

# Тема 17. Геохимия биосферы

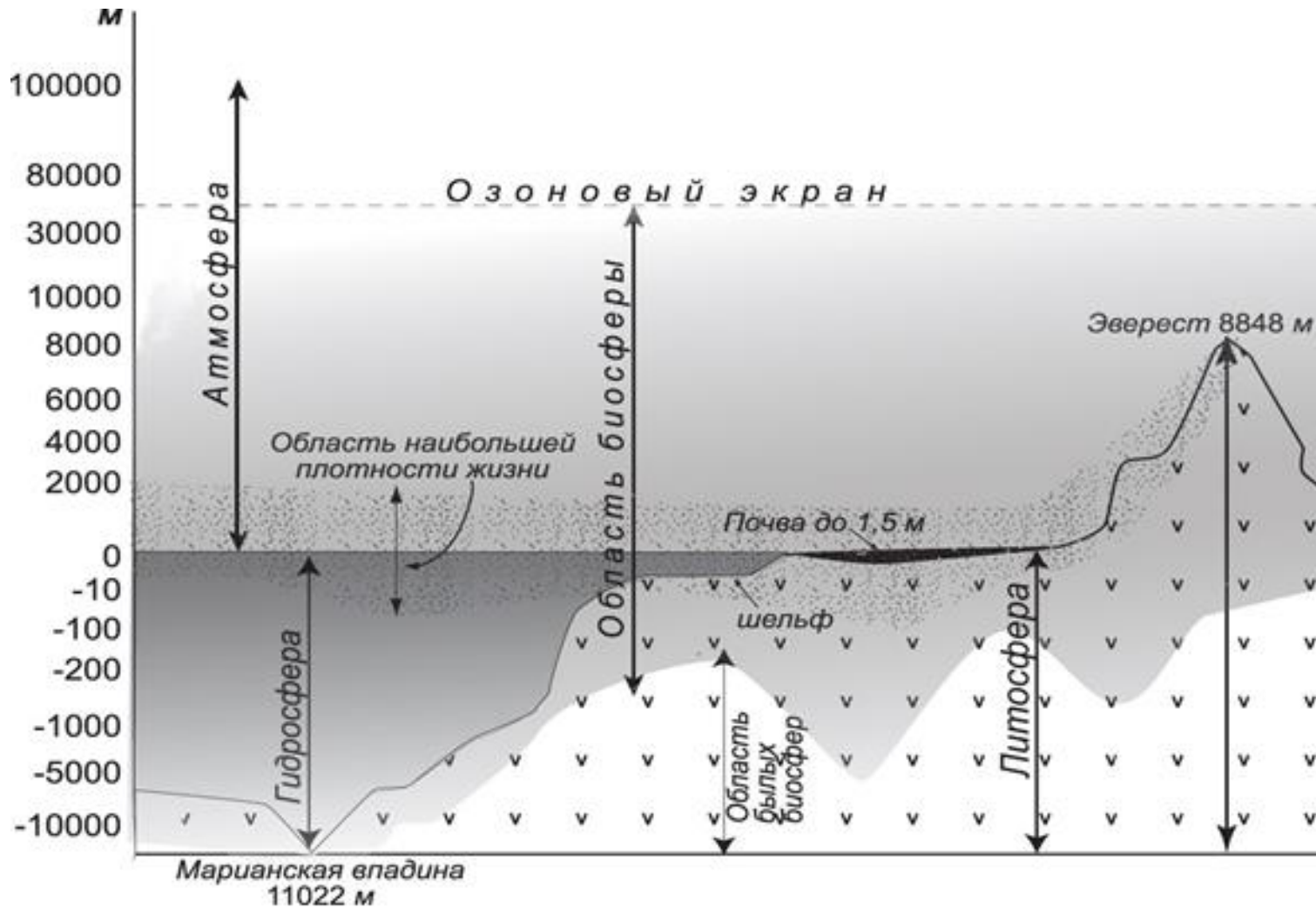
# Определение понятия биосфера.

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 биосферы



Положение области биосферы 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

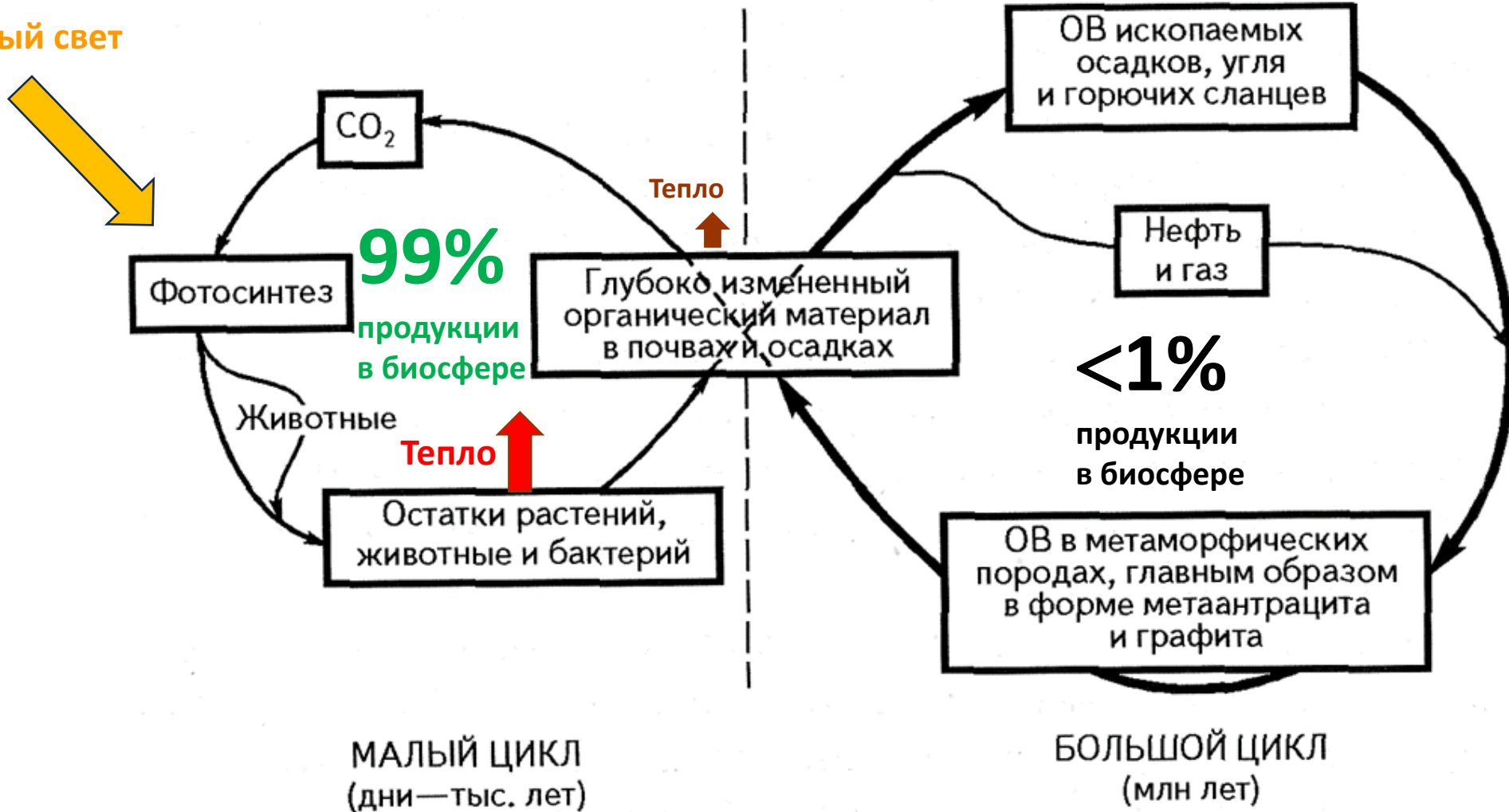
Компонент	Масса	Во сколько раз больше живого вещества
Живое вещество	$2.4 \times 10^{18}$ г	$\equiv 1$
Органическое	$2 \times 10^{22}$ г	8 300
Биокосное (~осадочная оболочка)	$3 \times 10^{24}$ г	1 250 000
Косное вещество	$3 \times 10^{25}$ г	12 500 000
Для сравнения:		
Атмосфера	$5 \times 10^{18}$ г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

# Круговорот компонентов биосферы

Вещество	Процесс	Характерное время пребывания $\tau$ , лет
<b>Живое вещество</b>	<b>Образование / деструкция</b>	<b>12</b>
<b>Органическое вещество</b>	<b>Захоронение / разрушение</b>	<b>4 млн.</b>
O <sub>2</sub> атмосферы	Фотосинтез	4500
CO <sub>2</sub> атмосферы	Фотосинтез	6 -7
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.

# Биогеохимический цикл углерода

Солнечный свет



# Распределение масс живого вещества на поверхности Земли

	Масса, $10^{15}$ г $C_{\text{орг}}$	Продукция, $10^{15}$ г $C_{\text{орг}}$ /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!

# Состав живого вещества

[Проблема формы выражения]

На живой вес - C, H, O

На сухой вес - C, H, O, N, P – биогенные элементы

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

# «Жизненно необходимые» (эссенциальные) элементы

Это элементы, для которых установлены их 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, ...

Примеры элементов, считающихся «безразличными» - La, Ti, Zr, W, Pd, Pt, Ag, Ga, Ge, Sn, Te, ...

# 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.

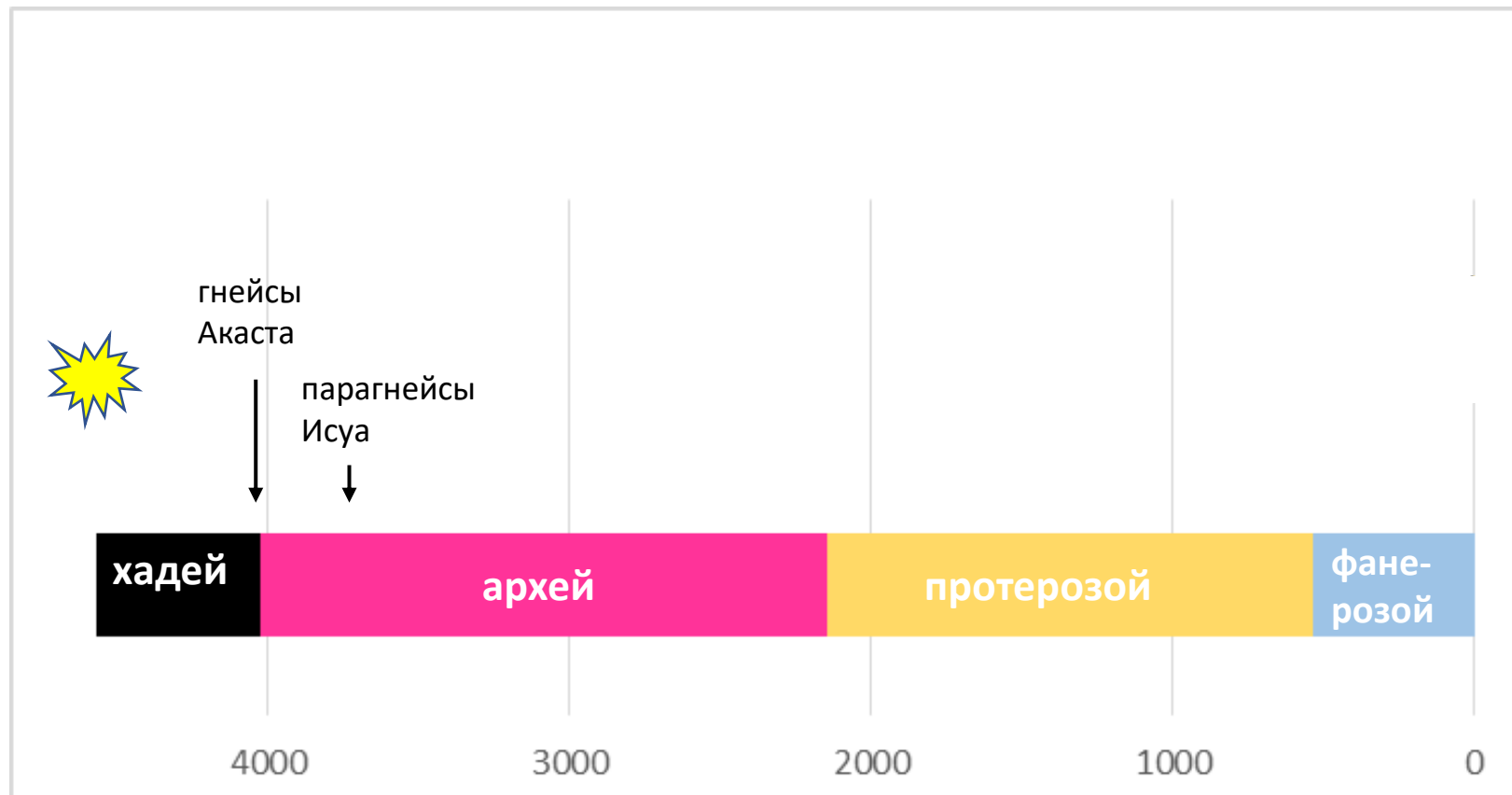
# Возникновение и эволюция биосферы (геохимические данные)

# Происхождение биосферы

Два возможных варианта:

1. Зарождение жизни на поверхности Земли.
2. Занос живых организмов на Землю из космоса (гипотеза «панспермии»).

# Хронология геологической истории Земли

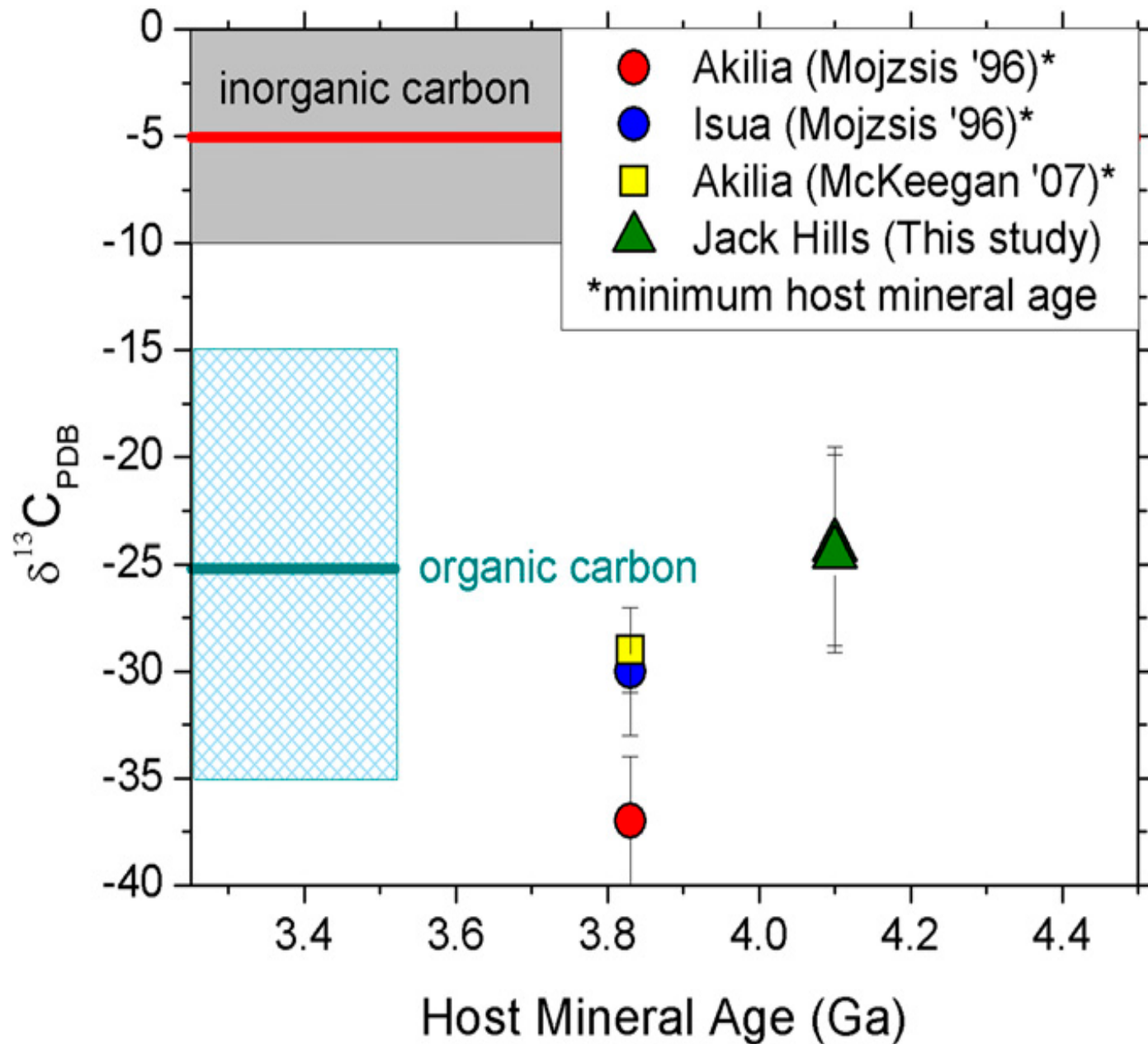


# Время появления биосферы

Метаморфические комплексы Гренландии (3.76 млрд. лет) содержат в составе метасадочные 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, содержавшие 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).

# Среда возникновения жизни

По современным представлениям наиболее древние организмы были хемолитотрофами.

Сейчас наиболее популярны две гипотезы о среде обитания самых ранних организмов биосферы.

1. Термальные источники – «курильщики» на дне моря (современный аналог – слабо-щелочные гидротермы поля Lost City, Атлантический океан [Russell, Hall, 1997]).
2. Субаэральные источники вулканических областей (современный аналог – термальные источники Камчатки [Mulkidjanian et al., 2012]).

Термальные воды выносят на поверхность  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ , а также термогенные низкомолекулярные органические соединения – энергетический субстрат для развития хемолитотрофных сообществ.

Аналогия среды обитания древний микроорганизмов с «курильщиками» не учитывает тот факт, что в экосистемах современных «курильщиков» источником энергии являются реакции окисления восстановленных веществ растворенным в придонной воде кислородом биологического – фотосинтетического происхождения. В бескислородных условиях, реконструируемых для древнего океана, эффективность метаболизма придонных экосистем будет на порядки меньше.

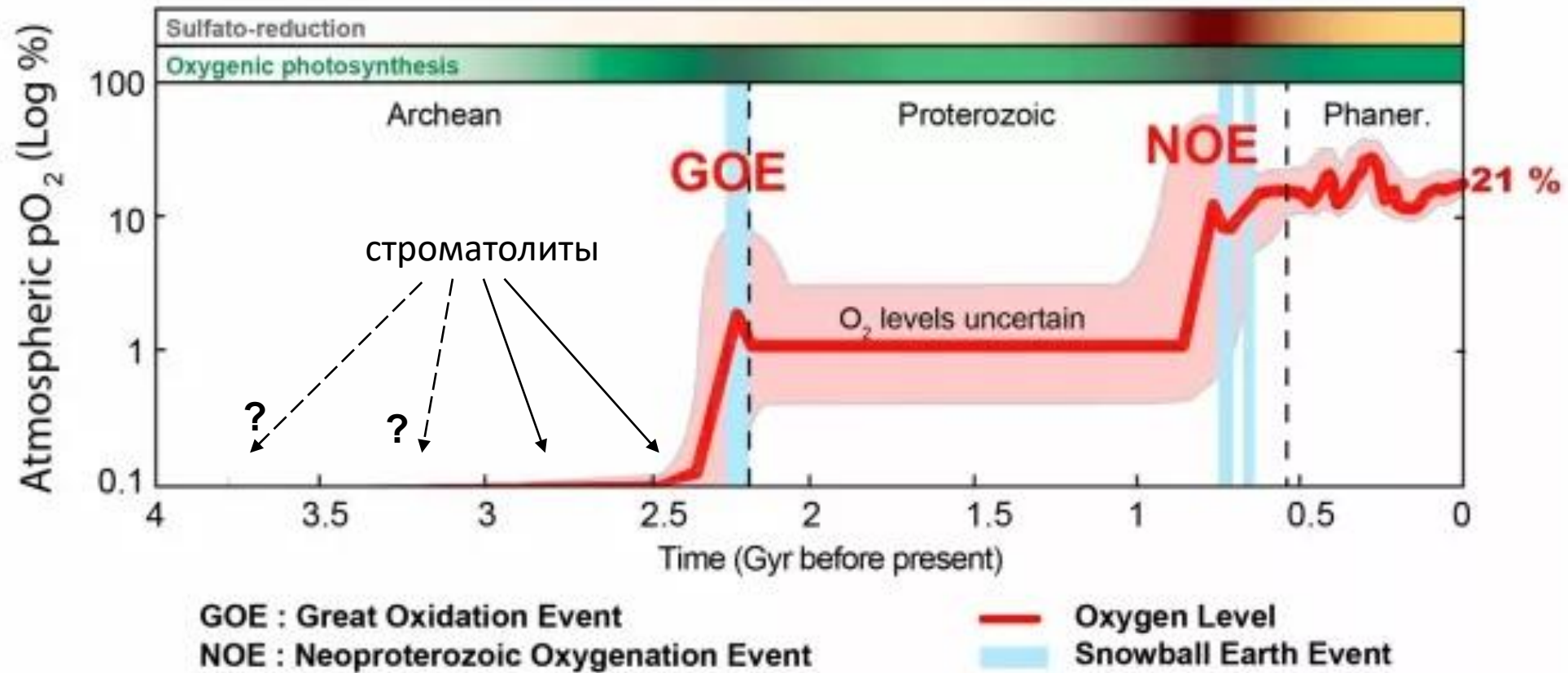
# Хемосинтез и фотосинтез

- Хемосинтез – по-видимому, самый ранний и наименее сложный в биохимическом отношении тип метаболизма в биосфере Земли. Он возник еще в хадее. 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.

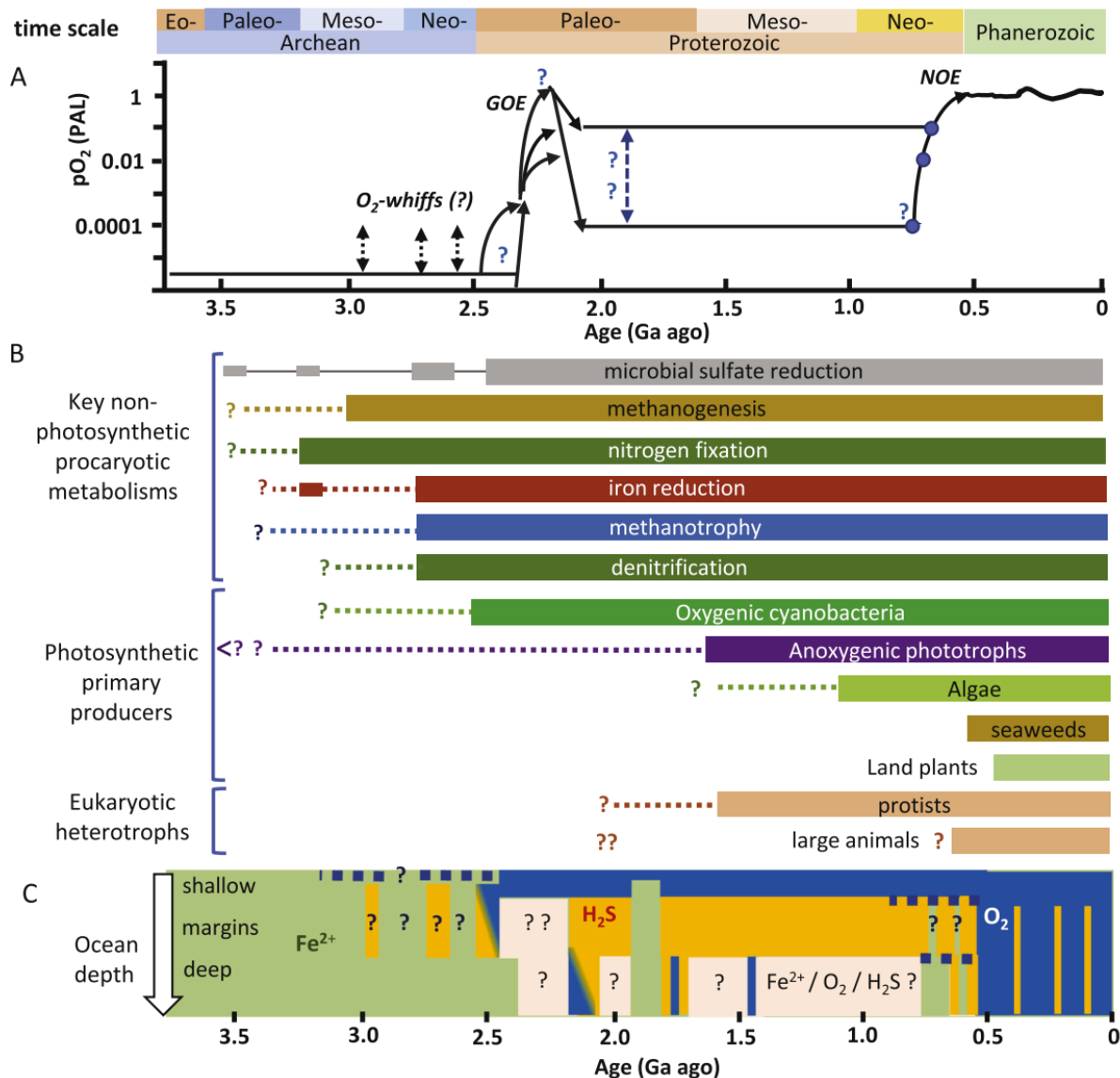
Деятельность живого вещества как фактор эволюции поверхностных оболочек Земли.

Главное событие – трансформация биосферы в кислородную систему.

# Возникновение и эволюция кислородной атмосферы Земли. Great Oxygenation Event



# Ко-эволюция жизни и окружающей среды в истории Земли (По Lepot, 2020).



(А) Изменение парциального давления атмосферного  $O_2$  относительно современного уровня. (Стрелками показаны неопределенности оценок GOE по уровням  $O_2$  и времени).

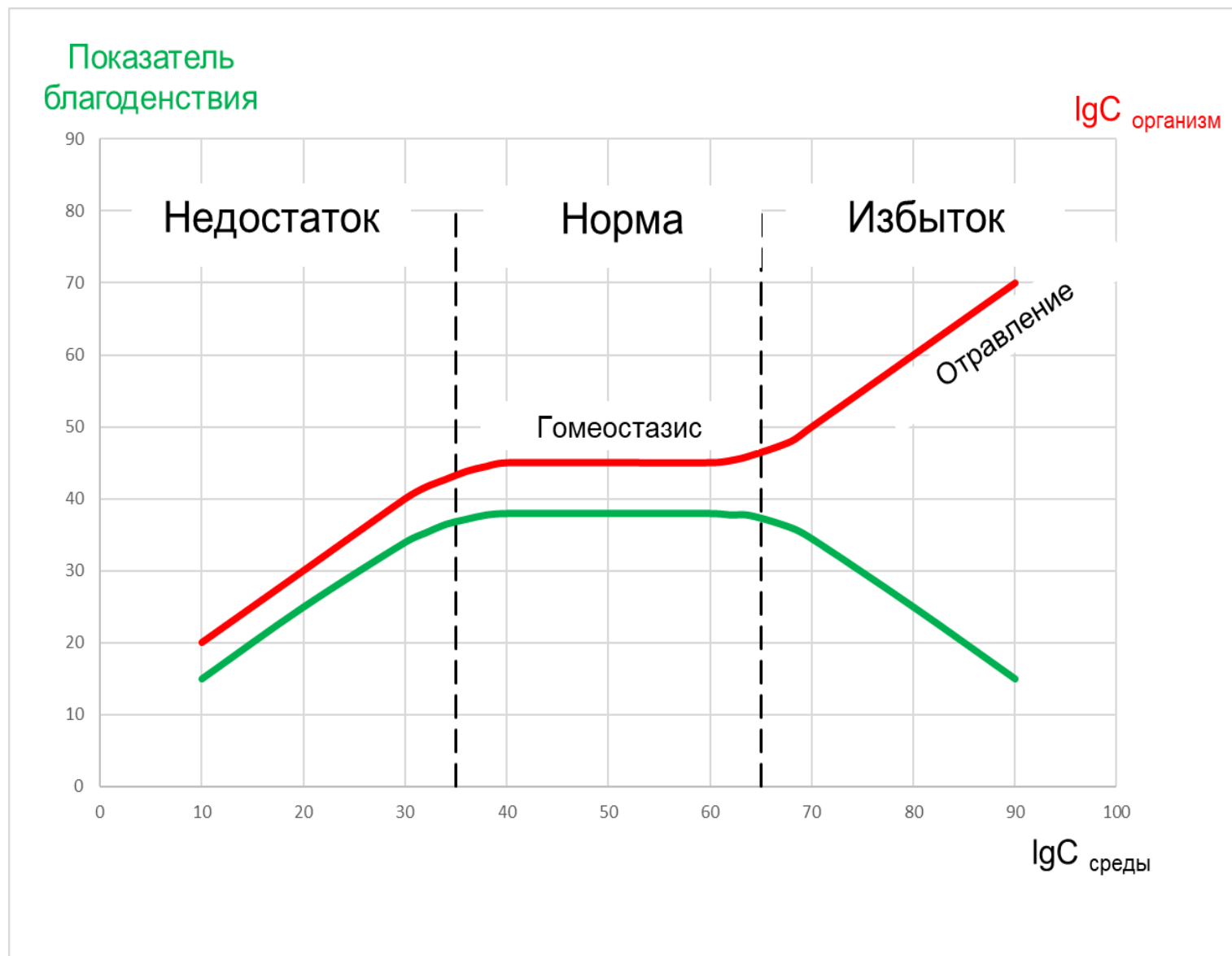
(В) Оценки времени появления ключевых метаболизмов (групп организмов): нефотосинтетических прокариотов; фотосинтетических первичных продуцентов; эукариотов-гетеротрофов.

(С) Реконструкция эволюции химического режима океана:

зеленый – железистый ( $Fe^{2+}$ ) бескислородный;  
 рыжий – бескислородный сульфидный («эвксинский») – результат бактериальной сульфат-редукции [источник сульфата – окисление сульфидной серы кислородом?];  
 синий – кислородная среда в океане;  
 [розовым цветом показаны интервалы, для которых нет ясности].

# Взаимоотношение организма и среды

# Связь организма с составом среды



# Эндемические заболевания растений, животных и человека – проявления природных биогеохимических провинций.

Центральная нечерноземная зона – недостаток в подзолистых почвах многих переходных металлов (Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Mo) – развитие разнообразных заболеваний растений и животных (хлороза, анемии, анокальтоза и др.), снижение урожайности.

Предуралье – недостаток I в воде и почве – эндемический зоб (гипертрофия щитовидной железы) у человека.

Малый Кавказ – избыток Mo – эндемическая подагра человека.

Болезнь Кешана (некроз миокарда) – распространена в районах с нехваткой Se в почве (Сев. Китай, Монголия, США и др.).

Заболевания, связанные с дефицитом или избытком микроэлементов объединяются в медицине названием **микроэлементозы**.

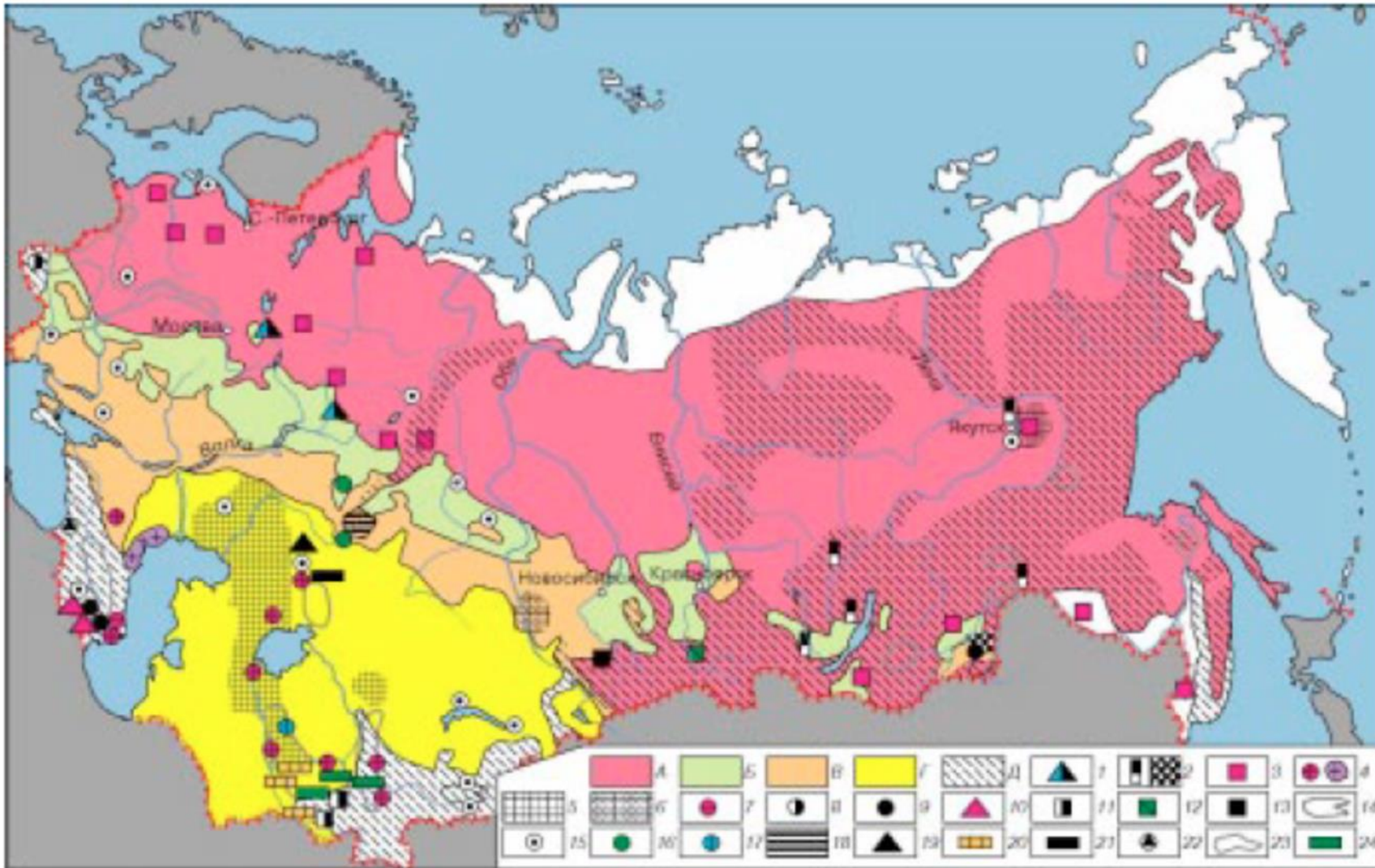
# Биогеохимические провинции

**Биогеохимические провинции** – это области на поверхности Земли, в которых в ответ на геохимические факторы (недостаток или избыток определенных химических элементов во внешней среде) у живых организмов возникают соответствующие биологические реакции.

Практическое значение выделения биогеохимических провинций – в них могут проявляться специфические **эндемические** заболевания растений и животных (в т.ч. – человека), вызванные избытком или недостатком определенных микроэлементов в среде обитания.

Концепция биогеохимических провинция разработана В.И.Вернадским и его учениками А.П.Виноградовым и В.В.Ковальским. Районирование территории СССР по принципу биогеохимических провинций имело большое значение для развития сельского хозяйства и здравоохранения страны.

# Схематическая карта биогеохимических зон и провинций (по В.В.Ковальскому).



А – таежно-лесная зона, провинции: 1 – бедные I и Co; 2 – бедные Ca, обогащенные Sr; 3 – с недостатком Se; Б – лесостепная зона; В – степная черноземная зона; Г – сухостепная, полупустынная и пустынная зоны, провинции: 4 – с недостатком Cu, избытком Mo и сульфатов; 5 – с избытком В; 6 – с недостатком Cu, Co, избытком Mo и В; Д – горные зоны.

Азональные биогеохимические провинции:

7 – богатые Co; 8 – богатые I и Mn; 9 – богатые Pb; 10 – обогащенные Mo; 11 – с избытком Sr и Ca; 12 – обогащенные Se; 13 – с неблагоприятным соотношением Cu, Mo и Pb; 14 – обогащенные U; 15 – с избытком F; 16 – обогащенные Cu; 17 – с нарушенным обменом Cu; 18 – богатые Ni, Mg, Sr, бедные Co, Mn; 19 – богатые Ni; 20 – обогащенные Li; 21 – обогащенные Cr; 22 – обогащенные Mn; 23 – с недостатком F; 24 – с избытком Zn.

# Причины возникновения биогеохимических провинций

**Климат** → преобладающий почвообразующий процесс.

Пример: подзолы Центральной нечерноземной зоны (альтернатива – Черноземная зона, оптимальный баланс микроэлементов, высокая урожайность)

**Подпочвенный субстрат.**

Примеры: Предуралье, недостаток I, эндемический зоб; Малый Кавказ, избыток Mo, эндемическая подагра.

**Антропогенное региональное загрязнение.**

Пример: Япония, болезнь Минамата – следствие загрязнения Hg.

# Примеры эндемических заболеваний антропогенной природы.

Болезнь Минамата – загрязнение воды залива, рыбы и моллюсков ртутью из стоков химической фабрики. (Япония, 1950-е годы). (Также аналогичные экологические катастрофы: Япония, префектура Ниигата, 1965 г.; Канада, провинция Онтарио, 1970 г.).

Болезнь итай-итай – загрязнение сельскохозяйственных угодий и выращиваемой продукции (риса) сточными водами горно-рудных предприятий, содержащими Cd. (Япония, префектура Тояма, 1950-е годы; префектура Ниигата, 1965 г.).

Отравление мышьяком в Юго-Восточной Азии (Бангладеш, Таиланд, Китай, Тайвань, также – Аргентина, Чили, Мексика) – из-за повышенных содержаний As в грунтовых водах латеритных почв. Затронуто более 60 млн. человек.

Болезнь Юшо – отравление полихлорированными бифенилами (ПХБ) (Япония, о.Кюсю, 1968 г.). В пищу попал рис, загрязненный трансформаторным маслом, содержавшим ПХБ. Воздействию подверглось 1800 человек. Болезнь Ю-Ченг (Тайвань, 1978) аналогичной природы. Число пострадавших более 2 тыс. человек. [Эти болезни не являются эндемическими, фактически – это массовое бытовое отравление.]

