

# Тема 20. Геохимия биосферы, ч. 1. Строение и свойства биосферы

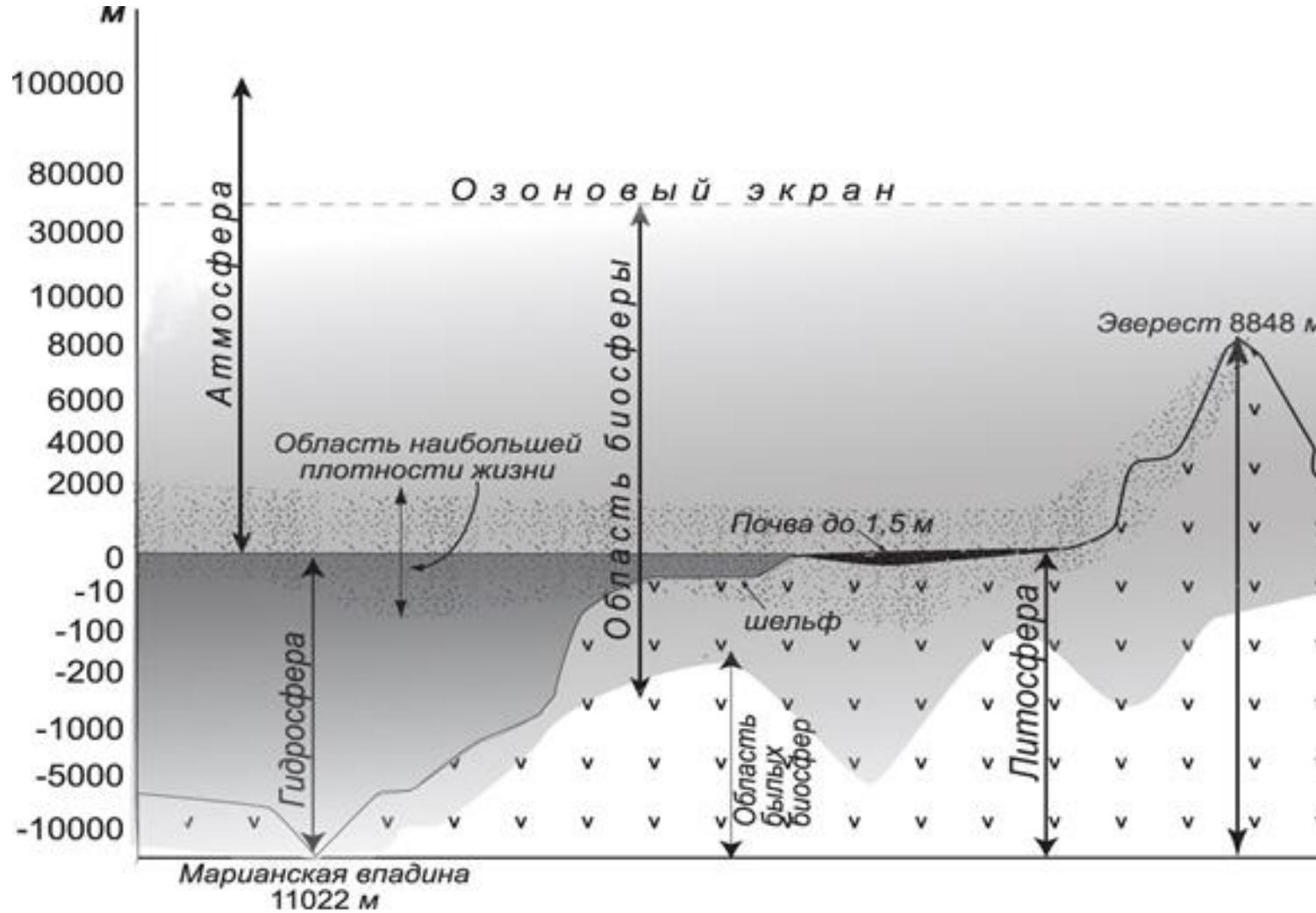
# Определение понятия биосфера.

Термин «биосфера» впервые использовал Э.Зюсс в работе «История Альп» (1875). Биосфера при этом понималась, как «живой покров Земли» (современный эквивалент – «живое вещество»).

Современное понимание термина введено В.И.Вернадским в книге «Биосфера» (1925).

**Биосфера – это область, занятая жизнью  
и находящаяся под ее влиянием.**

# Границы биосфера



Положение области биосфера во внешних оболочках Земли (По Г.Б.Наумову, 2010)

# Строение биосферы

В составе биосферы В.И.Вернадский выделил четыре принципиальных компонента;

- живое вещество;
- органическое [биогенное] вещество;
- биокосное вещество [неорганическое и смешанное вещество, образовавшееся биологическим путем];
- косное вещество [не несущее следов биологической деятельности].

# Относительные массы компонентов биосферы

Компонент	Масса	Во сколько раз больше живого вещества
Живое вещество	$2.4 \times 10^{18}$ г	≡1
Органическое	$2 \times 10^{22}$ г	8 300
Биокосное (~осадочная оболочка)	$3 \times 10^{24}$ г	1 250 000
Косное вещество	$3 \times 10^{25}$ г	12 500 000
Для сравнения:		
Атмосфера	$5 \times 10^{18}$ г	2
Гидросфера	$1.6 \times 10^{24}$ г	670 000

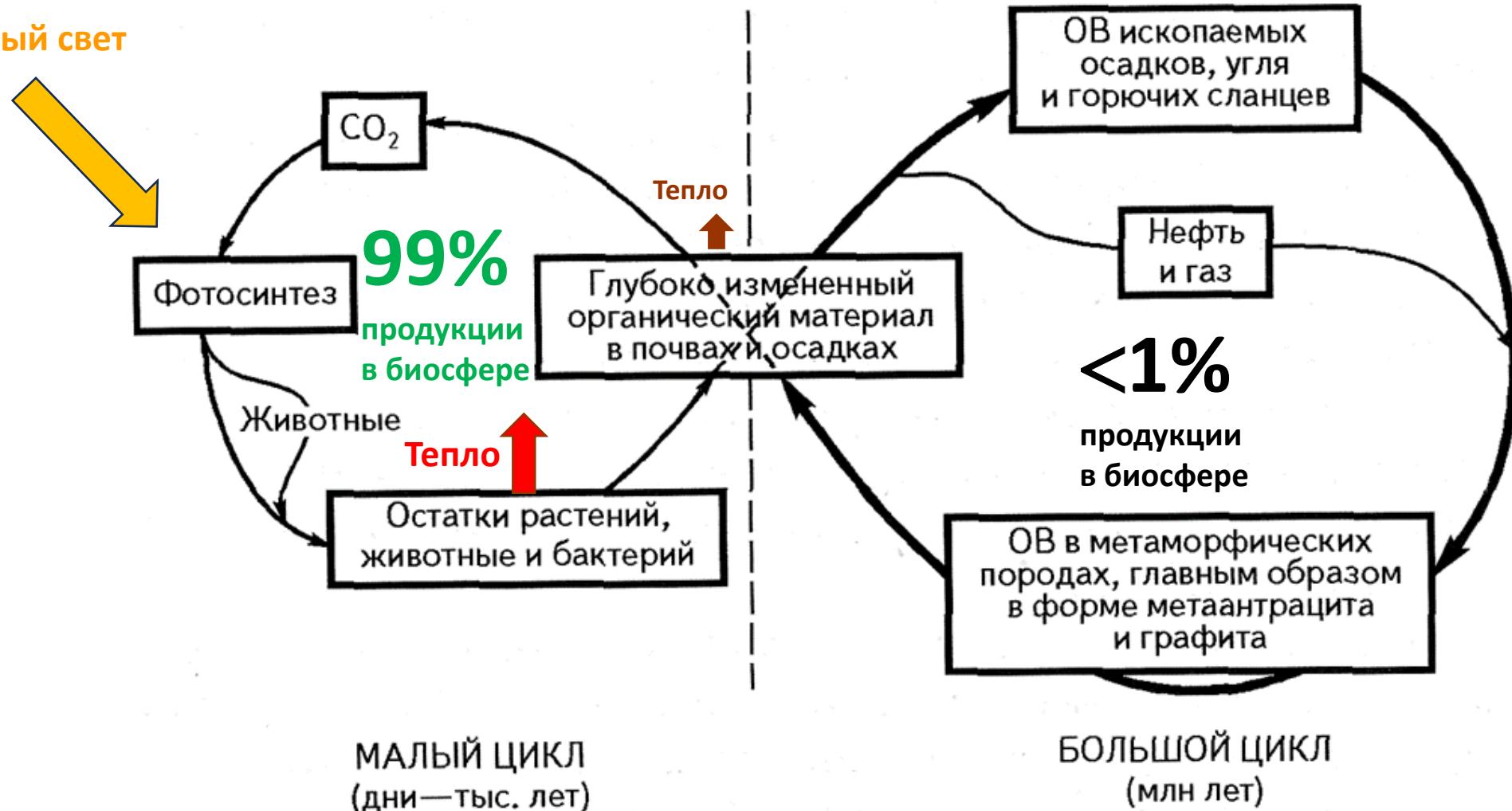
# Круговорот компонентов биосферы

Вещество	Процесс	Характерное время пребывания $\tau$ , лет
Живое вещество	Образование / деструкция	16
Органическое вещество	Захоронение / разрушение	4 млн.
O <sub>2</sub> атмосферы	Фотосинтез	4500
CO <sub>2</sub> атмосферы	Фотосинтез	4
H <sub>2</sub> O океана	Испарение	36 тыс.
H <sub>2</sub> O океана	Фотосинтез	3,5 млн.
Макро-ионы океана	Речной сток	1 – 100 млн.

Если бы не непрерывная деструкция органического вещества в биогеохимическом цикле, весь углерод осадочной оболочки был бы превращен в живое вещество за ~0,5 млн. лет.

# Биогеохимический цикл углерода

Солнечный свет



# Распределение масс живого вещества на поверхности Земли

	Масса, $10^{15}$ г С <sub>орг</sub>	Продукция, $10^{15}$ г С <sub>орг</sub> /год	Время пребывания, лет
Суша	560	35	16
Океан	7	70	0,1

Проблема океана как пищевого ресурса человечества:  
длинная трофическая цепь *vs* пищевые пристрастия людей!

# Биомассы основных групп живых организмов ( $10^{15}$ г С<sub>орг</sub>; по Bar-On et al., 2018, с дополнениями)

	Всего	Расте- ния	Живот- ные	Грибы	Прос- стейшие	Бактерии	Вирусы
Всего	550	450	2	12	4	77 23-31* 30**	0.2
На суше	470	450	0.58	12	1.6	7.5	
В океане	6 5-10***	—	2	0,3	2	1,6	
В литосфере	70	—	—	—	—	70 14-22* 4****	—

Курсивом показаны величины, современная оценка которых страдает большой неопределенностью.

\* – Magnabosco et al., 2018.

\*\* – Bar-On et al., 2019.

\*\*\* – Groombridge, Jenkins, 2000.

\*\*\*\* – Kallmeyer et al., 2012 (осадочный слой океана)

# Экологическая (трофическая) пирамида



Экологическая (трофическая) пирамида — это графическое изображение соотношения между продуцентами и консументами разных уровней (травоядными, хищниками; видами, питающимися другими хищниками) в экосистеме. Идея графического отображения трофических соотношений в экосистемах предложена в 1927 г. Ч.Элтоном.

В зависимости от выбранного параметра измерения экосистемы различают три типа пирамид:

- пирамида чисел (Ч.Элтон) суммарные численности организмов разных уровней;
- пирамида биомассы (общий сухой вес, калорийность и др.);
- пирамида энергии = суммарной продукции организмов разных трофических уровней.

Правило экологической пирамиды (правило 10%; правило Линдемана) - при передаче от одного трофического уровня к следующему количество доступной энергии уменьшается примерно на порядок (основная доля теряется на обеспечение жизненных процессов).

Правило строго выполняется для пирамиды энергии/продуктивности. Для пирамид чисел и биомассы в некоторых системах получаются обращенные соотношения (например, по численности – насекомые на деревьях; по биомассе – фито- и зоопланктон в океане).

# Состав живого вещества

[Проблема формы выражения]

На живой вес - С, Н, О

На сухой вес - С, Н, О, N, Р – биогенные элементы

На вес золы - + Ca, K, Si, Mg, S, Fe, Na, Mn, Cl, ...

Redfield ratio – соотношение С : N : P = 106 : 6 : 1,  
установленное американским океанографом  
А.К.Редфилдом для планктона, приблизительно  
выполняется для широкого круга биологических  
субстратов, включая мягкие ткани человека.

# «Жизненно необходимые» (эссенциальные) элементы

Это элементы, для которых установлены биохимические функции, или в эксперименте получен положительный отклик.

C, H, O, N, P, S, K, Ca

Fe, Co, Zn, Cu, Mo, Mn, I, B, V, Ni, Se, ...

Критерии отнесения элементов к «жизненно необходимым» субъективны, т.к. определяются уровнем нашего знания.

Со временем список таких элементов растет.

# Геохимические функции живого вещества

**Энергетическая функция** описывает производимую живым веществом трансформацию энергии, поступающей из внешних источников, в химически связанные формы, и расходование этой запасенной энергии в жизненном цикле.

**Газовые функции** описывают участие живого вещества в круговороте газообразных соединений биосферы.

**Концентрационная функция** описывает биологическое накопление химических элементов в живом, органическом и биокосном веществе.

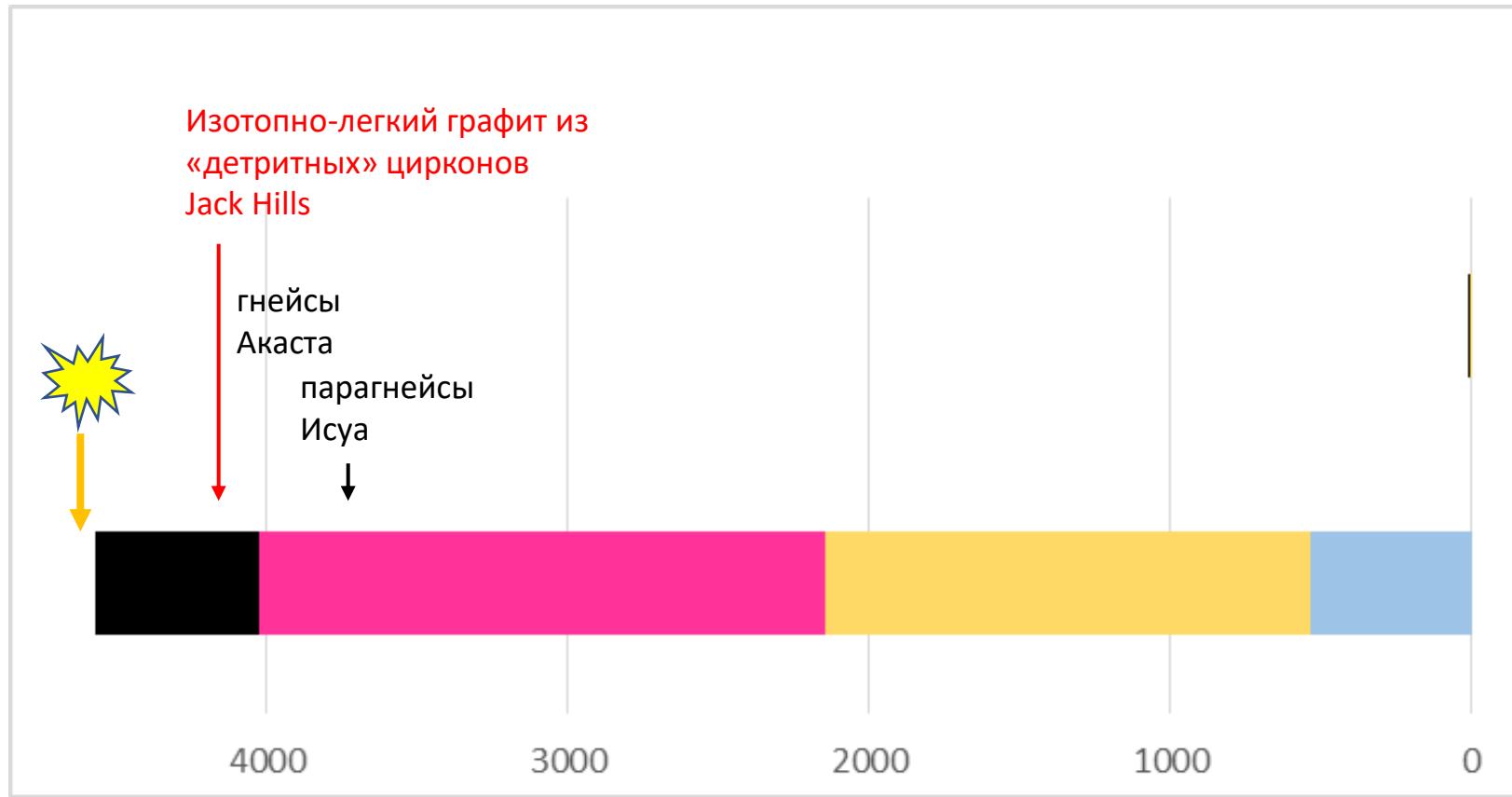
**Конструкционная функция** описывает создание новых, вне жизни не существующих форм соединений – биогенного вещества.

**Поляризационная функция** описывает создание в биосфере ее основной геохимической структуры – расщепление на аэробную и анаэробную обстановки.

**Транспортная функция** описывает создание биогенных веществ, определяющих специфические формы миграции химических элементов в биосфере.

# Возраст жизни

# Хронология геологической истории Земли

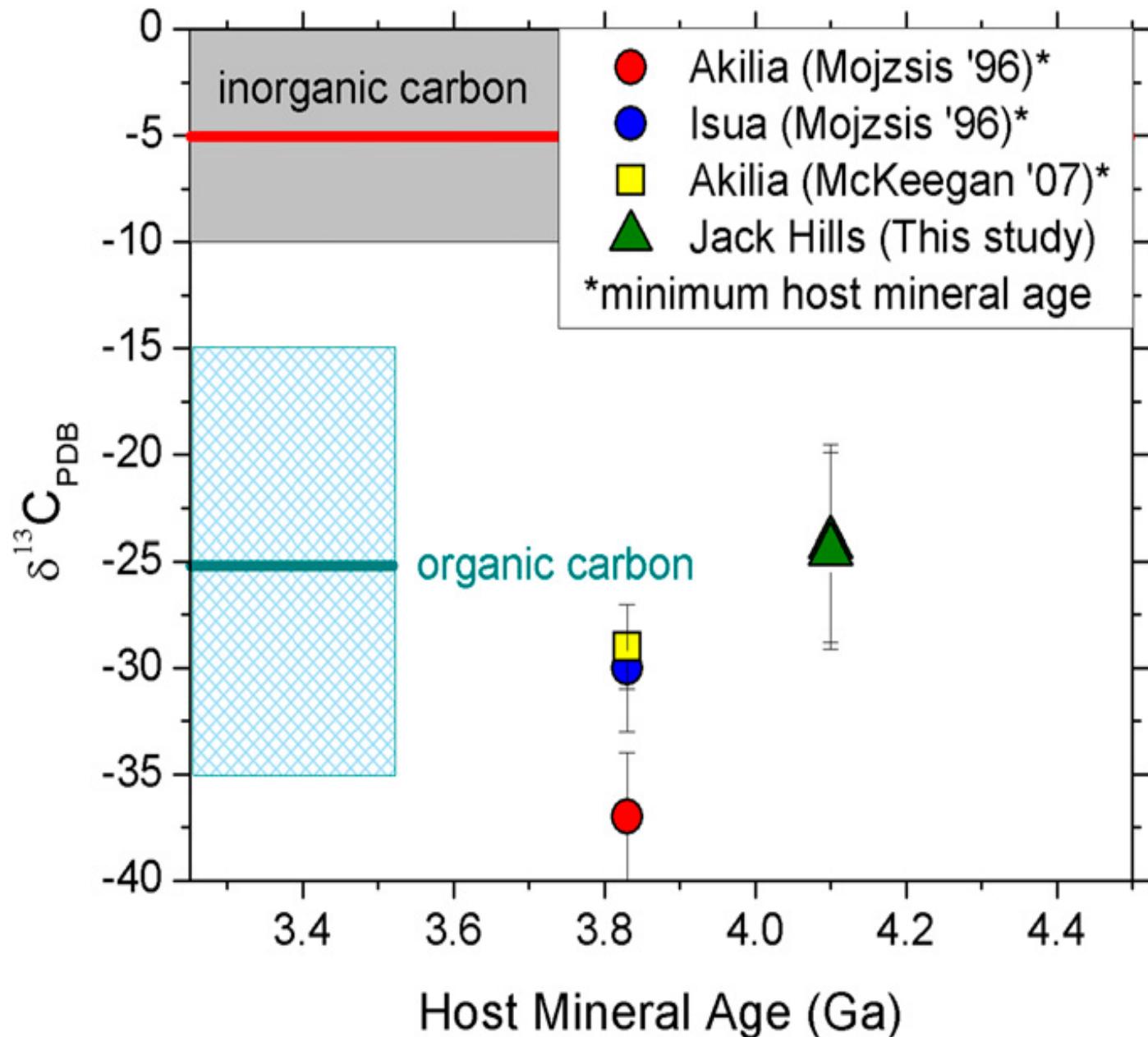


# Время появления биосферы

Метаморфические комплексы Гренландии (3.76 млрд. лет) содержат в составе метаосадочные породы рассеянное органическое вещество с облегченным изотопным составом углерода ( $\delta^{13}\text{C} < -20\ \text{\%}$ ) – доказательство протекания биологических процессов, аналогичных современной биосфере.

Хадейские «детритные» цирконы – обнаружены зерна цирконов с возрастом 4.1 млрд. лет, в которых присутствуют включения графита с изотопно-легким углеродом. Это признак того, что в состав протолита материнских (для циркона) пород входили осадки, содержащие органическое вещество биогенного происхождения.

Таким образом, зарождение биосферы уходит в начальный период истории Земли (от которого не сохранилось геологической информации).



Изотопный состав графита из первичных включений в хадейских «детритных» цирконах Jack Hills (Зап. Австралия).  
По (Bell et al., 2015).

Изотопное фракционирование углерода с облегчением на 20-30 ‰ – характерный результат биогеохимического цикла Кальвина – процесса ассимиляции  $\text{CO}_2$  и образования органических соединений при фотосинтезе. Этот процесс сейчас отвечает примерно за 90% первичной продукции биосфера. В ранней биосфере Земли, по ряду оценок, преобладал другой метаболический механизм – путь Вуда-Льюнгдаля, величина изотопного фракционирования С для которого до сих пор не определена.

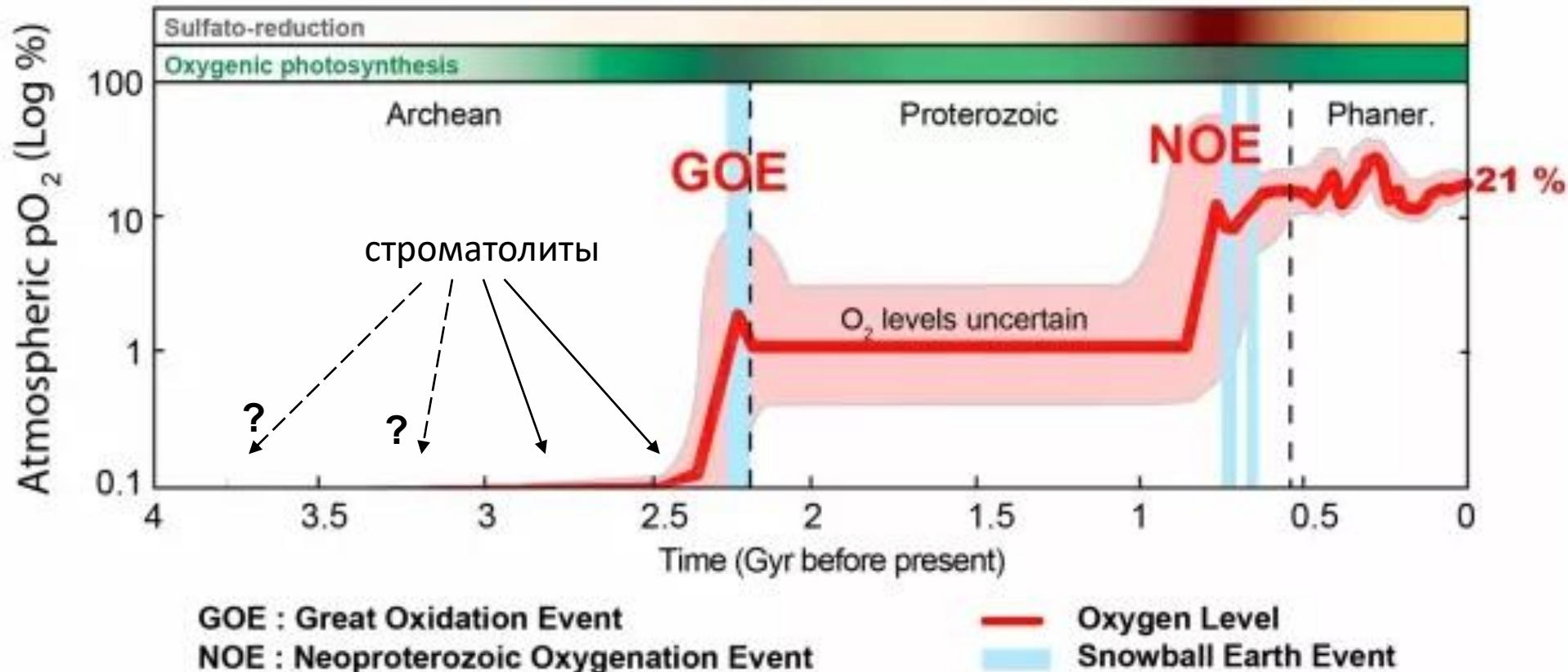
Деятельность живого вещества как фактор эволюции поверхностных оболочек Земли.

Главное событие – трансформация биосфера в кислородную систему

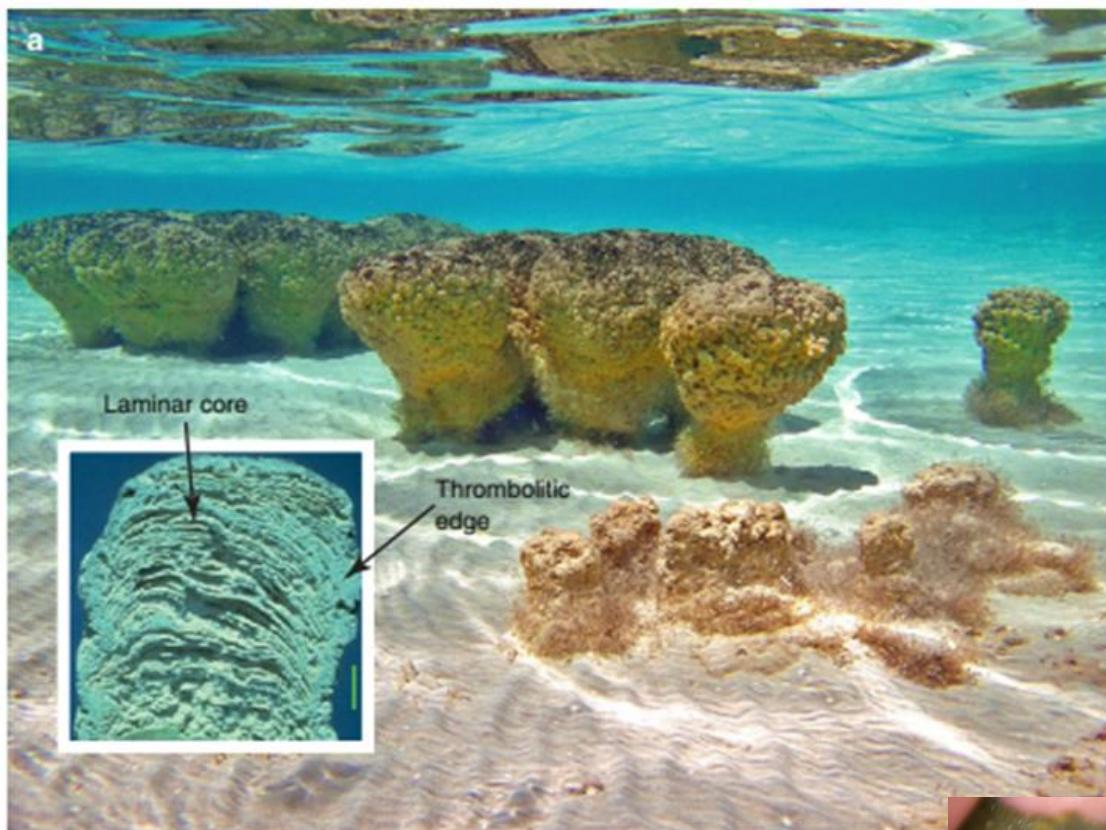
# Хемосинтез и фотосинтез

- Хемосинтез – по-видимому, самый ранний и наименее сложный в биохимическом отношении тип метаболизма в биосфере Земли. Он возник еще в хаде (по датировкам изотопии С в «детритных» цирконах). В энергетическом плане хемосинтез был не очень эффективен, поскольку опирался на поступление веществ из недр Земли, становящихся неравновесными в условиях поверхности (геотермальные обстановки обитания).
- Аноксигенный фотосинтез – основан на использовании при фотосинтезе в качестве донора электронов восстановленных субстратов из окружающей среды – сероводорода, серы, тиосульфата, Fe(II), арсенита, органических соединений или молекулярного водорода. Аноксигенный фотосинтез используется пурпурными и зелеными серобактериями, гелиобактериями и др. Биохимически аноксигенный фотосинтез проще кислородного, и, вероятно, является его эволюционным предшественником. По изотопии углерода фотосинтетическая ассимиляция углекислого газа фиксируется уже в метаосадочных комплексах Гренландии (3,76 млрд. лет)
- Кислородный фотосинтез – в качестве донора электронов используется вода, а продуктом реакции является свободный кислород. Кислородный фотосинтез в энергетическом отношении эффективнее аноксигенного (примерно в 3 раза). Цианобактерии, использующие кислородный фотосинтез, развили целый комплекс защитных механизмов от действия свободного кислорода и его активных форм в водных растворах. Наиболее древние признаки существования цианобактерий относятся к архею.

# Возникновение и эволюция кислородной атмосферы Земли. Great Oxygenation Event



# Строматолиты – признак появления фотосинтетических организмов.

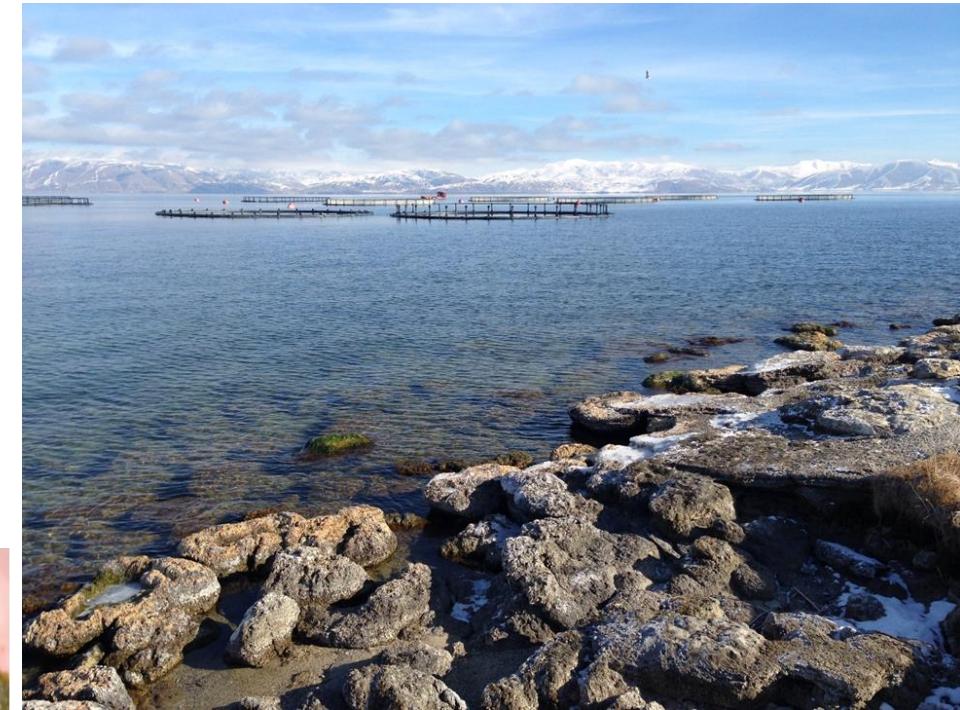


Современные строматолиты заказника Hamelin Pool (Австралия). На врезке видна специфическая микрослоистая текстура карбонатного вещества строматолита.

Цианобактериальный мат. →



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



Современные строматолиты на обсохшем дне озера Севан.  
[sadoff.livejournal.com](http://sadoff.livejournal.com)

