. Литвинова "чистых" дейтериевых зарядов.

ДЕЙТЕРИЙ И ТЯЖЕЛАЯ ВОДА

Дейтерий (тяжелый водород) – один из двух стабильных изотопов водорода, ядро которого состоит из одного протона и одного нейтрона. Молекула дейтерия – двухатомна. Содержание в природном водороде – 0,012–0,016%. Температура плавления – 254,5° С, температура кипения – 249,5° С. Тяжелая вода (оксид дейтерия) – изотопная разновидность воды; плотность 1,1, температура плавления – 3,8° С, температура кипения – 101,4° С.

В 1932 одно за другим следовали выдающиеся открытия в области физики: были открыты нейтрон и позитрон, разработана протоно-нейтронная теория строения ядер и релятивистская квантовая механика, построен первый циклотрон и изобретен электронный микроскоп, проведена первая реакция ядерного синтеза, экспериментально измерена скорость движения молекул. Недаром физики назвали этот год *anno mirabilis* – год чудес. В этом же году был открыт и второй изотоп водорода, названный дейтерием (от греческого *deuteros* – второй, символ D).

Открытие дейтерия может служить прекрасной иллюстрацией к парадоксальному на первый взгляд высказыванию французского физикохимика Анри Ле Шателье, обращенному к ученикам: «Ошибкой не только начинающих исследователей, но многих немолодых, весьма опытных и зачастую талантливых ученых является то, что они устремляют свое внимание на разрешение очень сложных проблем, для чего еще недостаточно подготовлена почва. Если вы хотите сделать нечто действительно большое в науке, если вы хотите создать нечто фундаментальное, беритесь за детальное обследование самых, казалось бы, до конца обследованных вопросов. Эти-то на первый взгляд простые и не таящие в себе ничего нового объекты и являются тем источником, откуда вы при умении сможете почерпнуть наиболее ценные и порой неожиданные данные».

Действительно, что можно было ожидать от исследования физических свойств обыкновенной чистой воды – они были изучены, как говорится, вдоль и поперек еще в 19 в. Вспомним однако, что проведенные в 1893 рутинные определения плотности газообразного азота, полученного разными методами (литр азота из воздуха весил 1,257 г, а полученного химическим путем – 1,251 г), привели к выдающемуся открытию – сначала аргона, а за ним и других благородных газов.

Можно ли было надеяться обнаружить нечто новое в обычной воде? В начале 19 в. лондонский врач и химик Уильям Праут опубликовал гипотезу, согласно которой из самого легкого элемента – водорода могли возникнуть все остальные элементы путем конденсации. В этом случае атомные массы всех элементов должны быть кратны массе атома водорода. Определения атомных масс, которые оказались дробными, эту гипотезу не подтвердили, и химики 19 в. часто осмеивали ее как лишенную научного содержания

Тяжелая вода. После фундаментальных работ Уошберна и Юри исследования нового изотопа стали развиваться быстрыми темпами. Уже вскоре после открытия дейтерия в природной воде была обнаружена ее тяжелая разновидность. Обычная вода состоит в основном из молекул ${}^1\text{H}_2\text{O}$. Но если в природном водороде есть примесь дейтерия, то и в обычной воде должны быть примеси HDO и D_2O . И если при электролизе воды H_2 выделяется с большей скоростью, чем HD и D_2 , то со временем в электролизере должна накапливаться тяжелая вода. В 1933 Гилберт Льюис и американский физикохимик Роналд Макдональд сообщили, что в результате длительного электролиза обычной воды им удалось получить не виданную никем до этого новую разновидность воды – тяжелую воду.

Открытие и выделение весовых количеств новой разновидности воды – D_2O произвело большое впечатление на современников. Всего за два года после открытия было опубликовано более сотни работ, посвященных исключительно тяжелой воде. О ней читались популярные лекции, печатались статьи в массовых изданиях. Практически сразу же после открытия тяжелую воду стали использовать в химических и биологических исследованиях. Так, было обнаружено, что рыбы, микробы и черви не могут существовать в ней, а животные погибают от жажды, если их поить тяжелой водой. Не прорастают в тяжелой воде и семена растений.

Однако технически получение значительных количеств D_2O представляло собой трудную задачу. Для обогащения воды дейтерием на 99% необходимо уменьшить объем воды при электролизе в 100 тысяч раз. Льюис и Макдональд взяли для своих опытов 10 л воды из

проработавшей несколько лет большой электролитической ванны, в которой содержание дейтерия было повышенным. Пропуская через эту воду ток большой силы – 250 ампер (для увеличения электропроводности вода содержала щелочь), они за неделю уменьшили ее объем в 10 раз. Чтобы жидкость при электролизе таким огромным током не закипела, ее приходилось непрерывно охлаждать холодной водой, пропускаемой по металлическим трубкам внутри электролизера. Остаток объемом 1 л перенесли в электролизер поменьше и снова путем электролиза снизили объем в 10 раз. Затем в третьей ячейке объем был уменьшен до 10 мл, и, наконец, в четвертой он был доведен до 0,5 мл. Отогнав этот остаток в вакууме в небольшую колбочку, они получили воду, содержащую 31,5% D_2O . Ее плотность (1,035) уже заметно отличалась от плотности обычной воды.

В следующей серии опытов из 20 л воды, также в несколько этапов, получили 0,5 мл воды с плотностью 1,075, содержащей уже 65,7% D_2O . Продолжая такие опыты, удалось, наконец, получить 0,3 мл воды, плотность которой (1,1059 при 25° C) уже больше не увеличивалась при уменьшении объема при электролизе до 0,12 мл. Эти несколько капель и были первые за всю историю Земли капли почти чистой тяжелой воды. Соответствующие расчеты показали, что прежние оценки соотношения обычного и тяжелого водорода в природе были слишком оптимистическими: оказалось, что в обычной воде содержится всего 0,017% (по массе) дейтерия, что дает соотношение D:H = 1:6800.

Чтобы получать заметные количества тяжелой воды, необходимой ученым для исследований, необходимо было подвергать электролизу уже огромные по тем временам объемы обычной воды. Так, в 1933 группе американских исследователей для получения всего 83 мл тяжёлой воды 99%-ой чистоты пришлось взять уже 2,3 тонны воды, которую разлагали в 7 стадий. Было ясно, что такими методами ученые не смогут обеспечить всех желающих тяжелой водой. А тут выяснилось, что тяжелая вода является прекрасным замедлителем нейтронов и потому может быть использована в ядерных исследованиях, в том числе для построения ядерных реакторов. Спрос на тяжелую воду вырос настолько, что стала ясна необходимость налаживания ее промышленного производства. Трудность состояла в том, что для получения 1 тонны D_2O необходимо переработать около 40 тысяч тонн воды, израсходовав при этом 60 млн кВт·ч электроэнергии – столько уходит на выплавку 3000 т алюминия!

Первые полупромышленные установки были маломощными. В 1935 на установке в Беркли еженедельно получали 4 г почти чистой D_2O , стоимость которой составляла 80

долларов за грамм – это очень дорого, если учесть, что за прошедшие годы доллар «подешевел» в десятки раз. Более эффективной была установка в химической лаборатории Принстонского университета – она давала ежедневно 3 г D₂O ценой по 5 долларов за грамм (через 40 лет стоимость тяжелой воды снизилась до 14 центов за грамм). Наиболее трудоемким оказался самый первый этап электролиза, в котором концентрация тяжелой воды повышалась до 5–10%, поскольку именно на этом этапе приходилось перерабатывать огромные объемы обычной воды. Дальнейшее концентрирование можно было уже без особых проблем провести в лабораторных условиях. Поэтому преимущества получали те промышленные установки, которые могли подвергать электролизу большие объемы воды.

Теоретически можно вместо электролиза использовать простую перегонку, поскольку обычная вода испаряется легче, чем тяжелая (ее температура кипения 101,4° С). Однако этот способ еще более трудоемкий. Если при электролизе коэффициент разделения изотопов водорода (т.е. степень обогащения в одной стадии) теоретически может достигать 10, то при перегонке он составляет всего 1,03–1,05. Это означает, что разделение путем перегонки исключительно малоэффективно. Академик Игорь Васильевич Петрянов-Соколов как-то подсчитал, сколько воды должно испариться из чайника, чтобы в остатке заметно повысилось содержание дейтерия. Оказалось, что для получения 1 литра воды, в которой концентрация D₂O всего в 10 раз превышает природную, в чайник надо долить в общей сложности 2,10³⁰ тонн воды, что в 300 млн. раз превышает массу Земли!

Масса молекулы D₂O на 11% превышает массу H₂O. Такая разница приводит к существенным различиям в физических, химических и, что особенно важно, биологических свойствах тяжелой воды. Тяжелая вода кипит при 101,44° С, замерзает при 3,82° С, имеет плотность при 20° С 1,10539 г/см³, причем максимум плотности приходится не на 4° С, как у обычной воды, а на 11,2° С (1,10602 г/см³). Кристаллы D₂O имеют такую же структуру, как и обычный лед, но они более тяжелые (0,982 г/см³ при 0°С по сравнению с 0,917 г/см³ для обычного льда). В смесях с обычной водой с большой скоростью происходит изотопный обмен: $H_2O + D_2O \rightleftharpoons 2HDO$. Поэтому в разбавленных растворах атомы дейтерия присутствуют в основном в виде HDO. В среде тяжелой воды значительно замедляются биохимические реакции, и эта вода не поддерживает жизни животных и растений.

В настоящее время разработан ряд эффективных методов получения тяжелой воды:

электролизом, изотопным обменом, сжиганием обогащенного дейтерием водорода. В настоящее время тяжелую воду получают ежегодно тысячами тонн. Ее используют в качестве замедлителя нейтронов и теплоносителя в ядерных реакторах (для заполнения одного современного крупного ядерного реактора требуется 100–200 тонн тяжелой воды чистотой не менее 99,8%); для получения дейтронов D^+ в ускорителях частиц; как растворитель в спектроскопии протонного магнитного резонанса (обычная вода своими протонами смазывает картину). Не исключено, что роль тяжелой воды значительно возрастет, если будет осуществлен промышленный термоядерный синтез.

В 1917 немецкий ученый К.Шерингер предположил, что атомы разных элементов построены не только из протия (от греческого *protos* – первый), т.е. «легкого» водорода с атомной массой 1, а из разных изотопов водорода. К тому времени уже было известно, что один и тот же элемент может иметь изотопы с разной массой. Впечатляющих успехов в открытии большого числа изотопов нерадиоактивных элементов достиг английский физик **Фрэнсис Уильям Астон** с помощью сконструированного им масс-спектрографа. В этом приборе изучаемые атомы или молекулы бомбардируются пучком электронов и превращаются в положительно заряженные ионы. Пучок этих ионов далее подвергается действию электрического и магнитного поля, и их траектории отклоняются от прямой. Это отклонение тем сильнее, чем больше заряд иона и чем меньше его масса. Из значений отклоняющих напряжений непосредственно получают относительные массы ионов. А из интенсивности пучка ионов с данной массой можно судить об относительном содержании в образце этих ионов.

Гипотеза Шерингера предполагала, что и у самого легкого элемента – водорода тоже могут быть изотопы. Однако попытки обнаружить «второй», тяжелый водород, предпринятые в 1919 Отто Штерном и Максом Фольмером, оказались безуспешными. Не удалось обнаружить его и Астону. Это означало одно из двух: либо у водорода тяжелого изотопа вовсе нет, либо его содержание в природном водороде слишком мало и чувствительности имевшегося в распоряжении Астона прибора недостаточно для его обнаружения. Правильным оказалось второе предположение, однако тяжелый водород прятался от исследователей в течение еще многих лет, маскируясь под ошибки эксперимента.

В 1927 Астон очень точно для того времени измерил отношение масс атомов водорода и кислорода-16; у него получилось 1,00778:16,0000, что, казалось, находится в прекрасном соответствии с результатами самых точных измерений атомной массы водорода химическим путем: у химиков это отношение получалось равным 1,00777:16,0000. Однако

такое единодушие физиков и химиков было недолгим: оказалось, что природный кислород, с которым работали химики, – плохой эталон для измерения атомных масс, поскольку кислород представляет собой смесь изотопов, причем их относительное содержание в разных источниках не вполне постоянно. Точные измерения в начале 30-х соотношения $^{18}\text{O}:^{16}\text{O} = 1:630$ существенным образом изменили все прежние расчеты и данные об атомных массах. Пришлось в срочном порядке отказываться от «химической» шкалы атомных масс и переходить на «физическую» шкалу, основанную на кислороде-16. Такой пересчет данных химических анализов дал отношение масс $\text{H}:^{16}\text{O} = 1,00799:16,0000$, что уже заметно отличалось от измерений Астона. Кто же ошибся – физики или химики, выполнившие определения атомных масс? И те и другие ручались за точность своих определений, расхождение в результатах далеко выходило за пределы экспериментальных ошибок.

В 1931 было высказано предположение о том, что причина небольшого расхождения – наличие в обычном водороде более тяжелого изотопа. Расчеты показали, что расхождение устраняется в том случае, если на 5000 атомов обычного водорода ^1H приходится всего один атом его вдвое более тяжелой разновидности ^2H . Дело оставалось за малым – обнаружить этот изотоп экспериментально. Но как это сделать, если его действительно так мало? С учетом чувствительности имевшейся в то время аппаратуры выход был один: сконцентрировать тяжелый водород, увеличив тем самым его содержание в обычном водороде, – примерно так же, как концентрируют спирт, перегоняя его смесь с водой. Если перегонять смесь обычного и тяжелого водорода, остаток должен обогащаться более тяжелым изотопом. После этого можно было снова попытаться обнаружить тяжелый изотоп водорода аналитически.

В конце 1931 группа американских физиков – Гарольд Юри со своими учениками, Фердинандом Брикведде и Джорджем Мерфи, взяли 4 л жидкого водорода и подвергли его фракционной перегонке, получив в остатке всего 1 мл, т.е. уменьшив объем в 4 тысячи раз. Этот последний миллилитр жидкости после ее испарения и был исследован спектроскопическим методом. Талантливый спектроскопист Гарольд Клейтон Юри заметил на спектрограмме обогащенного водорода новые очень слабые линии, отсутствующие у обычного водорода. При этом положение линий в спектре точно соответствовало проведенному им квантово-механическому расчету предполагаемого атома ^2H . Соотношение интенсивностей линий нового изотопа (Юри назвал его дейтерием) и обычного водорода показало, что в исследованном обогащенном образце нового изотопа в 800 раз меньше, чем обычного водорода. Значит, в исходном водороде

тяжелого изотопа еще меньше. Но насколько?

Пытаясь оценить так называемый коэффициент обогащения при испарении жидкого водорода, исследователи поняли, что в своих опытах использовали самый неподходящий источник водорода. Дело в том, что он был получен, как обычно, путем электролиза воды. А ведь при электролизе легкий водород должен выделяться быстрее, чем тяжелый. Получается, что образец был сначала обеднен тяжелым водородом, а затем снова обогащался им!

После того, как дейтерий был обнаружен спектроскопически, Эдвард Уошберн предложил разделять изотопы водорода электролизом. Эксперименты показали, что при электролизе воды легкий водород действительно выделяется быстрее, чем тяжелый. Именно это открытие стало ключевым для получения тяжелого водорода. Статья, в которой сообщалось об открытии дейтерия, была напечатана весной 1932, а уже в июле были опубликованы результаты по электролитическому разделению изотопов. В 1934 за открытие тяжелого водорода Юри была присуждена Нобелевская премия по химии. (Уошберн тоже был представлен к премии, но скончался в том же году, а по положению о Нобелевских премиях они вручаются только прижизненно.)

Когда был открыт нейтрон, стало ясно, что в ядре дейтерия, в отличие от протия, помимо протона находится также нейтрон. Поэтому ядро дейтерия – дейтрон вдвое тяжелее протона; его масса в углеродных единицах равна 2,0141018. В среднем в природном водороде содержится 0,0156% дейтерия. В прибрежной морской воде его немного больше, в поверхностных водах суши – меньше, в природном газе – еще меньше (0,011–0,013%). По химическим свойствам дейтерий схож с протием, но огромное различие в их массах приводит к заметному замедлению реакций с участием атомов дейтерия. Так, реакция дейтерированного углеводорода R–D с хлором или кислородом замедляется, в зависимости от температуры, в 5–10 раз по сравнению с реакцией R–H. С помощью дейтерия можно «пометить» водородсодержащие молекулы и изучить механизмы их реакций. Так, в частности, были изучены реакции синтеза аммиака, окисления углеводородов, ряд других важных процессов.

Тяжёлая вода и жизнь

Тяжелая вода очень дорога и дефицитна. Однако если удастся найти дешевый и практичный способ ее получения, то области применения этого редкого пока ресурса заметно расширятся. Откроются новые страницы в химии, биологии, а это новые

материалы, неизвестные соединения и, может быть, неожиданные формы жизни, где все макромолекулы ДНК и белков состоят из дейтерированных молекул.

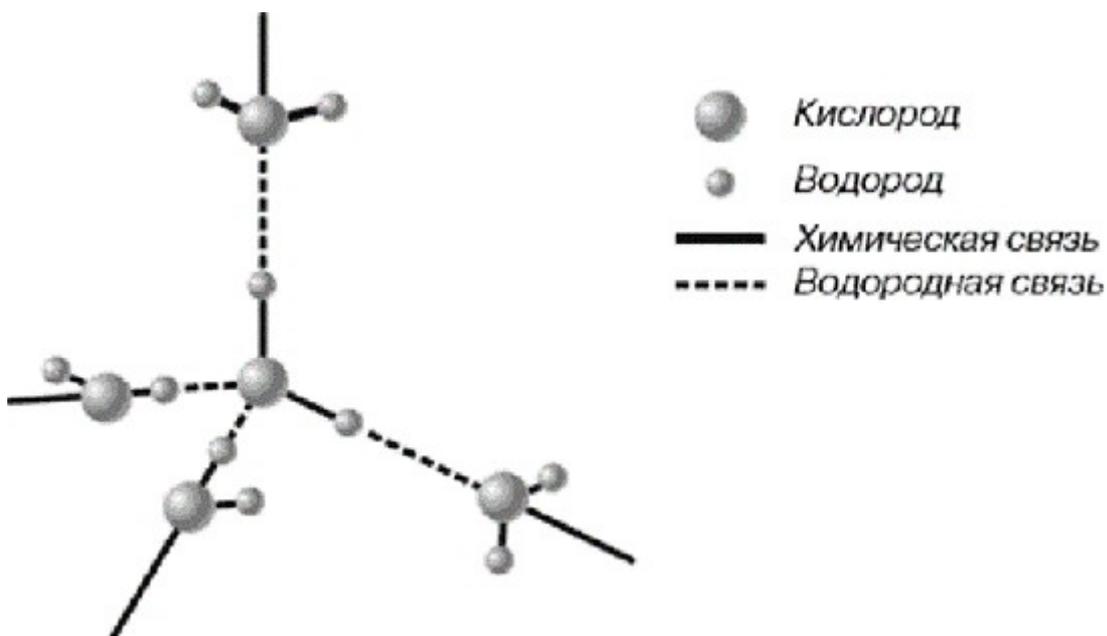


Рис. 1.

Молекулы воды прочно связаны друг с другом и образуют устойчивую молекулярную конструкцию, которая сопротивляется любым внешним воздействиям, в частности тепловым. (Именно поэтому, чтобы превратить воду в пар, нужно подвести к ней много тепла). Молекулярная конструкция воды скреплена каркасом из особых квантово-механических связей, названных в 1920 году двумя американскими химиками Латимером и Родебушем водородными. Все аномальные свойства воды, включая необычное поведение при замерзании, объясняются с точки зрения концепции водородных связей.

Вода в природе бывает нескольких видов:

- 1) обычная, или протиевая;
- 2) тяжелая, или дейтериевая;
- 3) полутяжёлая;
- 4) сверхтяжелая, или тритиевая, но ее в природе почти нет;

Различается вода и по изотопному составу кислорода. Всего же насчитывается не менее 18 ее изотопных разновидностей.

Если мы откроем водопроводный кран и наберем чайник, то там будет не однородная вода, а ее смесь. При этом дейтериевых включений окажется очень немного – примерно 150 граммов на тонну. Получается, что тяжелая вода есть повсюду – в каждой капле! Проблема в том, как ее взять. Ныне во всем мире ее добыча связана с огромными затратами энергии и очень сложным оборудованием.

Однако есть предположение, что на планете Земля возможны такие природные ситуации, когда тяжелая и обычная вода на какое-то время отделяются одна от другой – тяжёлая вода из рассеянного, растворенного состояния переходит в концентрированное. Так, может быть, существуют месторождения тяжелой воды? Пока однозначного ответа нет: никто из исследователей этим вопросом прежде не занимался.

А вместе с тем известно, что физико-химические свойства тяжёлой воды совсем иные, чем у обычной воды – ее антипода. Так, температура кипения тяжелой воды $+101,4^{\circ}\text{C}$, а замерзает она при $+3,81^{\circ}\text{C}$. Ее плотность на 10 процентов больше, чем у обычной.

Надо также заметить, что происхождение тяжелой воды, по-видимому, сугубо земное – в космосе ее следов не обнаружено. Дейтерий образуется из протия вследствие захвата им нейтрона космического излучения. Мировой океан, ледники, атмосферная влага – вот природные “фабрики” тяжелой воды.

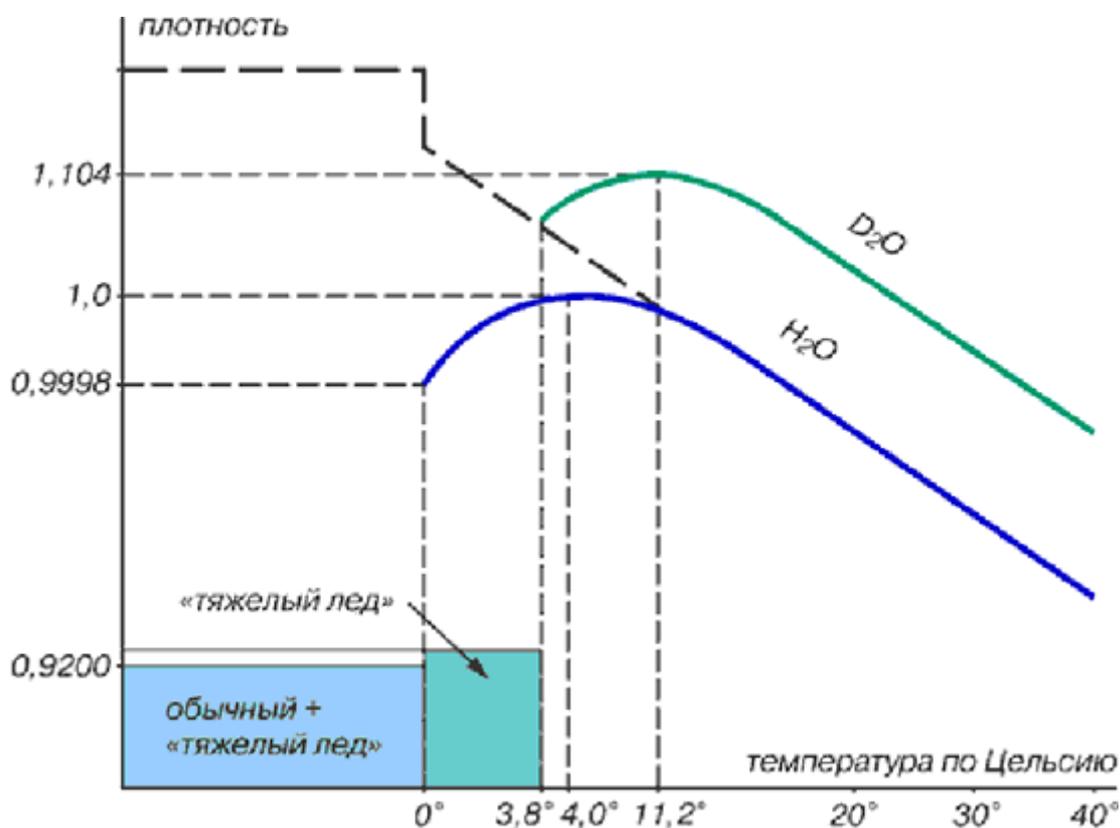


Рис. 2. Зависимость плотности обычной и тяжелой воды от температуры.

Разница в плотности одной и другой разновидностей воды превышает 10%, и поэтому возможны условия, когда переход в твердое состояние при охлаждении происходит вначале у тяжелой воды, а затем у обычной. Во всяком случае, физика не запрещает появления участков твердой фазы с повышенным содержанием дейтерия. Такому “тяжелому” льду на диаграмме соответствует заштрихованный участок. Если бы вода была “нормальной”, а не аномальной жидкостью, то зависимость плотности от температуры имела бы вид, показанный пунктирной линией.

Итак, поскольку есть заметная разница в плотности между тяжелой и обычной водой, то именно плотность, а также агрегатное состояние и могут служить наиболее чувствительными критериями в поисках возможных месторождений тяжелой воды – ведь эти критерии связаны с температурой окружающей среды. А как известно, окружающая среда наиболее “контрастна” в высоких широтах планеты.

Но к настоящему времени сложилось мнение, что воды высоких широт бедны дейтерием. Поводом к этому стали результаты исследований проб воды и льда из Большого Медвежьего озера в Канаде и из других северных водоемов. Обнаружились также колебания в содержании дейтерия по сезонам года – зимой, например, в реке Колумбия его меньше, чем летом. Эти отклонения от нормы связывались с особенностями распределения атмосферных осадков, которые, как принято предполагать, “разносят” дейтерий по планете.

Похоже, что никто из исследователей сразу не заметил скрытого противоречия в этом утверждении. Да, атмосферные осадки влияют на распределение дейтерия по водоемам планеты, однако они никак не влияют на глобальный процесс образования дейтерия!

Когда на Севере наступает осень, в реках начинается быстрое остывание водной массы, которое убыстряется под воздействием вечной мерзлоты, одновременно идет ассоциация молекул воды. Наконец, наступает критический момент максимальной плотности – температура воды всюду чуть ниже $+4^{\circ}\text{C}$. И тогда в придонной зоне на некоторых участках интенсивно намораживается рыхлый подводный лед.

В отличие от обычного льда он не имеет правильной кристаллической решетки, у него иная структура. Центры его кристаллизации различны: камни, коряги и разные неровности, причем не обязательно лежащие на дне и связанные с мерзлым грунтом. Появляется рыхлый лед на реках глубоких, со спокойным – ламинарным – течением.

Подводное ледообразование обычно заканчивается тем, что льдины всплывают на

поверхность, хотя в это время никакого другого льда нет. Подводный лед иногда появляется и летом. Возникает вопрос: что это за “вода в воде”, которая меняет свое агрегатное состояние, когда установившаяся температура в реке слишком высока для того, чтобы в лед превращалась обычная вода, чтобы, как говорят физики, произошел фазовый переход?

Можно допустить, что рыхлый лед представляет собой обогащенные концентрации тяжелой воды. Кстати, если это так, то нужно помнить, что тяжелая вода не отличима от обычной, однако потребление ее внутрь организма может вызвать тяжелые отравления. К слову сказать, местные жители высоких широт не употребляют речной лед для приготовления пищи – только озерный лед или снег.

“Механизм” фазового перехода тяжёлой воды в реке очень напоминает тот, что используется химиками в так называемых кристаллизационных колоннах. Только в северной реке “колонна” растянута на сотни километров и не столь контрастна по температурному режиму.

Если же иметь в виду, что через центры кристаллизации в реке за короткое время проходят сотни и тысячи кубических метров воды, из которых превращается в лед – намораживается – пусть тысячная доля процента, то и этого достаточно, чтобы говорить о способности тяжелой воды концентрироваться, то есть образовывать месторождения.

Только присутствием таких концентраций можно объяснить тот доказанный факт, что зимой в северных водоемах процентное содержание дейтерия заметно уменьшается. Да и полярные воды, как показывают пробы, тоже бедны дейтерием, и в Арктике, вполне вероятно, есть районы, где плавают в основном только льдины, обогащенные дейтерием, – ведь рыхлый донный лед появляется первым и тает последним.

Больше того, как показали исследования, ледники и льды высоких широт в целом богаче тяжелыми изотопами, чем воды, омывающие льды. Например, в Южной Гренландии, в районе станции “Дай-3”, выявлены изотопные аномалии на поверхности ледников, и происхождение таких аномалий пока не объяснено. Значит, могут встретиться и льдины, обогащенные дейтерием. Дело, как говорится, за малым – нужно найти эти пока еще гипотетические месторождения тяжелой воды.

Литература:

1. Л. Кульский, В. Даль, Л. Ленчина. Вода знакомая и загадочная. “Радянська школа”, 1982.

Реликтовая вода

Все начинается с воды — считал древнегреческий философ Фалес Милетский. Вода — основа эволюции всего живого во Вселенной; без воды не существует жизни.

Работы по улучшению качества воды ведутся во всех странах мира уже давно. Однако существующие очистительные сооружения и технологии водоподготовки не справляются со своими задачами. Поэтому и возникли различные способы и устройства для доочистки питьевой воды. В общих чертах все эти устройства, какой бы совершенной ни была очистка, ничего не могут поделать с генетической памятью воды, проявляющемся в способности воды сохранять след действия на ее молекулярную структуру всех примесных соединений.

Вода загрязнена многими примесями земного, космического и биоэнергоинформационного происхождения.

К земным загрязнениям воды следует отнести многочисленные вредные и ядовитые органические и неорганические примеси, прежде всего техногенного происхождения, а также микроорганизмы.

Космические загрязнения — это главным образом тяжелые и радиоактивные изотопы водорода (дейтерий и тритий) и кислорода — O18, O19 и др.

Под биоэнергоинформационными (БЭИ) загрязнениями учёные подразумевают прежде всего то энергополе и информационное наполнение воздушного пространства, воды и земли, которое негативно влияет на все живое.

Существуют природные и техногенные БЭИ загрязнения. Первые возникают вследствие солнечной активности, магнитных бурь, землетрясений, электромагнитных аномалий и т. п.; вторые — результат технического прогресса человечества. К ним следует отнести не только отравление воды, земли и воздуха промстоками и выхлопными газами, повышенную радиацию, но и т. н. электромагнитный смог — колоссальное увеличение плотности электромагнитных излучений различных частот и интенсивностей, в том числе и глобальную компьютеризацию.

Сочетание природных и техногенных БЭИ загрязнений негативно воздействует на

структуру воды, вследствие чего она приобретает мутагенные и канцерогенные свойства. Существующие ныне технологии получения питьевой воды (как у нас, так и за рубежом) осуществляют очистку воды только от земного типа загрязнений, не изменяя при этом ее изотопный состав и структурную память. Такая вода практически полностью сохраняет свою негативную структуру, и по этой причине не может быть полезной для здоровья, роста и развития живых организмов.

Для оздоровления воды, придания ей целебных биологических свойств прежде всего необходимо избавиться ее от всех загрязнений — земных, космических и биоэнергоинформационных.

Оказалось, задача эта далеко не простая. Тем не менее многолетний труд, огромное количество экспериментов и технологических построений привели нас, наконец, к заветной цели: сначала мы получили целебную питьевую воду, а затем и целебную реликтовую воду кристальной чистоты с пониженным содержанием дейтерия, оптимальным минеральным составом и льдоподобной структурой. Способ получения целебной реликтовой воды (ЦРВ) и установка ВИН-7 «Надія» защищены четырнадцатью патентами Украины и России.

В сентябре 1993 года одному из авторов этой статьи позвонил доктор медицинских наук профессор В. Мосиенко, который первый исследовал реликтовую воду: «Ваша активированная вода (так назвал он целебную реликтовую воду с пониженным содержанием дейтерия на 3—5%. — Авт.) задерживает развитие рака, причем существенно!»

Три года исследовали эту воду в Институте экспериментальной патологии, онкологии и радиобиологии им. Р. Кавецкого НАН Украины.

Первые опыты проводили на линейных мышах с привитой карциномой легких Льюиса.

Приведенные в таблице 1 данные свидетельствуют, что реликтовая вода задерживает развитие ракового процесса и повышает резистентность животных.

Получив первые обнадеживающие результаты у подопытных мышей, мы решили продолжить исследования.

В этот раз опыты проводили на 75 мышах линии С 57-В в возрасте 3—3,5 месяца, которые были разбиты на пять групп по 15 особей в каждой, соответственно виду исследуемой

воды. Данные приведены в таблице 2.

Особого внимания заслуживают два показателя: задержка метастазирования и потеря веса животных за время эксперимента. Мощное стимулирующее действие реликтовой воды на иммунную систему животных привело к задержке развития метастазов на 40% (!) по сравнению с контрольной группой, а потеря массы у животных, которые пили реликтовую воду, к концу опыта была в два раза меньше.

Цель последующего эксперимента — выяснить некоторые тонкие механизмы действия реликтовой воды на организм животных, а именно — на дыхание и окислительное фосфорилирование митохондрий печени мышей, а также на изменение состава периферической крови. Через четыре недели после начала эксперимента прирост числа эритроцитов в одном миллилитре крови у мышей, пивших реликтовую воду, составил 657000 клеток, показатель содержания гемоглобина возрос на 1,54 г%. Было отмечено также четкое положительное влияние воды на показатели кислородного насыщения тканей печени: увеличение pO_2 составило 15%, в 1,3 раза увеличился ее дыхательный потенциал. О полезном действии реликтовой воды на здоровье мышей свидетельствовала их повышенная резистентность и увеличение веса по сравнению с контролем. Чтобы убедиться в благотворном действии реликтовой воды на все живое, требовалось еще испытать ее влияние на рост и развитие растений. В результате исследований, проведенных в Институте кукурузы УААЕ, установлено: стимулирующее действие реликтовой воды на проростки пшеницы, льна, кукурузы сравнимо с действием таких стимуляторов роста растений, как фумар и фумаран, на проростки же подсолнечника реликтовая вода оказывает более выраженное стимулирующее действие.

Исследования биологической активности реликтовой воды с различным содержанием дейтерия, полученной на установке ВИН-7 «Надія», были проведены в 1998 году в Институте экогигиены и токсикологии им. Л.Медведя Минздрава Украины.

Для этого предполагалось исследовать влияние воды на подвижность суспензии сперматозоидов — основной показатель их физиологического статуса.

Для эксперимента было взято пять образцов воды: №1 — дистиллированная, №2 и №3 — реликтовая вода с пониженным содержанием дейтерия на 5% и №4 и №5 — на 9%. Сравнительную оценку подвижности сперматозоидов в опытных пробах определяли отношением времени их подвижности в опытной пробе к контрольной (индексом токсичности).

Данные опытов свидетельствуют: в пробах реликтовой воды из установки ВИН-7 «Надія» сперматозоиды дольше сохраняют свою функциональную активность, и она повышается по мере снижения содержания дейтерия в воде.

Если принять во внимание общеизвестный факт о том, что воспроизводство жизни связано с потенциалом жизнедеятельности половых клеток, то станет ясно значение реликтовой воды для будущих поколений.

Медико-биологические свойства реликтовой воды в 1995 г. исследовались на кафедре общей и молекулярной генетики Киевского национального университета им. Т.Шевченко.

Дрозофила, как известно, является общепризнанным в мировой науке живым модельным объектом для различных биологических и медицинских экспериментов. Предполагалось исследовать действие трех видов воды на весь цикл зарождения и развития *Drosophila melanogaster* линии Oregon — на яйцекладку, выход личинок из яйца, куколок из личинки и взрослых особей (имаго) из куколок.

Впервые были обнаружены геропротекторные (омолаживающие), радиозащитные и антимутагенные эффекты воздействия реликтовой воды с пониженным содержанием дейтерия на 5 % на дрозофилу в процессе ее развития.

Получив положительные результаты опытов на дрозофиле, ученые продолжили исследования на теплокровных животных. Этому также способствовала заинтересованность специалистов по жизнеобеспечению космонавтов (Институт медико-биологических проблем, г.Москва), которые передали для сравнительного исследования образцы воды с пониженным (на 60%) содержанием дейтерия.

В 1998 году было проведено исследование действия воды с пониженным содержанием дейтерия, полученной по электролизной технологии в Институте медико-биологических проблем, и воды, полученной по вакуумной технологии на установке ВИН-7 «Надія», на иммунную систему морских свинок.

Предполагалось определить, какая вода обладает более высокой биологической активностью, благотворно влияющей на иммунную систему — электролизная, очищенная от дейтерия на 60%, или реликтовая вода из «Надії» со сниженной концентрацией дейтерия всего на 9%?

Прежде всего необходимо отметить: при электролизном процессе у воды с пониженным

на 60% содержанием дейтерия сохраняются негативные свойства дистиллированной воды (отсутствие минерализации, повышенное содержание растворенных газов, неупорядоченная молекулярная структура воды). Она является лишь исходным материалом для получения питьевой воды космонавтов.

Преимуществом электролизного процесса является потенциально возможное удаление дейтерия (до 90%), поэтому она используется для экспериментов на животных и растениях.

При вакуумной технологии производства воды с пониженным содержанием дейтерия получают микроминерализованную питьевую воду со сниженным содержанием растворенных в ней газов и с упорядоченной льдоподобной структурой.

При проведении данного исследования мы исходили из реальных возможностей двух процессов, один из которых дает лишь исходный продукт для дальнейшего приготовления воды для космонавтов, а другой — готовую питьевую воду.

Интерес к данному исследованию подогревался еще и тем, что оно, во-первых, проводилось впервые и, во-вторых, сравнивалось действие на иммунную систему двух типов воды со столь отличительными физико-химическими и изотопными показателями.

Для опыта было взято 12 половозрелых морских свинок. К культуре лимфоцитов контрольной 1-й группы добавляли воду, близкую по своим свойствам к физиологическому раствору. К лимфоцитам 2-й группы добавляли электролизную воду. В третьей группе использовали реликтовую воду из установки ВИН-7 «Надія». Четвертую группу составляла тяжелая вода с повышенным содержанием дейтерия на 40%.

Оценку иммунного состояния животных производили по четырем тестам, принятым в мировой иммунологии: Е-РОК — выявляет способность связывать чужеродные клетки; ФГ-НГ — характеризует способность нейтрофильных гранулоцитов (НГ) к фагоцитозу (ФГ); ФГ — МФ — определяет способность макрофагов (МФ) к фагоцитозу; четвертый тест представляет киллерную активность Т-лимфоцитов, их способность убивать все измененные в результате мутации клетки организма.

Прежде всего необходимо отметить значительный иммуностимулирующий эффект, который оказала реликтовая вода из установки ВИН-7 «Надія» (№ 3). Несмотря на 9-процентный уровень снижения дейтерия, она показала наибольшее стимулирующее действие на иммунную систему морских свинок, превзойдя по всем показателям электролизную воду (№2) с пониженным содержанием дейтерия на 60%. Тяжелая вода

(№4), как и следовало ожидать, оказала сильнейшее угнетающее влияние на иммунитет животных.

Данное исследование подтверждает колоссальные возможности реликтовой воды в плане стимулирования иммунной системы, а значит, и укрепления здоровья, лечения болезней. При систематическом употреблении реликтовой воды с пониженным содержанием дейтерия всего на 3—5% в течение не менее шести месяцев у пожилых людей, помимо общего улучшения самочувствия, в ряде случаев возвращаются ранее утраченные или ослабленные функции организма, в том числе здоровый сон, память, творческая работоспособность и другие показатели здоровья, что можно объяснить эффектом омоложения.

На примере теории целебной питьевой воды еще раз убеждаемся, что для практики нет ничего ценнее хорошей теории. На базе действующей в настоящее время опытно-промышленной установки разработан новый технологический процесс и конструктивные параметры установки ВИН-7 «Надія» второго поколения. На этой установке можно будет получать целебную реликтовую воду льдоподобной структуры с пониженным содержанием дейтерия до 90% и более.

В заключение хотелось бы подчеркнуть следующее. Нам не известно, чтобы какая-либо вода — природная или полученная человеком в прошлом либо в настоящее время — обладала бы противораковым действием, улучшала бы состав крови, повышала бы функциональную активность половых клеток, оказывала бы мощное стимулирующее действие на иммунную систему.

Результаты исследований уникальных целебных свойств реликтовой воды позволяют сделать вывод о том, что высокоорганизованное производство и широкое использование целебной реликтовой воды, дальнейшее ее совершенствование позволят существенно повысить потенциал здоровья и долголетия людей, увеличить продуктивность всего сельскохозяйственного производства, получать многомиллиардную прибыль.

«Простейшее устойчивое соединение водорода с кислородом», - такое определение воды дает Краткая химическая энциклопедия. Однако не всегда простейшее является самым простым. Более 100 лет свойства воды описывались единственно возможной формулой воды, открытой в 1805 году немецким ученым Александром Гумбольтом и французским физиком Жозефом Луи Гей-Люссаком.

В 1932 мир облетела сенсация: кроме привычной всем воды, оказывается, есть еще и тяжелая вода. Эту воду открыли американские физики Гарольд Юри и Эльберт Осборн. В

молекулу тяжелой воды входят атомы не легкого водорода - (1H), а его изотопа - дейтерия (2D).

Тяжелая вода играет значительную роль в различных биологических процессах. Различные исследователи независимо друг от друга установили, что тяжелая вода действует отрицательно на растительные и живые организмы. Подопытных собак, крыс и мышей поили водой, треть которой была заменена тяжелой водой. Через недолгое время начиналось расстройство обмена веществ животных, разрушались почки. При увеличении доли тяжелой воды животные погибали.

И наоборот, снижение содержания дейтерия на 25% ниже нормы в воде, которую давали животным, благотворно сказалось на их развитии: свиньи, крысы и мыши дали потомство, во много раз многочисленнее и крупнее обычного, а яйценосность кур поднялась вдвое.

И тогда раздались голоса в пользу полного изъятия дейтерия из употребленной в пищу воды. Это привело бы к ускорению обменных процессов в организме человека, а, следовательно, к увеличению его физической и интеллектуальной активности. Но вскоре возникли опасения, что полное изъятие из воды дейтерия приведет к сокращению общей длительности человеческой жизни. Ведь известно, что наш организм почти на 70% состоит из воды. И в этой воде 0,015% дейтерия. По количественному содержанию (в атомных процентах) он занимает 12-е место среди химических элементов, из которых состоит организм человека. В этом отношении его следует отнести к разряду микроэлементов. Вот тут то дейтерий сразу попадает на первое место. Содержание таких микроэлементов как медь, железо, цинк, молибден, марганец в нашем теле в десятки и сотни раз меньше, чем дейтерия. Что же случится, если удалить весь дейтерий?

На этот вопрос науке еще предстоит ответить. Пока же несомненным является тот факт, что, меняя количественное содержание дейтерия в растительном или животном организме, мы можем ускорять или замедлять ход жизненных процессов.

Что такое обычная, тяжёлая, сверхтяжёлая и тяжёлокислородная вода?

До XIX века люди считали воду обычным химическим элементом. В 1805 году Александр Гумбольдт и Жозеф Луи Гей-Люссак установили, что вода состоит из молекул, каждая из которых содержит два атома водорода и один кислорода и считалось, что вода - индивидуальное соединение, описываемое единственно возможной формулой.

В 1932 году мир облетела сенсация: кроме воды обычной, в природе существует еще и тяжелая вода. В молекулах такой воды место водорода занимает его тяжелый изотоп - дейтерий.

Тяжелую воду открыли американские физики Гаральд Юри и Эльберт Осборн. В 1933 году американец Герберт Льюис совместно с Ричардом Макдональдом впервые выделили ее в чистом виде.

В небольших количествах тяжелая вода постоянно и повсеместно присутствует в природных водах, которую от обычной воды можно различить лишь по физическим характеристикам. В молекулу тяжелой воды входят атомы не легкого водорода - протия (^1H), а его тяжёлого изотопа - дейтерия (^2D), атом которого на единицу тяжелее протиевого, а молекулярный вес тяжелой воды на 2 единицы больше: 20, а не 18. Тяжёлая на 10% плотнее обычной, вязкость выше на 23%, кипит при 101,42 °C, замерзает при +3,8 °C.

Содержание тяжелой воды в природных водах не равномерно. Например, в замкнутых водоемах ее больше, поскольку по сравнению с обычной водой она испаряется менее интенсивно.

Тяжелой воды больше в местностях с жарким климатом, на поверхности океана на экваторе и в тропиках. Тяжелая вода конденсируется быстрее, чем легкая. Вблизи полюсов в высоких южных широтах (в Антарктике) океанские воды заметно "легче" и отличаются самым низким содержанием дейтерия на планете. Так же невелика доля дейтерия во льдах Гренландии.

Тяжелая вода в природе находится в небольших количествах - в миллионных долях процента. Преобладает ее разновидность, состав которой выражается формулой HDO . В Мировом океане содержится 10^{15} тонн HDO .

Тяжелая вода - очень важное промышленное сырье для атомной энергетики, эффективный замедлитель быстрых нейтронов. Так, 1 г дейтерия при термоядерном распаде дает в 10 млн. раз больше энергии, чем 1 г угля при сгорании.

Тяжелая вода действует негативно на жизненные функции организмов; это происходит даже при использовании обычной природной воды с повышенным содержанием тяжелой воды.

Подопытных животных поили водой, 1/3 часть которой была заменена водой состава HDO . Через недолгое время начиналось расстройство обмена веществ животных, разрушались почки. При увеличении доли тяжелой воды животные погибали.

На развитие высших растений тяжелая вода также действует угнетающе; при поливе их водой, на половину состоящей из тяжелой воды, рост прекращается.

Но всё же несмотря на это многие клетки бактерий, растений и водорослей могут быть адаптированы к росту на тяжёлой воде.

Пониженное содержание дейтерия в воде стимулирует жизненные процессы. При потреблении воды с содержанием дейтерия на 25% ниже нормы свиньи, крысы и мыши дали потомство, гораздо многочисленнее и крупнее обычного, яйценоскость кур поднялась вдвое, пшеница созрела раньше и дала более высокий урожай. Это может быть объяснено разницей в плотности и вязкости тяжёлой воды, а также её гидрофобными эффектами.

Позднее, при выяснении фракционного состава воды была обнаружена сверхтяжелая вода T_2O . В ее составе место водорода занимает его природный изотоп, еще более тяжелый, чем дейтерий. Это тритий (T), который в отличие от дейтерия он радиоактивен, атомная масса его равна 3.

Тритий зарождается в высоких слоях атмосферы, где идут природные ядерные реакции. Он является одним из продуктов бомбардировки атомов азота нейтронами космического излучения. Ежеминутно на каждый квадратный сантиметр земной поверхности падают 8-9 атомов трития.

В небольших количествах сверхтяжелая (третиевая) вода попадает на Землю в составе осадков. Во всей гидросфере Земли насчитывается лишь около 20 кг T_2O . Третьекая вода распределена неравномерно: в материковых водоемах ее больше, чем в океанах; в полярных океанских водах ее больше, чем в экваториальных. По своим свойствам сверхтяжелая вода еще заметнее отличается от обычной: кипит при $104^\circ C$, замерзает при $4-9^\circ C$, имеет плотность $1,33 \text{ г/см}^3$.

Сверхтяжелую воду применяют в термоядерных реакциях. Она удобнее дейтериевой, так как очень удобна в определении.

Перечень изотопов водорода не кончается тритием. В лабораторных условиях ядерного реактора искусственно получены более тяжелые изотопы 4H и 5H , тоже радиоактивные. Ученые предсказали существование молекул воды, в которых содержатся любые из пяти водородных изотопов в любом сочетании.

В природе также существуют и изотопы кислорода. Помимо известного кислорода ^{16}O , существуют еще два природных изотопа кислорода - ^{17}O и ^{18}O . В природных водах в среднем на каждые 10 тысяч атомов изотопа ^{16}O приходится 4 атома изотопа ^{17}O и 20 атомов изотопа ^{18}O .

По физическим свойствам тяжелоокислородная вода меньше отличается от обычной, чем тяжеловодородная. Получают ее в основном перегонкой природной воды и используют как источник препаратов с меченым кислородом.

Так же существуют шесть искусственно созданных изотопов кислорода, они недолговечны и радиоактивны. Из них: ^{13}O , ^{14}O и ^{15}O - легкие, ^{19}O и ^{20}O - тяжелые, а сверхтяжелый изотоп - ^{24}O получен в 1970 году.

Существование пяти водородных и девяти кислородных изотопов говорит о том, что изотопных разновидностей воды может быть 135. Основную массу природной воды - свыше 99% - составляет протиевая вода - $^1H_2^{16}O$. Тяжелоокислородных вод намного меньше: $^1H_2^{18}O$ - десятые доли процента. $^1H_2^{17}O$ - сотые доли от общего количества природных вод. Только миллионные доли процента составляет тяжелая вода D_2O , в форме 1HDO тяжелой воды в природных водах содержится уже заметно больше. Еще реже, чем

D_2O , встречаются и девять радиоактивных естественных видов воды, содержащих тритий. Классической водой следует считать протиевую воду $^1H_2^{16}O$ в чистом виде, то есть без малейших примесей остальных 134 изотопных разновидностей. И хотя содержание протиевой воды в природе значительно превосходит содержание всех остальных вместе взятых видов, чистой $^1H_2^{16}O$ в естественных условиях не существует, есть лишь в немногих специальных лабораториях. Ее получают очень сложным путем и хранят с большими предосторожностями. Для получения чистой $^1H_2^{16}O$ ведут очень тонкую, многостадийную очистку природных вод или синтезируют воду из исходных элементов 1H_2 и $^{16}O_2$, которые предварительно тщательно очищают от изотопных примесей. Такую воду применяют в экспериментах и процессах, требующих исключительной чистоты химических реактивов.

Протиевую воду можно было бы назвать легкой водой, но чистая $^1H_2^{16}O$ - редкость. Рабочим эталоном легкой воды считают смесь разновидностей воды состава $^1H_2^{16}O$, $^1H_2^{17}O$ и $^1H_2^{18}O$, взятых в том же соотношении, в котором присутствуют в воздухе соответствующие изотопы кислорода.

Термин "тяжелая вода" на практике также не имеет эквивалента. Вода, отвечающая формуле $D_2^{18}O$, фактически заменяется смесью разновидностей воды с постоянной водородной частью (здесь это дейтерий) и с содержанием изотопов кислорода в соответствии с изотопным составом воздуха.

Основную часть водного потенциала Земли составляет вода, которой не напьешься, не используешь ни в промышленности, ни в сельском хозяйстве, ни в быту. 97,75% или $1,338 \cdot 10^9 \text{ км}^3$, - это соленые воды океанов и морей. Остальные 2,25% - пресные воды, однако, половина их - $24 \cdot 10^6 \text{ км}^3$ - "законсервирована" в виде ледяных гигантских шапок Антарктиды, Арктики, Гренландии, высоких гор в различных районах Земли. Примерно столько же воды - $23,4 \cdot 10^6 \text{ км}^3$ - скрыто в толще земной коры. Это подземные воды.

Объем доступной пресной воды исчисляется всего тысячами кубических километров. Больше всего пресной воды на земной поверхности накоплено в озерах - $176,4 \cdot 10^3 \text{ км}^3$. Если на мгновение задержать течение всех рек земного шара, то оказалось бы, что в их руслах одновременно находится 2120 км^3 воды.

Истоки множества рек, больших и малых, находятся в болотах, которые содержат 10300 км³ пресной воды. 13000 т воды содержится в ближайших к земной поверхности слоях атмосферы. На высоте до 1 км концентрация водяного пара в воздухе в среднем составляет 2%. Вот, пожалуй, и вся вода, на которую может реально рассчитывать человечество теперь и в ближайшем будущем.

«Живая» вода «Протиус» миф или реальность?

Сказки про «живую» воду не были плодом фантазии. Люди давно подметили, что целебными свойствами обладает талая и ледниковая вода. Позже ученые нашли объяснение этому феномену — в ней, по сравнению с обычной, гораздо меньше молекул, где атом водорода заменен его тяжелым изотопом — дейтерием.

Легенда о «живой» воде обрела под собой твердую почву в шестидесятых годах прошлого века. В то время бурно развивалась атомная промышленность. Для ее нужд начали производить тяжелую воду. Ученые обнаружили, что побочный продукт этого производства — легкая вода (с пониженным содержанием дейтерия) — чрезвычайно благотворно влияет на живые организмы. В Московской горбольнице, где лечились атомщики, легкую воду стали использовать для оздоровления пациентов. Результаты впечатляли, но с развалом Союза у нас для научных экспериментов наступили не лучшие времена.

В конце прошлого века и на Западе заинтересовались легкой водой. Там несколько ученых запатентовали технологию производства легкой воды и ее лечебные и косметические эффекты. Теперь в США и Западной Европе она продается по шесть долларов за литр и спрос постоянно растет.

В 2005 году в г. Железнодорожном открылась Российская фирма «Протиус», где собрались ученые, работавшие в свое время в академических институтах, и энтузиасты, решившие вложить средства и силы в воду будущего. Они поставили перед собой цель — создать производство легкой воды, более эффективное, чем существующие западные аналоги. Был разработан проект и создана уникальная промышленная установка — авторская разработка сотрудников фирмы. В ней и происходит очистка воды от всех примесей центробежно-вихревым методом по оригинальной технологии, защищенной международным и российским патентами. Эта вода не содержит никаких вредных для

человека веществ и, кроме того, в ней понижено содержание дейтерия. Название новой фирме и производимой воде дали в честь протия — легкого изотопа водорода — антагониста дейтерия.

Известно, что дейтерий неблагоприятно действует на все живое. Тяжёлая вода ингибирует жизненно-важные функции роста и развития многих микроорганизмов. Некоторые бактерии выносят 70%-ную и выше концентрацию тяжёлой воды в среде, в то время как растительные клетки могут нормально развиваться при концентрациях тяжёлой воды не более 50-75% [3], а клетки животных не более 35% тяжёлой воды. Однако, впоследствии было показано, что несмотря на биостатический эффект тяжёлой воды на клетку, многие клетки бактерий, растений и животных могут быть адаптированы к тяжёлой воде.

Заместитель директора по науке фирмы «Протиус», Юрий Дробышевский считает, что когда зарождалась жизнь на планете, вся вода содержала в себе гораздо меньше дейтерия. Но с течением времени его количество в окружающей среде растёт вследствие объективных физических процессов. Клетки на генетическом уровне помнят «живую» воду. Они выталкивают дейтерий в межклеточное пространство, очищаясь от вредного изотопа. Оттуда он выводится из организма. А когда мы пьем легкую воду, то освобождаем клетки от тяжелой «ассенизаторской» работы. В ответ их энергия активнее тратится на оздоровление организма. Улучшается обмен веществ, повышается иммунитет и т.д. Следует также отметить, что стенки наших клеток — это очень тонкие природные фильтры, которые не пропускают внутрь клетки различный молекулярный «мусор». Это ионы тяжелых металлов и большие органические молекулы. Как всякий тонкий фильтр клеточные мембраны засоряются этим «мусором». Снижается их проницаемость для полезных веществ — клетки начинают болеть. Вода «Протиус» — это уникальная по своей чистоте вода, - считает Ю. Дробышевский. Она помогает вымывать из организма, накопившиеся в нем шлаки и вредные вещества. Так объясняется благотворное влияние воды «Протиус» на оздоровление людей, страдающих раком, диабетом, сердечно-сосудистыми и многими другими заболеваниями. По данным заместителя директора по производству Владимира Алымова, также отмечены хорошие косметические свойства протиевой воды

С данными, что древняя реликтовая вода в момент зарождения жизни на нашей планете содержала меньше дейтерия, чем сейчас, можно поспорить. Примеси тяжёлой воды могли образоваться из за вулканической активности и электрических разрядов молний, имеющих место быть в первобытной атмосфере, лишённой защитного озонового слоя. Но в целом, идея очистки воды от тяжёлых изотопов и примесей интересная и

многообещающая.

О ФЕНОМЕНЕ КЛЕТОЧНОЙ АДАПТАЦИИ К ТЯЖЁЛОЙ ВОДЕ

Одним из интереснейших биологических феноменов является способность некоторых микроорганизмов расти в искусственных условиях на средах, в которых все атомы протия заменены на дейтерий (О.В. Мосин, Д.А. Складнев, В. И. Швец, 1996), хотя в природе этот изотоп составляет лишь 0,015%.

При попадании клеток в дейтерированную тяжёловодородную среду из них не только исчезает протонированная вода за счет реакции обмена H_2O-D_2O , но и происходит быстрый $H\pm D$ обмен в гидроксильных, сульфгидрильных и аминогруппах всех органических соединений, включая белки, нуклеиновые кислоты, липиды, сахара. Известно, что только $C-H$ связь не подвергается обмену и соединения типа $C-D$ синтезируются «de novo» (Чиргадзе с соавт., 1967). Интересно, что после обмена $H\pm D$ ферменты не прекращают своей функции (Thomson et al., 1966; Денько, 1974), но изменения в результате изотопного замещения за счет первичного и вторичного изотопных эффектов (Thomson, 1963; Halevy, 1963), а также действие тяжёлой воды как растворителя (большая структурированность и вязкость по сравнению с обычной водой) приводят к изменению скоростей и специфичности ферментативных реакций. Изменения соотношения основных метаболитов в процессе адаптации к тяжёловодородной среде часто являются причинами гибели клеток. Так, например, клетки высших организмов погибают при содержании тяжёлой воды в составе тела свыше 30% (Денько, 1970), но микроорганизмы, легко приспосабливающиеся к резким изменениям среды обитания, способны жить и размножаться даже в 100%-ной тяжёлой воды (Мосин О.В, 1996). Давно замечено, что адаптация к тяжёлой воде проходит легче при постепенном увеличении содержания дейтерия в среде (Pratt a. Curry, 1938), так как чувствительность к тяжёлой воде разных ключевых систем различна. Способность к адаптации в высоких концентрациях тяжёлой воды связана с эволюционным уровнем организации, т. е. чем ниже уровень развития живого, тем выше способность к адаптации. Явление клеточной адаптации к тяжёлой воде интересно не только само по себе, но оно также позволяет получать уникальный биологический материал, очень удобный для решения ряда задач молекулярной организации клетки с помощью метода ЯМР-спектроскопии.

Адаптация к тяжёлой воде является фенотипическим феноменом, поскольку адаптированные к тяжёлой воде клетки возвращаются к нормальному росту в протонированных средах после некоторого лаг-периода (О.В. Мосин с соавт., 1996). В то же время обратимость роста на D-

и Н-средах не исключает возможности изменения метаболизма дейтерированных клеток, т.е. морфологической и функциональной перестройки в тяжёловодородной среде. С помощью электронной микроскопии дейтерированных и обычных клеток микрококка (В. А. Ерёмин, Л. Н. Чекулаева, 1978) были выявлены существенные различия в морфологии полученных клеток. Клетки, выращенные на Н- и D-средах, имели в 2—3 раза более толстую клеточную стенку, чем контрольные клетки, распределение в них нитей ДНК было неравномерным. На микрофотографии дейтерированных клеток хлореллы и микрококка видны как плотные (одинарная стрелка), так и электронно-прозрачные участки (двойная стрелка), последние, вероятно до приготовления срезов, состояли из плотно упакованных мембран, наподобие мезосом. Кроме того, для дейтерированного микрококка было также характерно резкое изменение формы клеток и направления их деления. При этом видно образование сложных структур, состоящих из 6—8 клеток. Наблюдавшееся деление не заканчивалось обычным расхождением дочерних клеток, а приводило к образованию атипичных клеток—«монстров», описанных Мозесом с соавт. (Moses et al., 1958).

По-видимому, наблюдаемые морфологические изменения связаны с торможением роста дейтерированных клеток и обусловлены перестройкой в процессе адаптации к тяжёлой воде. Тот факт, что дейтерированные клетки микрококка кажутся более крупными (кажущийся размер в 2—4 раза превосходит размер протонированных клеток), является общебиологическим, так как наблюдается при выращивании целого ряда животных и растительных объектов (Денько; 1970).

Чтобы сделать более конкретные выводы о природе и механизмах адаптации клеток к тяжёловодородной среде, необходимы экспериментальные данные по физиологии и биохимии адаптированных клеток. Однако не исключено, что торможение всех биологических функций (ферментативный катализ, дыхание, Деление) в момент клеточной адаптации к тяжёлой воде связано с образованием более стабильных связей, для разрыва которых требуется большая энергия. По теории абсолютных скоростей разрыв, СН-связей может происходить быстрее, чем CD-связей (Лазарева, 1973), подвижность D^+ меньше, чем подвижность H^+ , константа ионизации тяжёлой воды в 5 раз меньше константы ионизации обычной воды (Денько, 1970). Эти факты позволяют видеть некоторую аналогию между адаптацией к тяжёлой воде и адаптации к низким температурам. Ещё Юнг (Jung, 1967) на клетках *Escherichia coli*, помещенных в 98,6%-ную тяжёлую воду, показал, что эффект торможения роста тяжелой воды может быть компенсирован повышением температуры роста. Аналогия с охлаждением позволяет рассматривать адаптацию к тяжёлой воде, как адаптацию к неспецифическому фактору, действующему одновременно на функциональное состояние большого числа систем: превращение энергии, биосинтетические процессы, транспорт веществ, структуру и функции макромолекул. Возможно, что наиболее чувствительными к замене H^+ на D^+ оказываются именно те системы, которые используют высокую подвижность протонов и высокую скорость разрыва протонных связей. Такими системами в клетке могут быть дыхательная цепь и аппарат биосинтеза макромолекул, которые располагаются в цитоплазматической мембране или находятся под ее контролем.

Известно, что адаптация к тяжёлой воде происходит тем легче, чем медленнее повышается процентное содержание дейтерия в среде. Практически даже высокодейтерированные среды содержат протоны от 0,2—10%. Возможно, что остаточные протоны в момент адаптации к тяжёлой воде облегчают перестройку к изменившимся условиям, встраиваясь именно в те участки, которые наиболее чувствительны к замене. Если это так, то встраивание протонов должно приводить к накоплению легкого изотопа в органическом материале клеток и соответственно к обогащению тяжелым изотопом среды культивирования. Оказалось, что степень дейтерированности полученных клеток микрококка зависит как от исходного содержания протонов в тяжёлой воде, так и от степени дейтерированности клеток хлореллы. При выращивании клеток на тяжёловодородной среде, содержащей от 6 до 9% воды, клетки хлореллы имели показатель (H) жирных кислот из D-липидов, равным 10—18%. D-клетки микрококка, выращенные на тяжёлой воде имели показатель (H) 13,5—23%. При этом содержание протонов в средах при культивировании D-клеток хлореллы и микрококка уменьшалось, а в органическом материале выращенных клеток возросло (В. А. Ерёмин, Л.Н Чекулаева, 1978). На основании этого можно сделать вывод об избирательном поглощении протонов из высокодейтерированных сред в процессе адаптации и роста клеток хлореллы и микрококка. По-видимому, избирательное накопление легких изотопов в органическом материале клеток в процессе роста на среде с тяжелым изотопом является общебиологическим, так как наблюдается для широкого круга объектов (Денько, 1970) и для фракционирования легкого изотопа ^{12}C в среде, содержащей ^{13}C (Ивлев с соавт., 1975; Бондарь, 1976).

сравнительный анализ липидного состава дейтерированных клеток *B. subtilis*, полученных при росте на тяжёлой воде показал различия в количественном составе мембранных липидов по сравнению с обычной водой (рис.1. Примечательно, что в образце полученном с тяжёлой воды соединения, имеющие времена удерживания - 33.38; 33.74 и 33.2 мин не детектируются (рисунок 1 б). Полученный результат, по видимому, объясняется тем, что клеточная мембрана является одной из первых органелл клетки, которая испытывает воздействие тяжёлой воды, и тем самым компенсирует реологические параметры мембраны (вязкость, текучесть, структурированность) изменением количественного состава липидов.

Выбор бактерий как объекта исследований представляется наиболее целесообразным, так как в этом случае способность адаптации к тяжёлой воде, обусловленная эволюционной «примитивностью», сочетается с относительной легкостью получения чистых мембран.

ЛИТЕРАТУРА

- Бондарь В. А. 1976. Докл. АН СССР, 227, 2, 497.
- Гельман Н. С., Лукоянова М. А. и Островский Д. Н. 1972. Мембраны бактерий и дыхательная цепь. «Наука», М.
- Денько Е. И. 1970. Успехи соврем. биол., 70, 1(4), 41.
- Ерёмин В. А., Чекулаева Л. Н. Выращивание бактерий *Micrococcus lysodeikticus* на дейтерированной среде, Микробиология, 1978
- Ивлев А. А., Королева М. Я. в Колошин А. Г. 1976. Мол. биол., 9, 3, 436.
- Коротяев А. И. 1973. Механизмы саморегуляции бактериальной клетки. «Медицина», М.
- Лазарева А. В. 1973. Избирательное изотопное замещение водорода на дейтерий в полипептидной цепи цитохрома С. Дисс. Ин-т биофизики АН СССР, Пущине.
- Мосин О. В., Карнаухова Е. Н., Пиеничникова А. Б., Складнев Д. А., Акимова О. Л. // Биотехнология. - 1993. - N 9. - С. 16-20.
- Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Юркевич А. М., Швец В. И. // Биотехнология. - 1996. - N 3. - С. 3-12.
- Мосин О. В., Складнев Д. А., Егорова Т. А., Швец В. И. // Биоорганическая химия. - 1996. - Т. 22. - N 10-11. - С. 856-869.
- Островский Д. Н. 1973. Строение, свойства и некоторые функции мембран бактериальной клетки. Дисс. Ин-т биохимии, М.
- Семененко В. Е. и Зверева М. Г. 1972. Физиол. растений, 19, 229.
- Успенская В. И. 1966. Экология и физиология питания пресноводных водорослей. МГУ, М.