

Тема 4. Водород и кислород

Водород и кислород

Водород и кислород																		VIII A	
I A																18			
1																4,00260			
1	1,00794															2 He			
	1H															Гелий			
II A																VII A			
2																17			
2	6,941	9,01218															20,1797		
	3Li	4Be															10Ne		
3	22,9898	24,3050															39,948		
	11Na	12Mg															18Ar		
4	39,0983	40,078															83,798		
	19K	20Ca															36Kr		
5	85,4678	87,62															131,293		
	37Rb	38Sr															54Xe		
6	132,905	137,327															[222]		
	55Cs	56Ba															86Rn		
7	[223]	[226]															[294]		
	87Fr	88Ra															118Uuo		

III A	IV A	V A	VI A	VII A
13	14	15	16	17
10,811	12,0107	14,0067	15,9994	18,9984
5B	6C	7N	8O	9F
БОР	УГЛЕРОД	АЗОТ	КИСЛОРОД	ФТОР
26,9815	28,0855	30,9738	32,065	35,453
13Al	14Si	15P	16S	17Cl
АЛЮМИНИЙ	КРЕМНИЙ	ФОСФОР	СЕРА	ХЛОР
69,723	72,63	74,9216	78,96	79,904
31Ga	32Ge	33As	34Se	35Br
ГАЛЛИЙ	ГЕРМАНИЙ	МЫШЬЯК	СЕЛЕН	БРОМ
114,818	118,710	121,760	127,60	126,904
49In	50Sn	51Sb	52Te	53I
ИНДИЙ	ОЛОВО	СУРЬМА	ТЕЛЛУР	ИОД
204,383	207,2	208,980	[209]	[210]
81Tl	82Pb	83Bi	84Po	85At
ТАЛЛИЙ	СВИНЕЦ	ВИСМУТ	ПОЛОНИЙ	АСТАТ
[286]	[289]	[289]	[293]	[294]
113Uut	114Fl	115Uup	116Lv	117Uus
	ФЛЁРОВИЙ		ЛИВЕРМОРИЙ	

III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII B			IB	II B
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
44,9559	47,867	50,9415	51,9961	54,9380	55,845	58,9332	58,6934	63,546	65,38
21Sc	22Ti	23V	24Cr	25Mn	26Fe	27Co	28Ni	29Cu	30Zn
СКАНДИЙ	ТИТАН	ВАНАДИЙ	ХРОМ	МАРГАНЕЦ	ЖЕЛЕЗО	КОБАЛЬТ	НИКЕЛЬ	МЕДЬ	ЦИНК
88,9058	91,224	92,9064	95,96	[98]	101,07	102,905	106,42	107,868	112,411
39Y	40Zr	41Nb	42Mo	43Tc	44Ru	45Rh	46Pd	47Ag	48Cd
ИТТРИЙ	ЦИРКОНИЙ	НИОБИЙ	МОЛИБДЕН	ТЕХНЕЦИЙ	РУТЕНИЙ	РОДИЙ	ПАЛЛАДИЙ	СЕРЕБРО	КАДМИЙ
174,967	178,49	180,948	183,84	186,207	190,23	192,217	195,084	196,967	200,59
71Lu	72Hf	73Ta	74W	75Re	76Os	77Ir	78Pt	79Au	80Hg
ЛЮТЕЦИЙ	ГАФНИЙ	ТАНТАЛ	ВОЛЬФРАМ	РЕНИЙ	ОСМИЙ	ИРИДИЙ	ПЛАТИНА	ЗОЛОТО	РУТУТЬ
[262]	[267]	[270]	[271]	[274]	[277]	[278]	[281]	[281]	[285]
103Lr	104Rf	105Db	106Sg	107Bh	108Hs	109Mt	110Ds	111Rg	112Cn
ЛОУРЕНСИЙ	РЕЗЕРФОРДИЙ	ДУБНИЙ	СИБОРГИЙ	БОРИЙ	ХАССИЙ	МЕЙТНЕРИЙ	ДАРМШТАДТИЙ	РЕНТГЕНИЙ	КОПЕРНИЦИЙ

*** ЛАНТАНОИДЫ**

*** * АКТУАЛИИ**

138,905	140,116	140,908	144,242	[145]	150,36	151,964	157,25	158,925	162,500	164,930	167,259	168,934	173,054
57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
ЛАНТАН	ЦЕРИЙ	ПРАЗЕОДИМ	НЕОДИМ	ПРОМЕТИЙ	САМАРИЙ	ЕВРОПИЙ	ГАДОЛИНИЙ	ТЕРБИЙ	ДИСПРОЗИЙ	ГОЛЬМИЙ	ЭРБИЙ	ТУЛИЙ	ИТТЕРБИЙ
[227]	232,038	231,036	238,029	[237]	[244]	[243]	[247]	[247]	[251]	[252]	[257]	[258]	[259]
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No
АКТИНИЙ	ТОРИЙ	ПРОТАКТИНИЙ	УРАН	НЕПУНИЙ	ПЛУТОНИЙ	АМЕРИЦИЙ	КЮРИЙ	БЕРКЛИЙ	КАЛИФОРНИЙ	ЗИНШТЕЙНИЙ	ФЕРМИЙ	МЕНДЕЛЕВИЙ	НОБЕЛИЙ

Свойства водорода и кислорода

Элемент	Н	О
Атомный номер	1	8
Валентности	1	-2
Радиус иона, Å	1,42 <i>гидроксил OH⁻</i>	1,40
Координационное число	VIII-XII	VIII-XII
Распространенность, %		
- Земная кора	0,16	47,9
- <i>С учетом подземных вод</i>	<i>0,28</i>	
- <i>С добавкой океана</i>	<i>0,85</i>	
- ультра-осн. г. п.		43,9
- основные г. п.		44,0
- средние г. п.		43,2
- кислые г. п.		48,0
Вода океана, мг/кг	10,8%	85,9%
Число минералов	2800	4115
Производство, т (2022 г.)	95 000 000	440 000 000

Свойства воды

- Вода обладает сразу несколькими уникальными характеристиками:
 - имеет высокую теплоемкость и большие энергии фазовых переходов, причем фазовые переходы происходят в диапазоне температур поверхности Земли;
 - прекрасный растворитель для веществ с ионным типом связи;
 - жидкая и парообразная вода прекрасно мигрируют в условиях внешних оболочек Земли.
- Вода – важнейшее вещество в геологических процессах, поскольку благодаря своим свойствам:
 - обеспечивает эффективный теплоперенос во внешних оболочках Земли;
 - обеспечивает эффективный массоперенос во внешних оболочках Земли;
 - водная среда существенно ускоряет протекание химических реакций.

Свойства воды

- Основная доля воды поверхностных оболочек Земли ($1\,338$ млн. км³) сосредоточена в Мировом океане. Мировой океан составляет около 5% от суммарной массы внешних оболочек Земли.
- В Земной коре вода находится в трех формах – химически связанной (в гидратированных минералах), физически связанной (сорбированной на минеральных поверхностях) и свободной (поровой, подземных водах). В осадочной оболочке соотношение этих форм (в млн. км³): 170 : 30: 44.
- Оценки содержания подземных вод в кристаллической части земной коры в настоящее время недостаточно надежны.
- В общем балансе гидросферы на долю Мирового океана приходится 92%, подземные воды составляют около 6%, ледники - 1,3%, поверхностные воды суши – всего лишь 0,03%.
- Однако речные воды имеют очень большую по геологическим масштабам скорость возобновления - $\tau = 39$ дней.
- Средняя соленость воды Мирового океана составляет 35 г/кг, речных вод – 89 мг/кг, соленость подземных вод меняется в широких пределах от 0,2 до >350 г/кг.



По [The USGS Water Science School - The Water Cycle]

Свойства воды

- В магматических процессах вода ведет себя, как некогерентный элемент (по петрохимическим данным $H_2O/Se \approx 1$). Вода накапливается в остаточных расплавах, и при дифференциации средних и кислых пород может образовывать водно-солевой флюид, дающий начало постмагматическим процессам (образованию пегматитов, скарнов и грейзенов). В эффузивном магматизме вода бурно отделяется от расплава в виде пара, придавая вулканизму взрывной характер.
- В гидротермальном процессе вода – главный действующий агент, определяющий перенос и отложение рудного вещества.
- В экзогенных процессах вода активно участвует в химическом и физическом выветривании. Образование осадочных пород (за исключением эоловых отложений) происходит в водной среде, при этом на долю морских осадков приходится более 80%, а в осадках, образовавшихся на суше преобладают аллювиальные и озерные (лагунные) отложения.

Свойства воды

- Вода – важнейший компонент биосферы. По современным представлениям зарождение жизни на Земле произошло в водной среде.
- Вода необходима всем живым организмам. Физиологическая потребность человека в воде – 40-50 мг/кг/сут (для взрослых – 2-3 л/день). Недостаток воды быстро отражается на состоянии человека – при потере уже 1 % воды появляются болезненные симптомы, потеря 20-25 % приводит к гибели.
- Организм человека чувствителен к составу растворенных в воде веществ (как недостатку, так и избытку).

Свойства воды

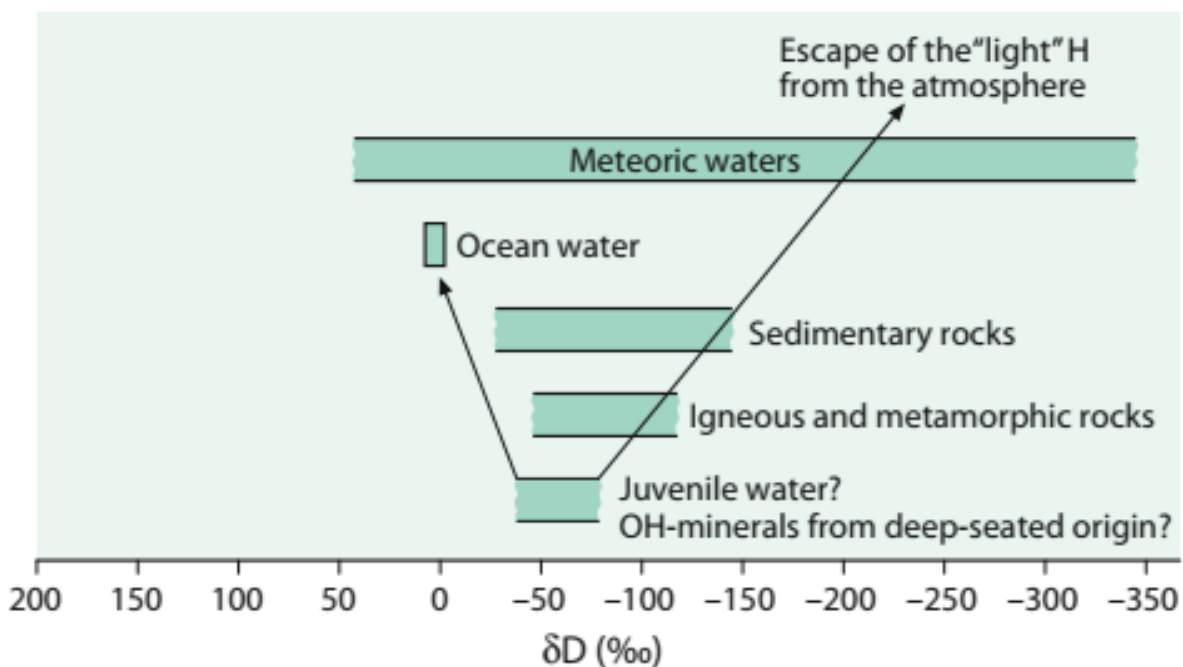
- **Потребление воды.** Годовое потребление воды мировым хозяйством составляет около 5 трлн. т. Это самый большой природный ресурс, используемый человеком. Он на два порядка превосходит суммарную массу всех остальных ресурсов, включая руды, горючие ископаемые, стройматериалы и пищу.
- Современная структура расходования воды: 61% - сельское хозяйство, 21% - промышленность, 6% - коммунально-бытовое хозяйство. При этом собственно питьевые расходы составляют ничтожную долю (0,2 %).
- Основной объем потребления – это вода пресная. Мировые ресурсы пресных вод велики, проблема заключается в их неравномерном распределении по поверхности суши и в несовпадении с географией водопотребления. Многие страны тропических климатических поясов испытывают сильный недостаток пресной воды.
- **Качество воды в гидросфере – одна из основных проблем геоэкологии.**

Водород

- Водород – самый распространенный элемент в Солнечной системе. Однако при формировании планет во внутренней части протопланетного облака его концентрация определялась захватом твердым веществом. Основная масса водорода и его летучих соединений (воды, метана, аммиака и др.) при дифференциации протопланетного облака была оттеснена в его периферическую часть.
- В углистых хондритах – метеоритах, самых богатых летучими компонентами, распространенность водорода 1,9%, а в обыкновенных хондритах (основном компоненте формирования силикатной части Земли) его очень мало (~0,05%). Во внешних оболочках Земли водород находится большей частью в составе воды Мирового океана.
- В соответствии с распределением в метеоритах водород в классификации В.М.Гольдшмидта отнесен к классу атмофильных элементов. В Земной коре он проявляет свойства литофила.
- Водород – биофильный элемент, он входит в состав почти всех биогенных органических соединений.

Водород

Водород имеет 2 стабильных изотопа: ^1H (протий, 99,9885%) и ^2D (дейтерий, 0,0115%). Третий изотоп ^3T (тритий) – радиоактивный, имеет $\tau_{1/2}=12,24$ года. Тритий на земле имеет космохимическое происхождение, он β -излучатель, при распаде превращается в ^3He . В атмосфере сейчас присутствует значительная доля техногенного («бомбового») трития.



- Изотопы водорода в природных процессах способны сильно фракционировать, особенно – в низкотемпературных процессах. Вариации его изотопного состава превышают 500‰ (Hoefs, 2018). Изотопный стандарт по водороду – средняя морская вода (SMOW). Изотопная геохимия водорода в целом хорошо изучена.
- Изотопный состав водорода удается успешно использовать для решения геохимических задач, в первую очередь – для выявления источников воды в гидротермальных и осадочных процессах, и для определения источника органических соединений.
- Тритий используется в гидрогеологии для определения возраста инфильтрации пресных подземных вод и расчета дебита водозаборов.

Водород

- В природе водород присутствует в виде воды (льда, жидкости и пара), в минералах – в форме кристаллизационной и сорбированной воды и в виде иона OH^- в кристаллической решетке, в водных растворах – в виде ионов OH^- и H^+ , как свободных, так и комплексных. Водород входит в состав множества органических и минеральных соединений. Основное валентное состояние +1.
- Для судьбы водорода в кристаллическом веществе имеет большое значение изовалентный изоморфизм $\text{OH}^- - \text{F}^-$.
- Водород входит во множество минералов (2800 из более 5000 учтенных на 2015 г.), относящихся к классам силикатов, алюмосиликатов, гидрофосфатов и др., а также – разнообразных минералов с кристаллизационной водой. Найдено более 100 минералов, образованных органическими кислотами и/или органическими катионами.

Водород

- Геохимическое поведение водорода в составе воды изложено в начале лекции. Поведение в составе соединений с C, N, S и др. будет рассмотрено в разделах для соответствующих элементов.
- **Геохимия свободного (молекулярного) водорода.** Молекулярный водород – сильный и очень реакционно-способный восстановитель. Он образуется в некоторых природных процессах, но быстро связывается как биологическим, так и абиогенным путем. Существенное образование водорода зафиксировано в трех группах процессов:
- Водород постоянно фиксируется в вулканических газах (в островодужных вулканах – третий по значению компонент после H_2O и CO_2).
- Свободный водород образуется при взаимодействии подземных и термальных вод с породами ультраосновного состава (офиолиты Омана и Апеннин; «курильщики» в Атлантическом и Индийском океанах).
- Водород образуется при некоторых типах брожения из органического вещества.

Водород

- **Использование.** Водород используется во многих современных технологиях. Применение его ограничено двумя недостатками: 1) водород взрывоопасен при смешении с воздухом; 2) водород очень хорошо диффундирует через твердые (в т.ч. – металлические) мембраны.
- Третья часть (33%) мирового использования газообразного водорода – получение аммиака для удобрений из азота воздуха. Водород в больших масштабах применяется при переработке нефти (43 %), в металлургии (прямое восстановление железа) и в химической промышленности (синтез метанола – 17%, и др.). Он используется также в пищевой промышленности для получения маргарина.
- В ведущих промышленных странах идут интенсивные разработки применения водородных двигателей на транспорте (автомобили, самолеты, поезда), бытовых топливных элементов, инфраструктуры водородной энергетики.
- Водород рассматривается как перспективный накопитель энергии для ВИЭ (возобновляемых источников энергии), часто имеющих периодические колебания мощности.
- Широкому внедрению **водородной энергетики** на транспорте и в быту препятствует отсутствие в настоящее время надежных технологий хранения и транспортировки больших количеств газообразного водорода.

Водород

- **Производство водорода.** В природе промышленно значимых ресурсов молекулярного водорода нет. Водород не добывается, а производится!
- Мировое производство газообразного водорода в настоящее время быстро растет. В 2022 г. оно достигло 95 млн. т, и на период до 2030 г. ожидается дальнейший рост производства на ~10 % в год.
- Более половины общего количества водорода сейчас получают методом парового риформинга природного газа. При этом на 1 т произведенного H_2 образуется от 9 до 12 т CO_2 (парникового газа!). Водород также получают методами газификации угля, пиролиза метана и др.
- В большинстве планируемых технологий водород является фактически промежуточным носителем энергии, а начальный энергетический природный ресурс — по-прежнему углеродный! Меняется только география выбросов CO_2 - с места потребления энергии на место производства носителя - H_2 .

Водород

Международное экологическое сообщество возлагает большие надежды на **водородную энергетику, как альтернативу существующей сейчас углеродной.**

По способу получения водороду в рамках этой идеологии присвоены цветовые маркеры:

- «серый» (gray) водород – полученный паровым риформингом природного метана (мировой уровень цен 1-2 \$ за 1 кг);
- «черный/бурый» водород – газификация угля (цена аналогичная); «black» – из каменного угля, «brown» – из бурого угля;
- «голубой» (blue) водород – полученный конверсией метана с последующим улавливанием и захоронением CO₂ (технологии CCS - Carbon capture and storage); эти технологии еще не вышли из стадии промышленных экспериментов (ожидаемая цена 2,8-3,5 \$ за 1 кг); в этих технологиях не удастся полностью избежать выбросов CO₂.
- «бирюзовый» (turquoise) водород – полученный пиролизом метана; при этом образуется твердый углерод, который может быть использован в промышленности (например, как наполнитель резины в покрышках) (цена около 2 \$ за 1 кг);
- «зеленый» (green) водород – полученный электролизом воды; электроэнергия для этого получена с помощью возобновляемых источников (солнца, ветра и др.) (цена до 9 \$ за 1 кг);
- «розовый» (pink) и «красный» (red) водород – полученный на атомных электростанциях электролизом воды или высокотемпературным каталитическим разложением (в мире есть 1 демонстрационный проект такого производства – в США);
- «пурпурный» (purple) водород – комбинированное хемо-термическое разложение воды на термоядерных установках (проект);
- «белый» (white) водород – природный, присутствующий в Земной коре (не добывается).

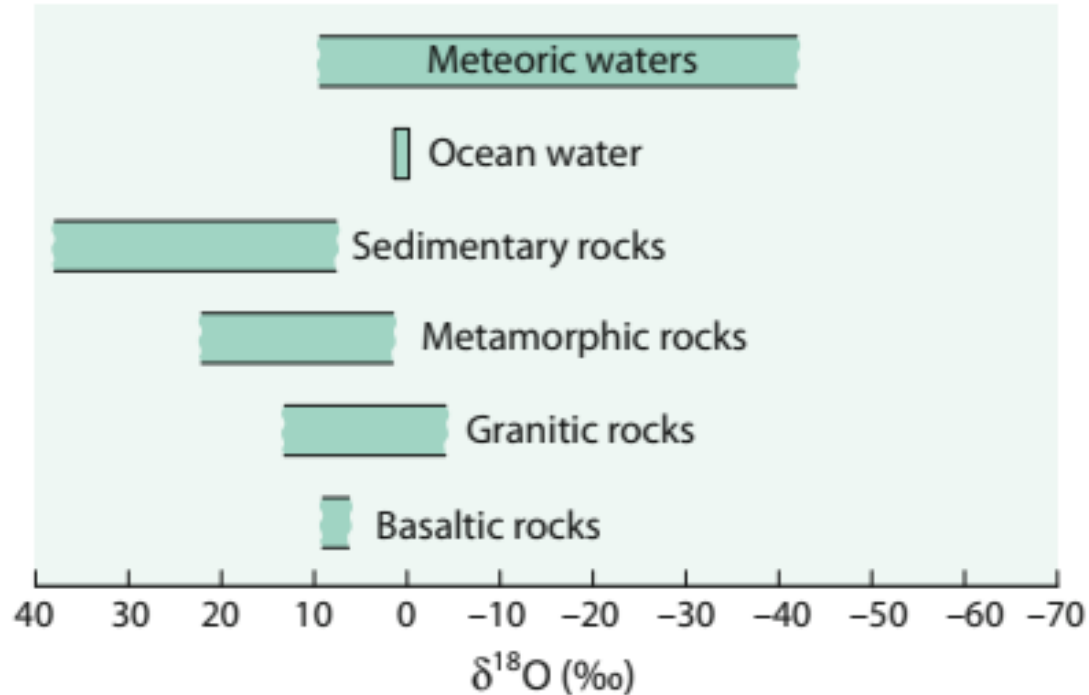
Из приведенных данных следует, что на уровне существующих технологий «безуглеродная» водородная энергетика экономически неконкурентноспособна. В настоящее время на долю «голубого» и «зеленого» водорода приходится менее 1 % мирового производства.

Активное обсуждение мировой общественностью «экологически чистой» водородной энергетики имеет в основном социальные и политические корни, и в значительной степени спекулятивно.

Кислород

- Кислород – самый распространенный элемент в Земной коре.
- Необходимо особо отметить, что при расчете объема, занимаемого атомами разных элементов в Земной коре, на долю кислорода приходится 70%. По существу, почти вся Земная кора сложена плотнейшими упаковками атомов кислорода, и все остальные элементы «ютятся» в полиэдрах этой суперструктуры.
- Кислород – один из главных элементов класса литофилов в классификации В.М.Гольдшмидта. Именно сродство к кислороду определяет нахождение большинства элементов в этом классе.
- Свободный кислород – сильнейший окислитель, он реагирует с веществами, содержащими элементы переменной валентности, и таким образом быстро связывается. Наличие свободного кислорода в атмосфере Земли – исключительное явление в Солнечной системе, обязанное фотосинтезирующим организмам, эволюционно развившимся на Земле.

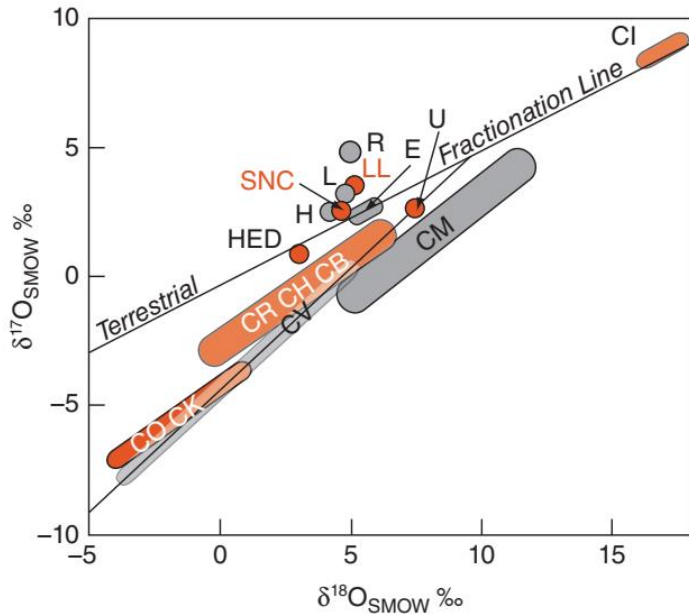
Кислород



- Кислород имеет 3 стабильных изотопа: ^{16}O (99,757%), ^{17}O (0,038%) и ^{18}O (0,205%). В природе установлены значительные вариации изотопные отношений $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ($\delta^{18}\text{O}$, изотопный стандарт – средняя морская вода SMOW). К настоящему времени получен огромный материал по изотопии O, который успешно используется для решения геолого-геохимических задач.

- Наиболее существенные из них – определение источника воды (вместе с изотопией водорода) и определение палеотемператур (по биогенным карбонатам и фосфатам – для осадочного процесса, по силикатам и оксидам – для гидротермального рудообразования).

Кислород



- Исследования малого изотопа кислорода ^{17}O первоначально не привлекали внимания исследователей. В 1973 г. Р.Клейтон обнаружил нарушения пропорций изотопного фракционирования в космохимических объектах. Оказалось, что в координатах $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{17}\text{O}$ Земля, Луна и несколько групп метеоритов ложатся на общую линию фракционирования (TFL), тогда как CAI-включения и несколько подгрупп углистых хондритов – на другую. Это явление до сих пор служит предметом дискуссий.

- В последние два десятилетия изотопный состав по ^{17}O стал активно изучаться в земных объектах в связи с обнаружением масс-независимого фракционирования (MIF) изотопов в фотохимических процессах в атмосфере Земли. Такое фракционирование в архейских сульфатах было зафиксировано сначала по изотопам серы, а в последние годы - также по изотопам кислорода. Исчезновение MIF в позднем архее исследователи пытаются связать с образованием в атмосфере Земли озонового экрана в ходе «Great Oxygenation Event» (2.2 – 2.45 млрд. лет).

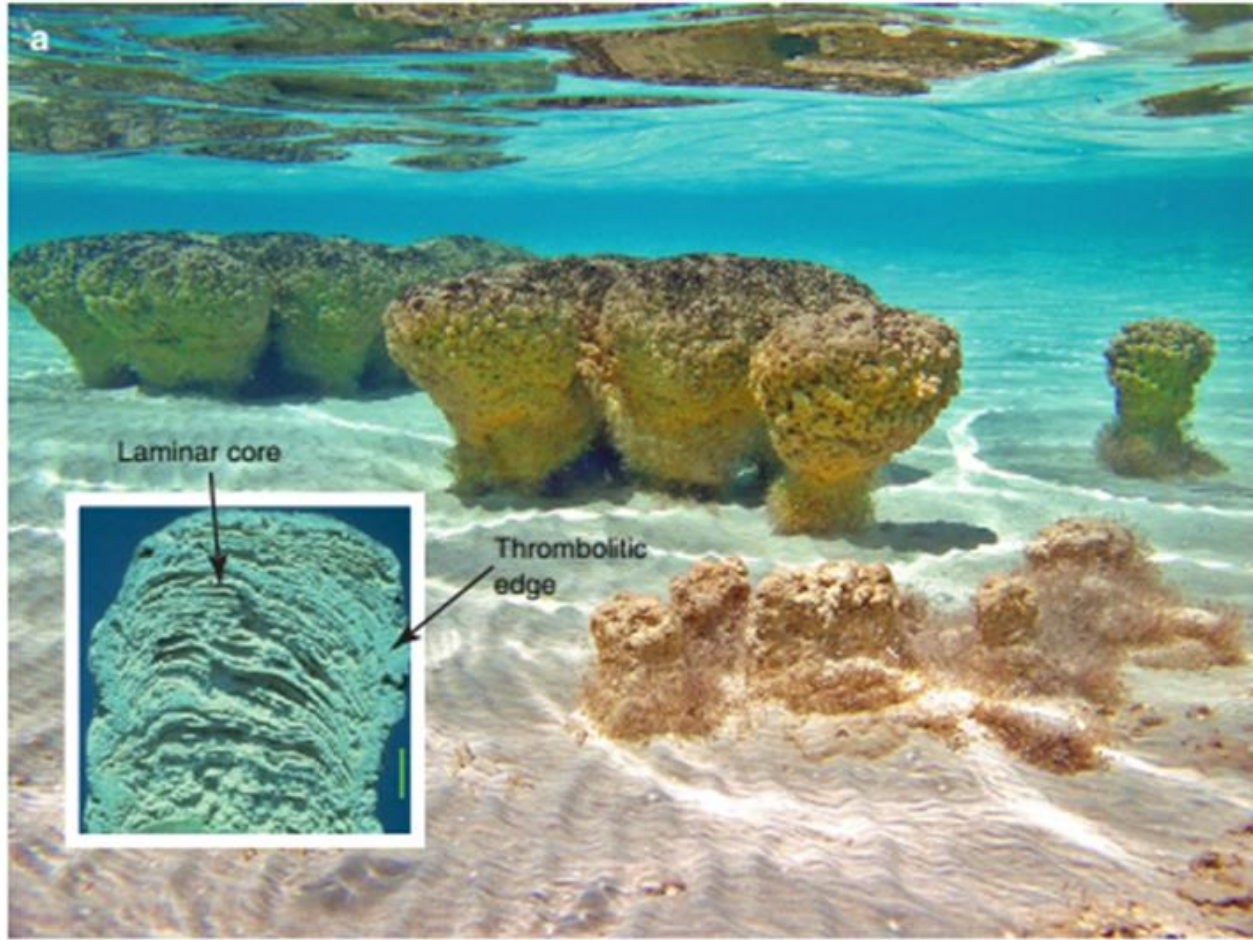
Кислород

- Кристаллохимический радиус иона O^{2-} 1.40 Å. В кристаллической решетке силикатов и алюмосиликатов он может быть заменен гидроксил-ионом (1.42 Å); поскольку такое замещение – гетеровалентное, требуется компенсация заряда по другой позиции.
- Кислород – главный минерогенный элемент в Земной коре. Найдено более 4 тысяч кислород-содержащих минералов (из немногим более 5 тыс. известных).
- В геологических процессах кислород фактически образует матрицу, внутри которой перемещаются атомы мигрирующих элементов.
- Свободный (молекулярный) кислород в недрах Земли отсутствует.
- Тем не менее, в магматическом процессе наблюдаются тренды окисленности образующихся пород. В континентальной коре магматизм идет по «Боуэновскому тренду», приводящему к повышению окисленности образующихся пород при кристаллизации расплавов и появлению в породах магнетита. Для океанских базальтов процесс идет по восстановительному «Феннеровскому тренду».
- В гидротермальных процессах изменения окисленности сильно зависят от состава исходных флюидов и вмещающих пород.

Кислород

- Основной источник свободного кислорода в современной атмосфере – биогенный фотосинтез, результат жизненных процессов в цианобактериях и зеленых растениях. Биогенный фотосинтез – эволюционное достижение жизни на Земле, он появился не позже 2,8 млрд. лет назад (по датировкам достоверно установленных строматолитов).
- До появления биогенного фотосинтеза в атмосфере работал слабый фотохимический источник кислорода (фотолиз воды + преимущественная диссипация водорода в космос). В настоящее время этот источник тоже работает, но он (оценочно) в 25 раз слабее фотосинтеза.
- При биогенном фотосинтезе образуется пара соединений: кислород + органическое вещество. Биогенная деструкция органического вещества и горение уничтожают их, замыкая биологический цикл. Этот цикл замкнут почти полностью – часть органического вещества (около 1 %) уходит из биологического круговорота при осадкообразовании. Таким образом, накопление свободного кислорода в атмосфере Земли – это следствие захоронения органического вещества в Земной коре.
- Свободный кислород из атмосферы расходуется также в процессах выветривания горных пород, содержащих элементы в низших валентных состояниях (Fe^{II} , S^{II} и др.).

Строматолиты – признак появления фотосинтезирующих организмов.

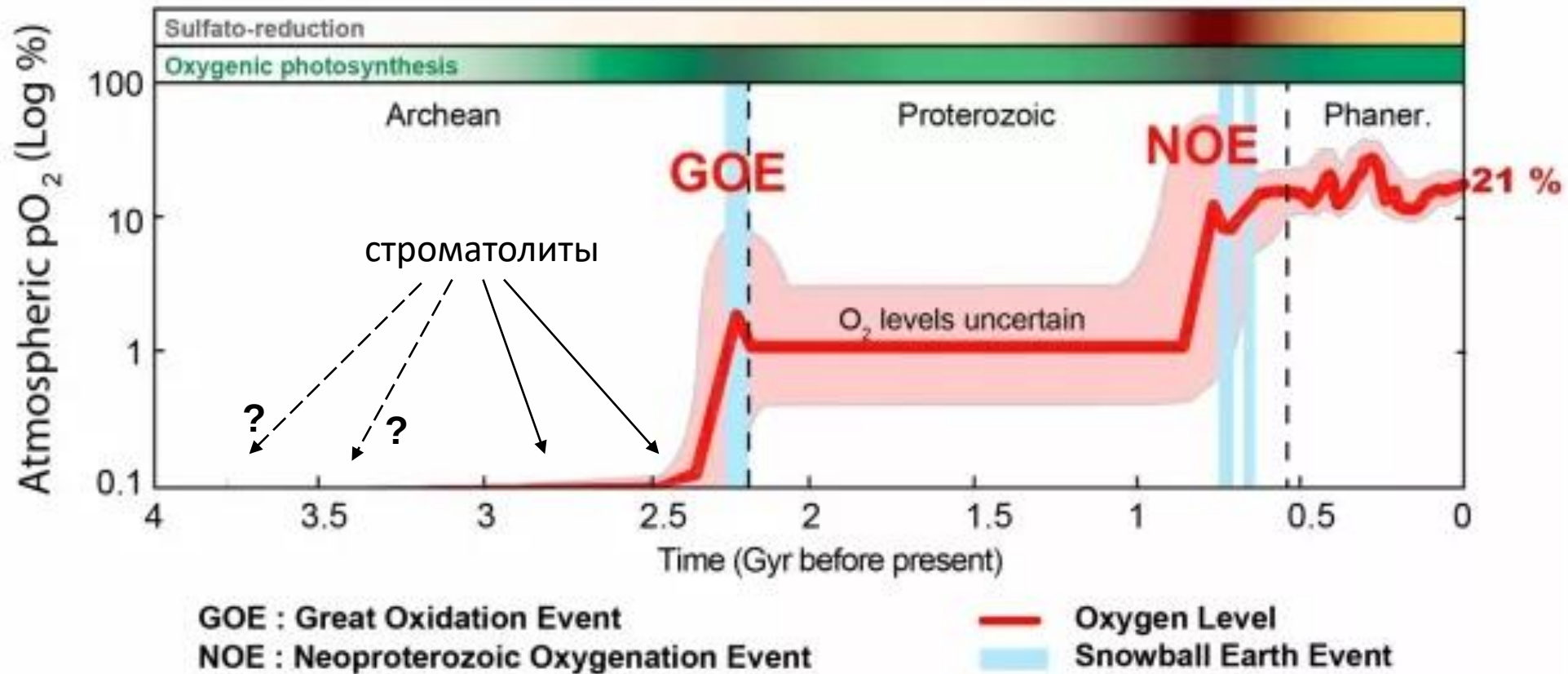


Самые древние обнаруженные достоверные строматолиты имеют возраст около 2.8 млрд. лет.

В ранне-архейских метаосадочных породах с возрастaми до 3,8 млрд. лет (Гренландия) найдены карбонатные образования, которые их исследователи квалифицируют как строматолито-подобные. Однако, их биологическое происхождение остается дискуссионным.

Современные строматолиты заказника Hamelin Pool (Австралия). На врезке видна специфическая микрослоистая текстура карбонатного вещества строматолита.

Возникновение и эволюция кислородной атмосферы Земли. Great Oxygenation Event



Предполагается, что наивысшее содержание O_2 в воздухе на Земле (оценочно, 35% об.) было в конце каменноугольного периода, 300 млн. лет назад.

Кислород

- **Техническое использование кислорода** – он в широких масштабах используется в металлургии для получения конвертерной стали, сварки и резки металлов, в химической промышленности как окислитель во многих процессах. Кислород используется в медицине и в системах жизнеобеспечения – в пожарных службах, самолетах, подводных лодках, при дайвинге.
- Объемы получения кислорода из воздуха превышают 400 млн. т в год. Основная используемая технология – фракционная перегонка сжиженного воздуха с разделением кислорода, азота, аргона, а также – тяжелых благородных газов.

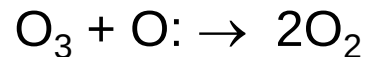
Кислород

- Аллотропная модификация кислорода – озон O_3 , газ с резким запахом.
- Важнейшее значение для биосферы имеет существование в стратосфере Земли на высоте 15-25 км слоя повышенных (но микроскопических) концентраций озона. Озон в этом слое образуется, а затем разрушается ультрафиолетовым излучением Солнца (цикл Чапмена).

Реакции образования: $O_2 + h\nu_1 \rightarrow 2O:$



Реакции разрушения: $O_3 + h\nu_2 \rightarrow O_2 + O:$



- Оба процесса идут с поглощением ультрафиолетового излучения, но в разных полосах спектра. За счет этого до поверхности Земли доходит только часть этого излучения. Биосфера земли приспособлена к такому спектру Солнца.
- Гибель озона, помимо цикла Чапмена, идет в циклических процессах, катализируемых окислами азота, перекисью водорода, фтор-хлор-углеродами (фреонами), а также – менее эффективно – метаном, водородом и другими веществами.

Кислород

- **Токсичность.** Озон в окружающем воздухе токсичен для человека. Он вызывает раздражение и ожоги дыхательных путей.
- Для озона установлена ПДК 0,1 мг/м³ в воздухе рабочей зоны. В промышленных условиях и быту озон возникает при электрических разрядах (например, при искрении в электродвигателях).
- Озон – один из компонентов фотохимического смога. Он образуется в фотохимических процессах с участием окислов азота (антропогенного происхождения – из выбросов двигателей внутреннего сгорания).
- Обнаружены локальные минимумы концентрации озона, периодически возникающие в стратосфере – «озоновые дыры». Венская конвенции об охране озонового слоя (1985) и принятый на ее основе Монреальский протокол (1986 г.) связывают их образование с антропогенной эмиссией хлор-содержащих фреонов.
- Эта гипотеза подвергается критике многими исследователями на протяжении всего времени ее существования. Вопрос о действенности Монреальского протокола носит в настоящее время исключительно политический характер.

