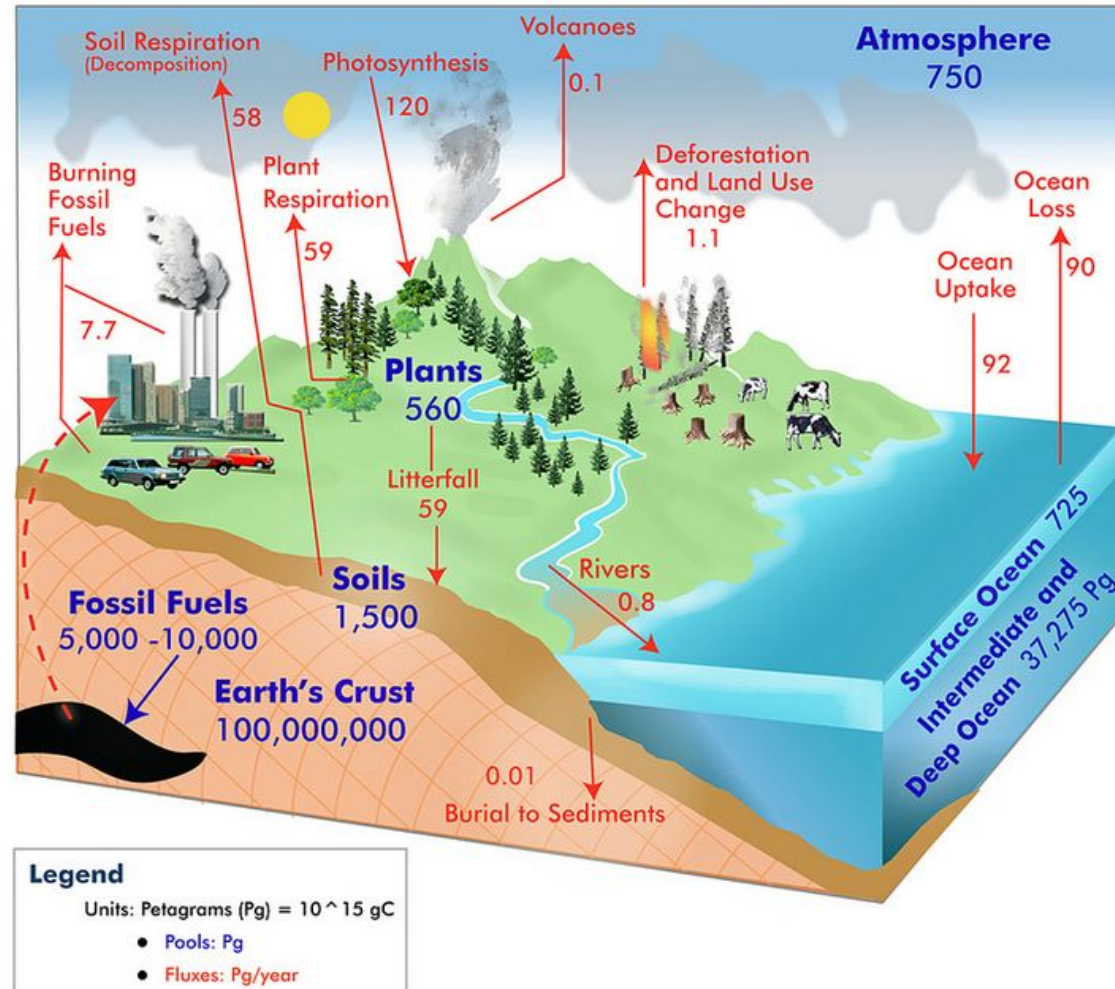


## Лекция 6

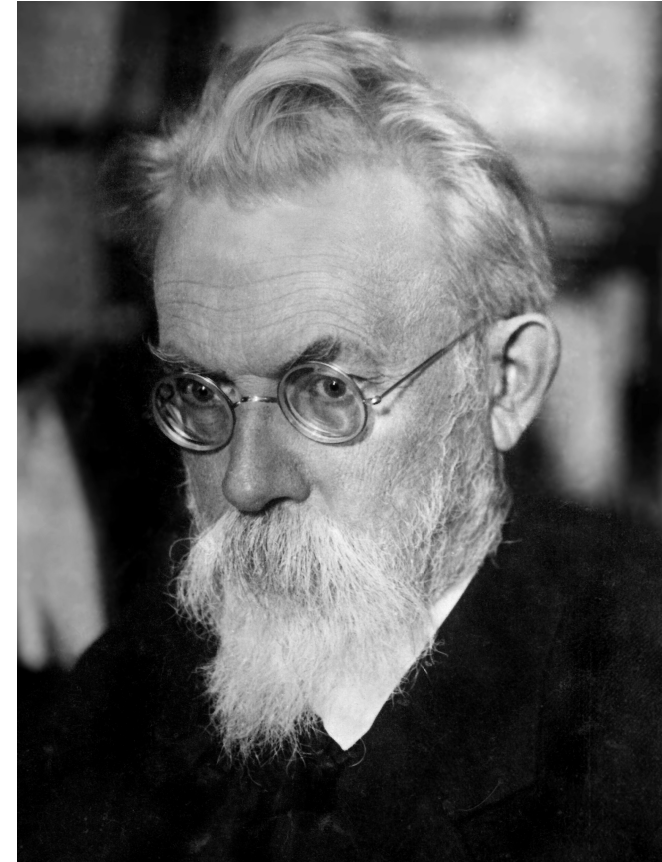
### Биогеохимические циклы элементов и участие в них микроорганизмов



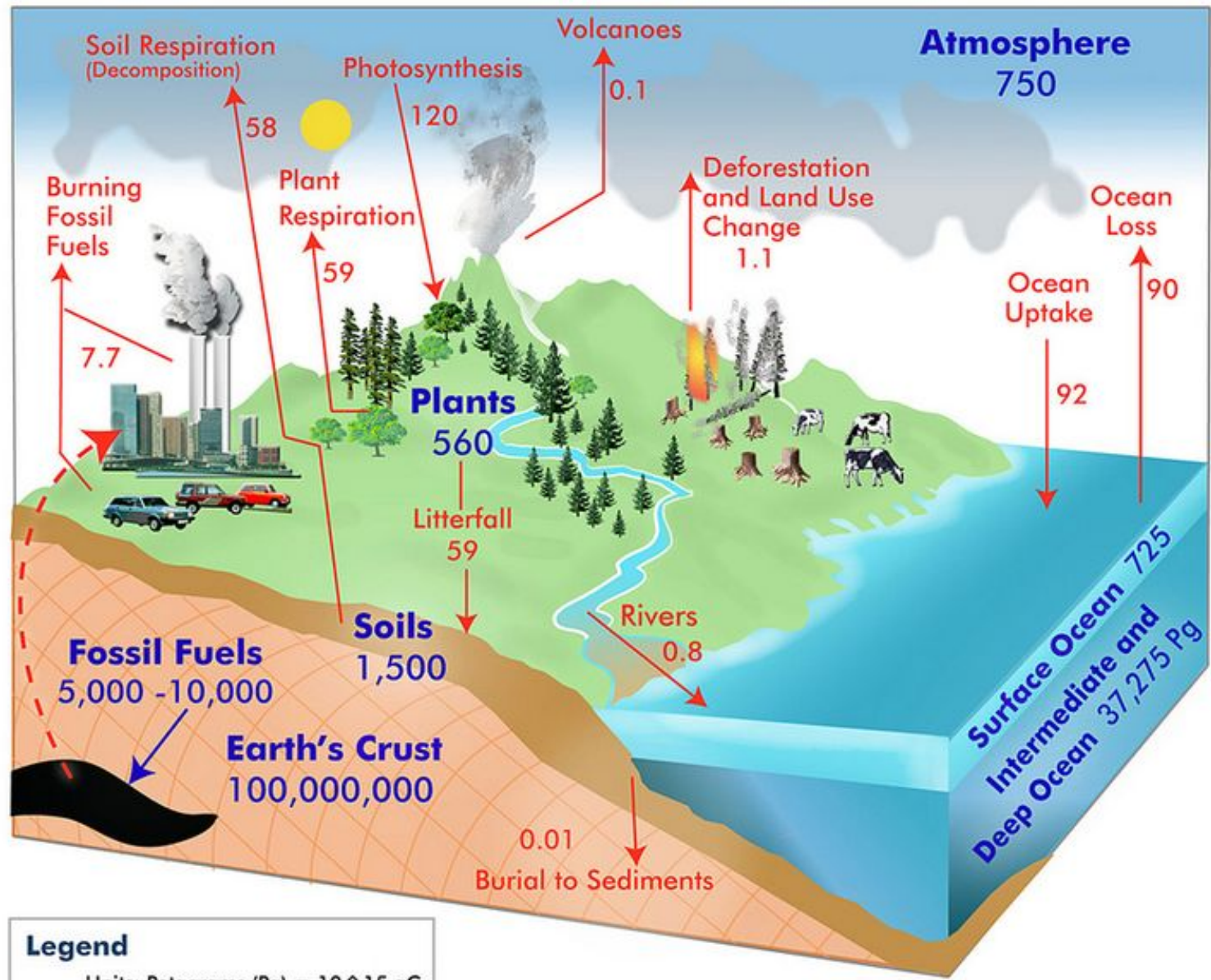
# БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ

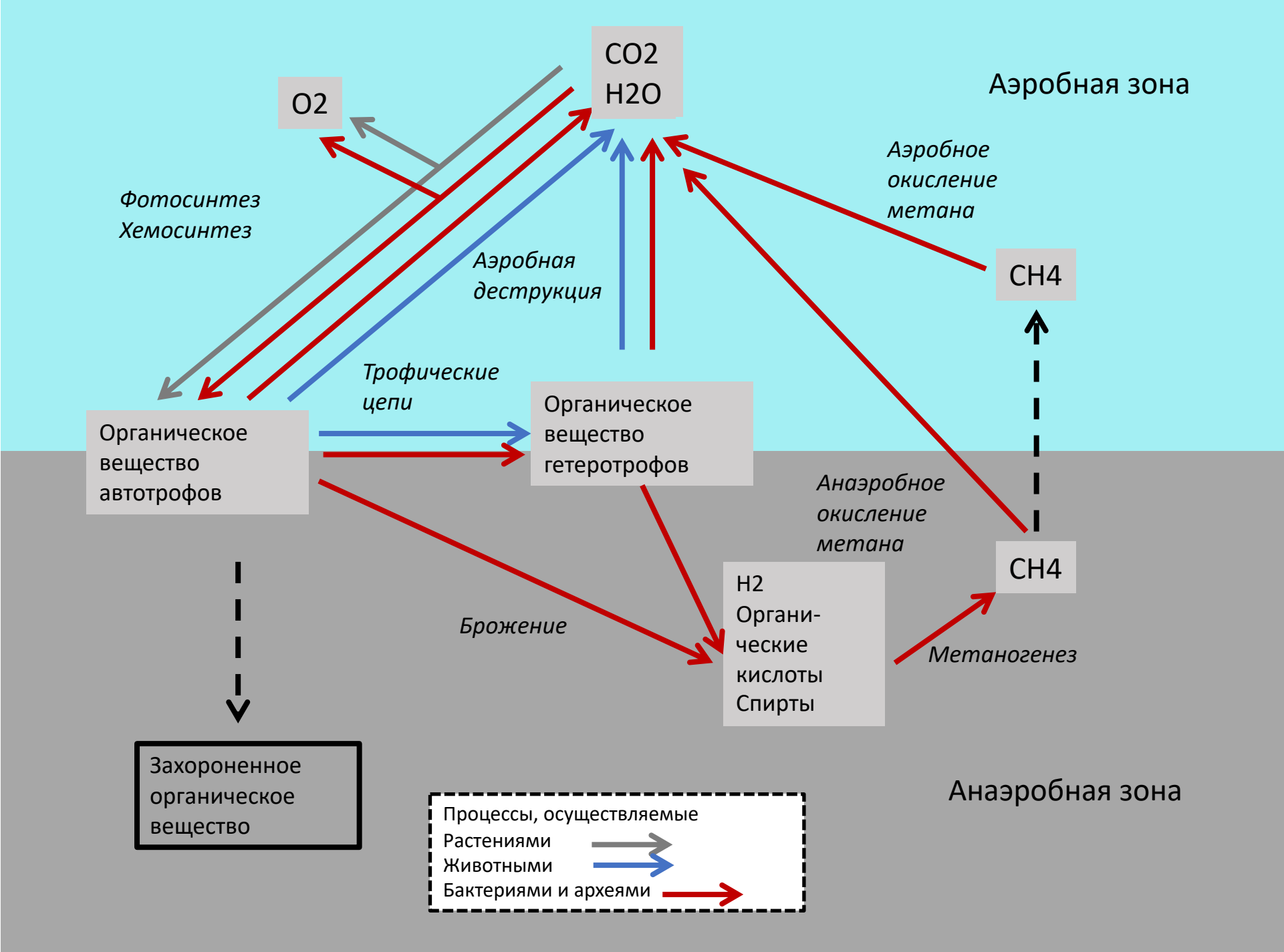
**Биогеохимический цикл** (круговорот веществ) — система незамкнутых и необратимых круговоротов веществ в биотических (биосфера) и абиотических (литосфера, атмосфера и гидросфера) частях Земли. Является основным свойством, характерной чертой биосферы.

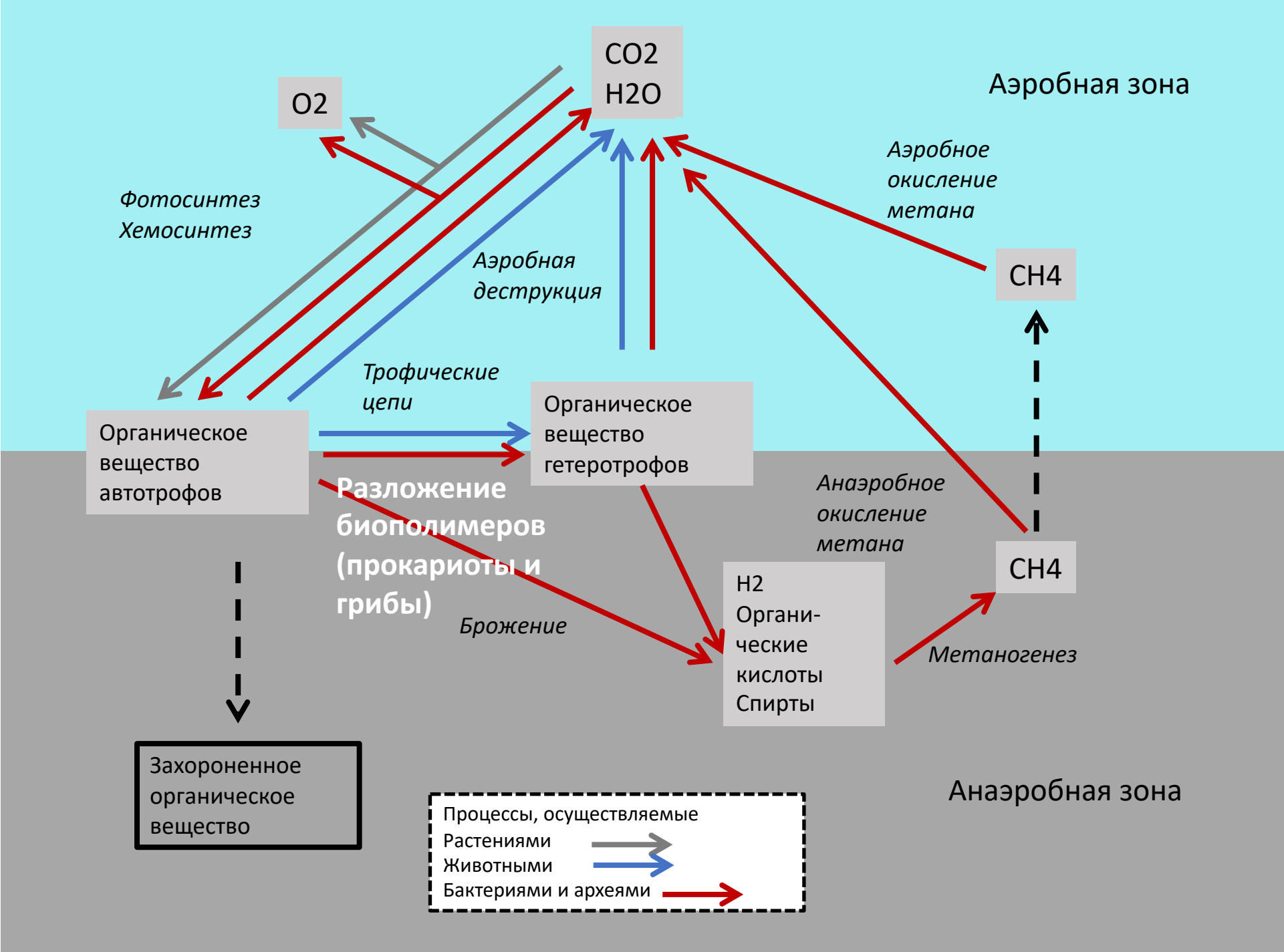
**Благодаря круговороту веществ возможно длительное существование и развитие жизни при ограниченном запасе доступных химических элементов.**



В.И. Вернадский – создатель учения о биогеохимических циклах (1910-е годы)







# БИОПОЛИМЕРЫ

Выполняют множество важных функций в организмах живых существ:

- ✓ белки – структурная функция у животных, катализаторы метаболических реакций, etc, etc
- ✓ нуклеиновые кислоты – информация о первичной структуре белков, участие в синтезе белка
- ✓ полисахариды – структурная функция у растений и прокариот, запасные вещества
- ✓ липиды – компоненты мембран, запасные вещества

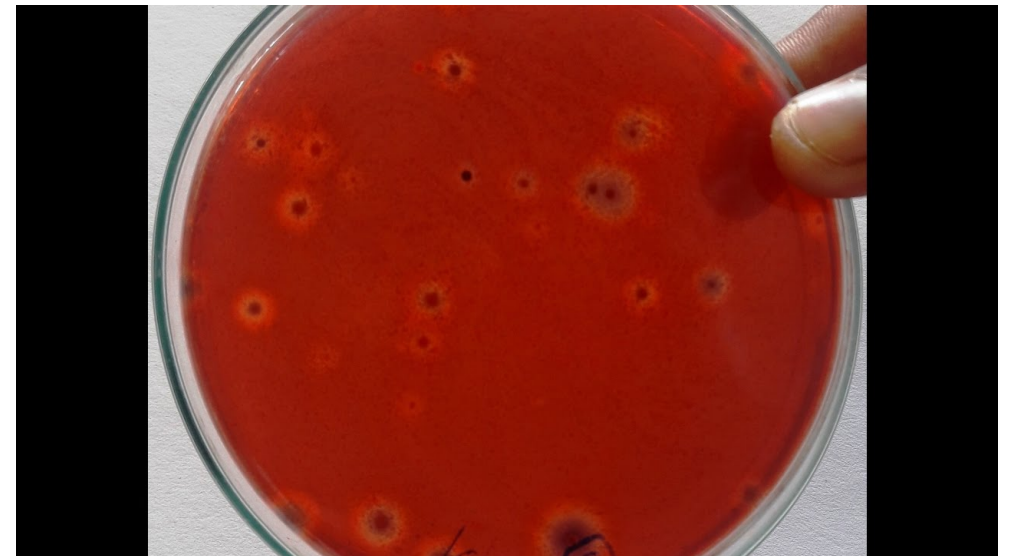
# БИОПОЛИМЕРЫ

Некоторые биополимеры разрушаются только микроорганизмами

- ✓ Целлюлоза
- ✓ Ксилан
- ✓ Хитин
- ✓ Лигнин
- ✓ Резистентные белки (кератины)

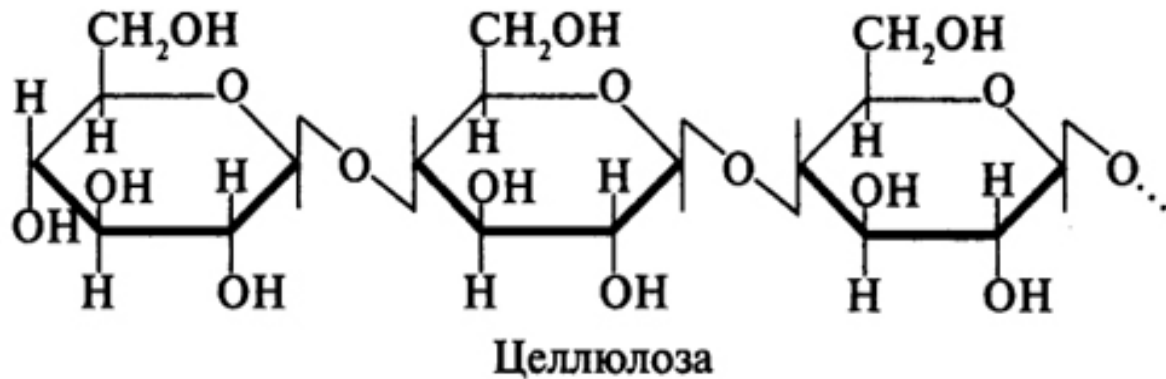
## ЭКЗОФЕРМЕНТЫ

- ферменты, секретируемые клеткой во внешнюю среду или остающиеся связанными с клеточной стенкой

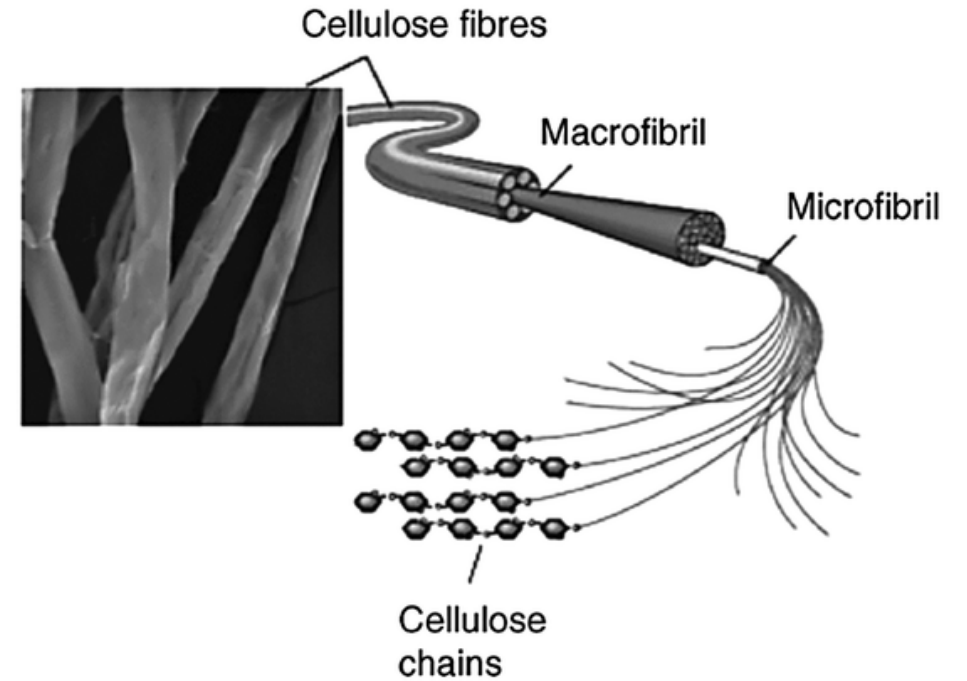


# ЦЕЛЛЮЛОЗА

Целлюлоза – важнейший биополимер, основной структурный элемент растений (~50% углерода растений)



Состоит из связанных между собой гликозидной связью молекул глюкозы



# ЦЕЛЛЮЛОЗА

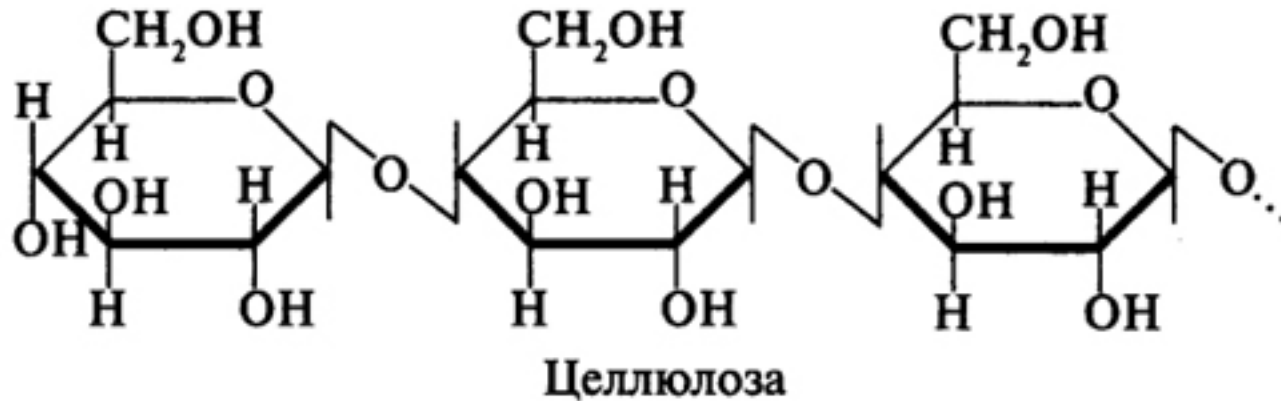
Разложение целлюлозы – **гидролиз**  
(реакция с водой)

Кислотный или ферментативный

Фермент целлюлаза

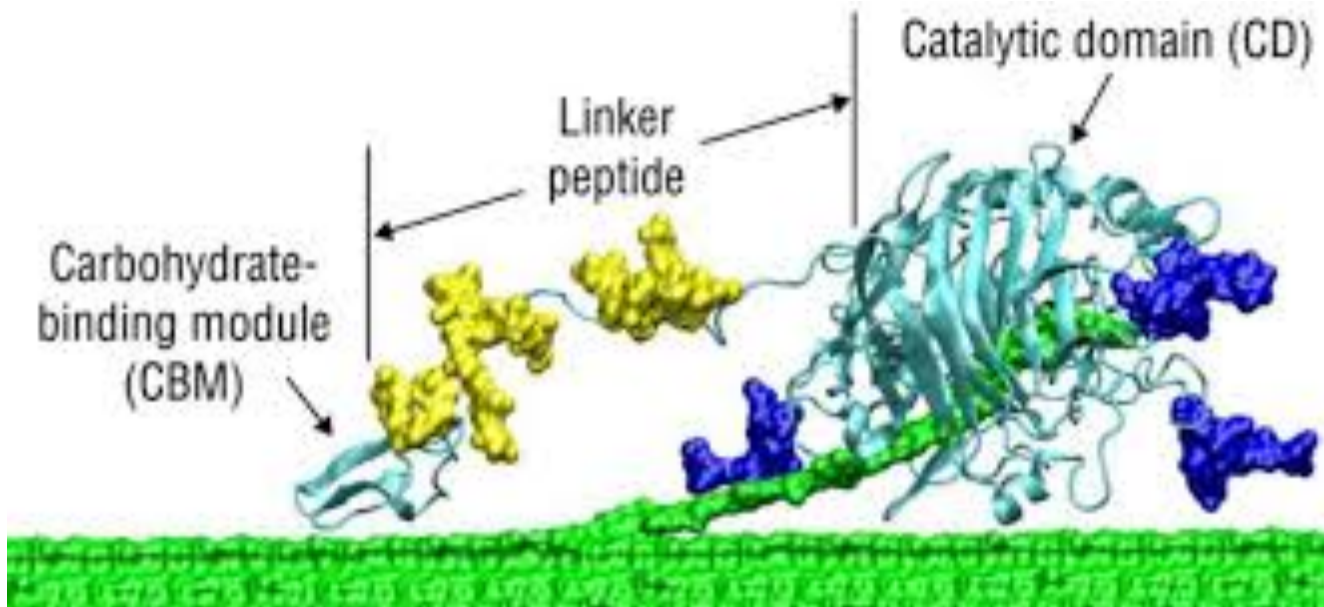
Бета-гликозидаза

Экзо- или эндо глюконаза



В целлюлозный комплекс  
входит также целлобиаза –  
фермент, разлагающий  
дисахарид целлобиозу на две  
глюкозы

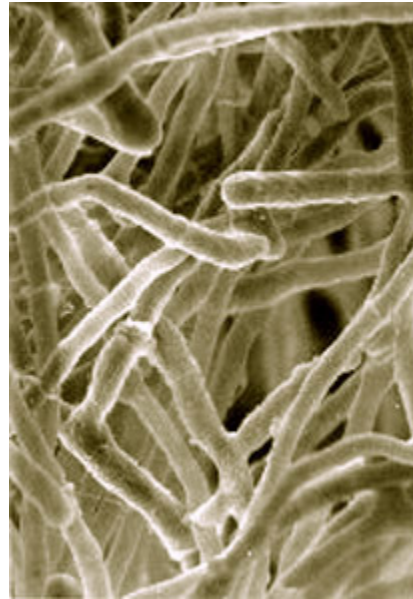
# ЦЕЛЛЮЛАЗА



Важный компонент  
целлюлазы –  
целлюлозосвязывающий  
домен

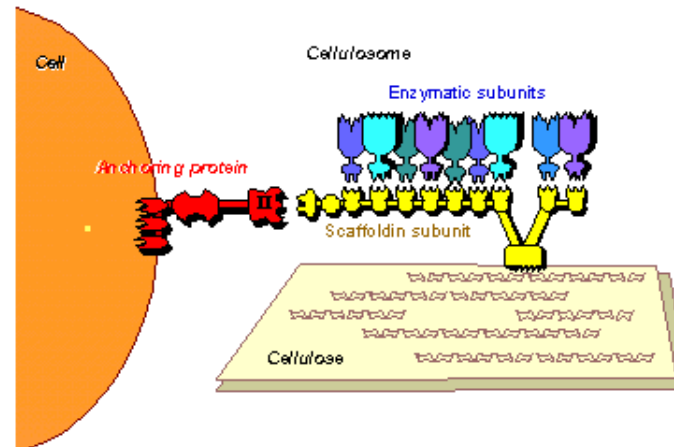
# ЦЕЛЛЮЛАЗЫ

- ✓ Грибы
- ✓ Аэробные бактерии
- ✓ Анаэробные бактерии



*Trichoderma viride*

The cellulosome of *C. thermocellum*



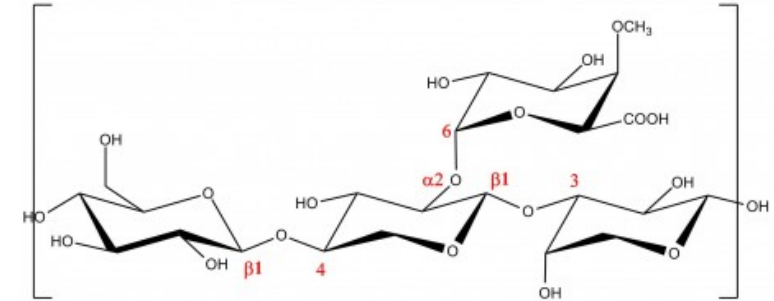
# КСИЛАН

Ксиланы, или гемицеллюлозы

Полисахариды, у которых мономером является ксилоза (5-углеродный сахар)

Ксиланы различаются по строению; к основной цепи присоединяются боковые ответвления

Перемежает целлюлозу, связывая фибриллы и определяет прочность растительных тканей



Ксилан – 3-й по распространённости полимер на Земле

# КСИЛАНАЗА

Способность разлагать ксилан довольно широко распространена в микробном мире (есть у бактерий, грибов, архей, а также у некоторых позвоночных, но не у млекопитающих)

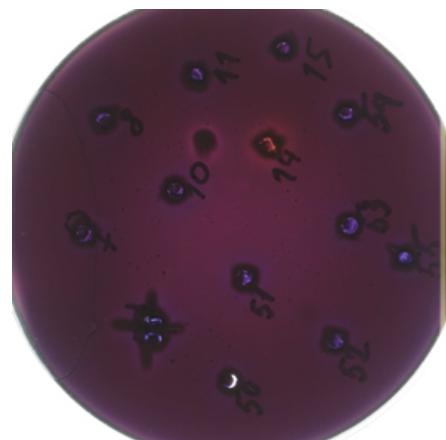
Определяется наличием фермента ксиланазы

Ксиланазы используются при отбеливании бумаги и для улучшения усваиваемости кормов

# Целлюлолитические археи

## *Thermococcus* 2319x1

- первая гипертермофильная архея, растущая на ксилане



Обладает ксиланазной активностью



Выделен из прибрежных гидротерм о. Кунашир



Сергей  
Гаврилов

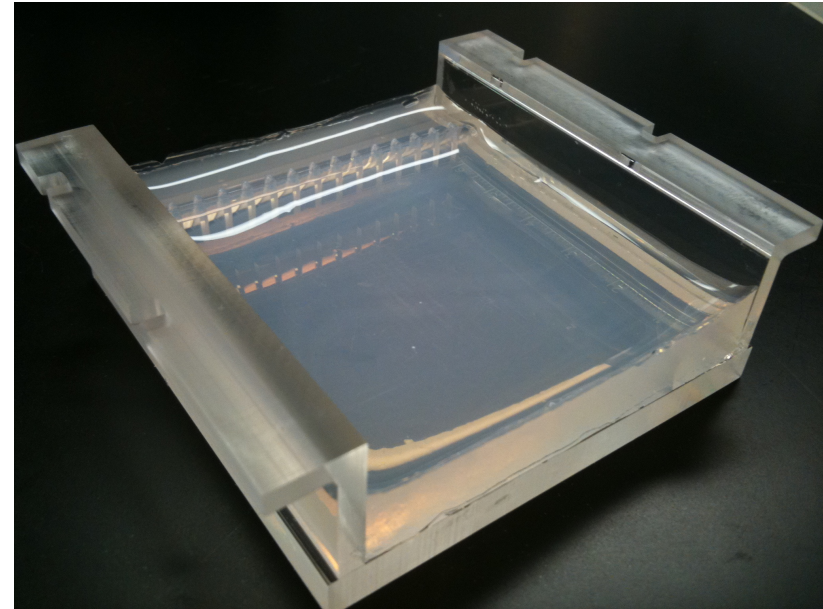
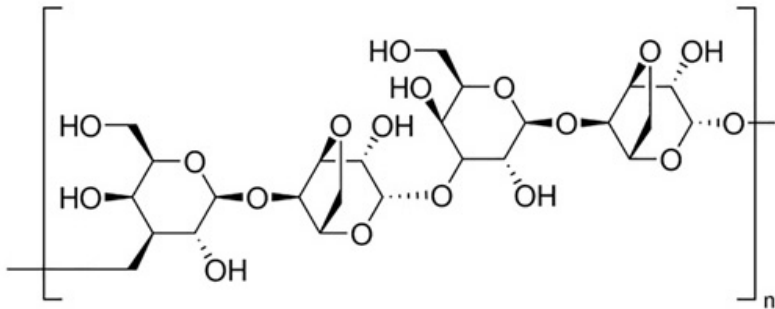


Илья  
Кубланов

В геноме *Thermococcus* 2319x2 обнаружен ген, кодирующий мультидоменный белок, включающий эндоглюканызы (GH5 и GH12) и два целлюлозо-связывающих модуля

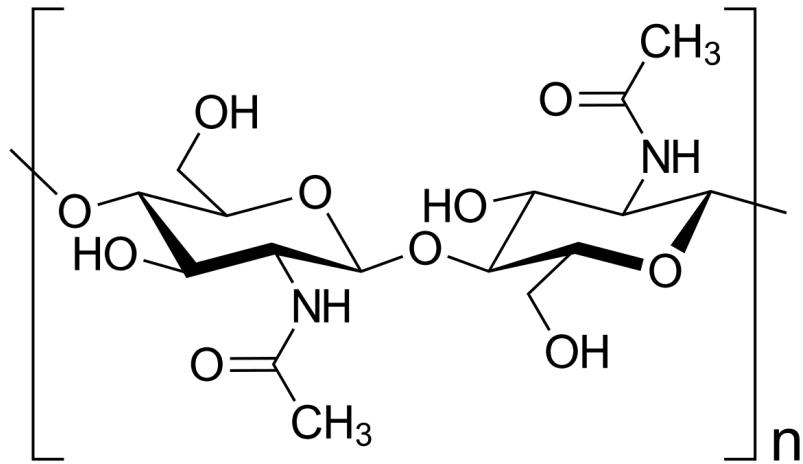
# АГАРОЗА И АГАРАЗА

Агароза – основной компонент агара, полисахарид водорослей  
Полимер галактопиранозы



Агароза используется для разделения белков и нуклеиновых кислот в процессе электрофореза  
Агароза разлагает агарозу и освобождает белки

# ХИТИН И ХИТИНАЗА

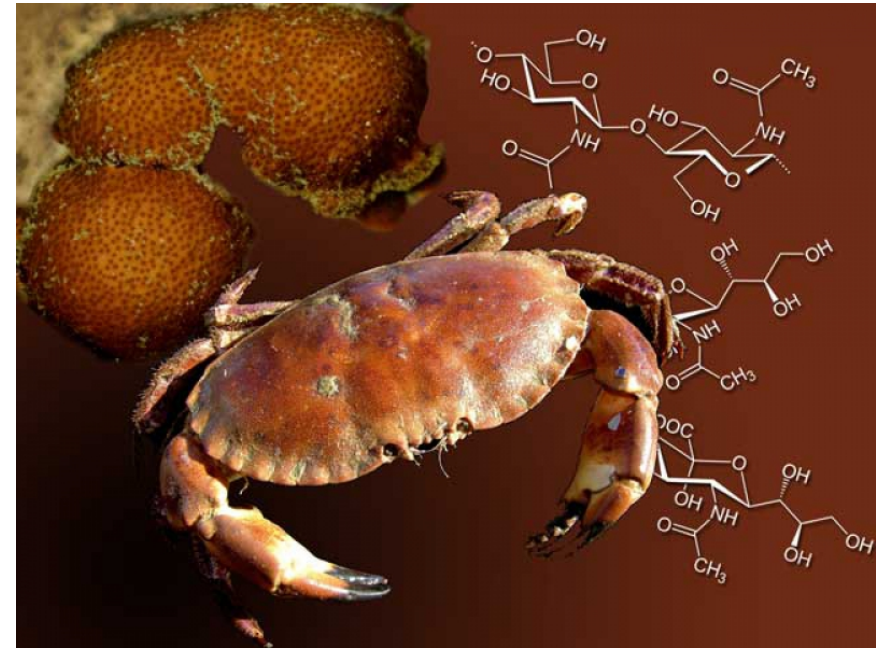


Полимер N-ацетилглюкозамина

Панцири и крылья членистоногих и насекомых

Хитозан – производное хитина, обладает способностью адсорбировать органические и неорганические молекулы

Хитиназа – фермент, разлагающий хитин

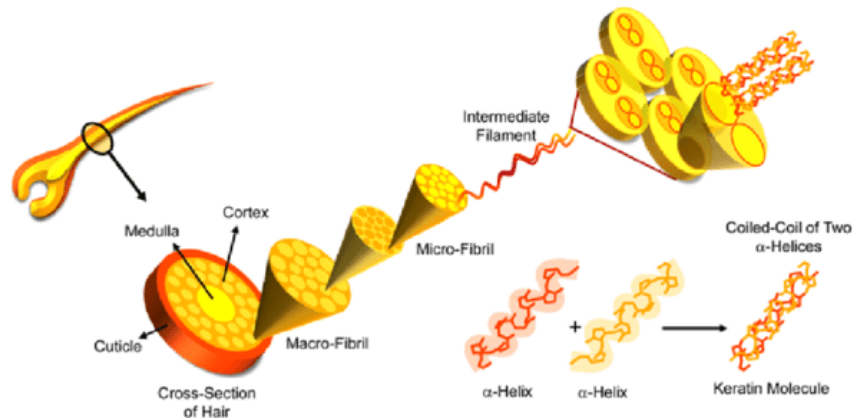


# Протеазы и протеинолитики

Крайне прочные и трудноразлагаемые белки – кератины

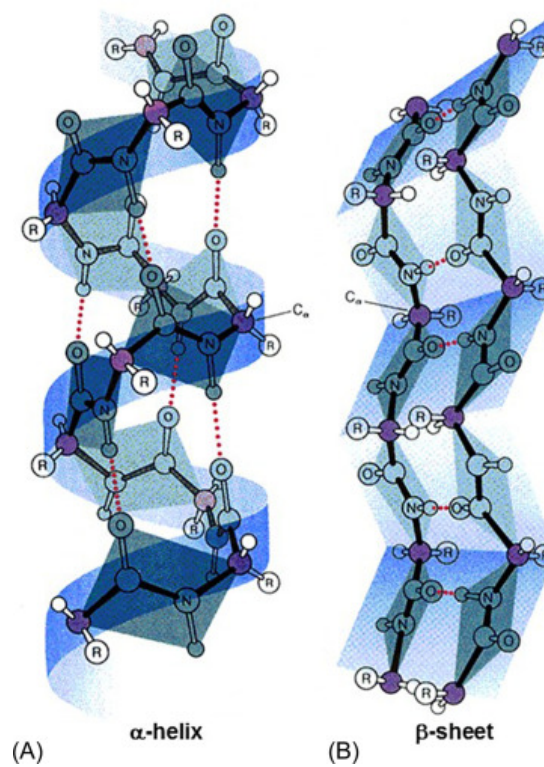
альфа-кератин

Шерсть, волосы



бета-кератин

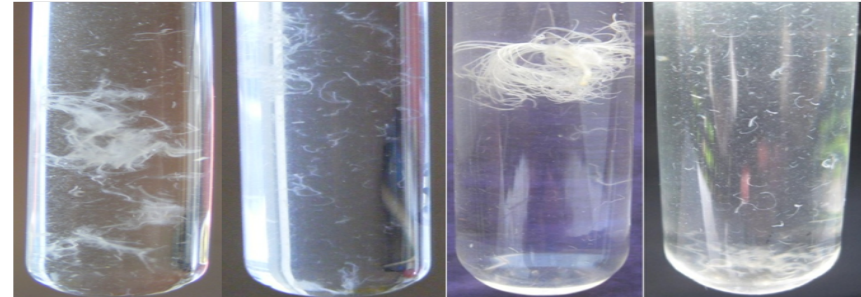
Перья, чешуя  
Шелк, паутина



# Протеазы и протеинолитики

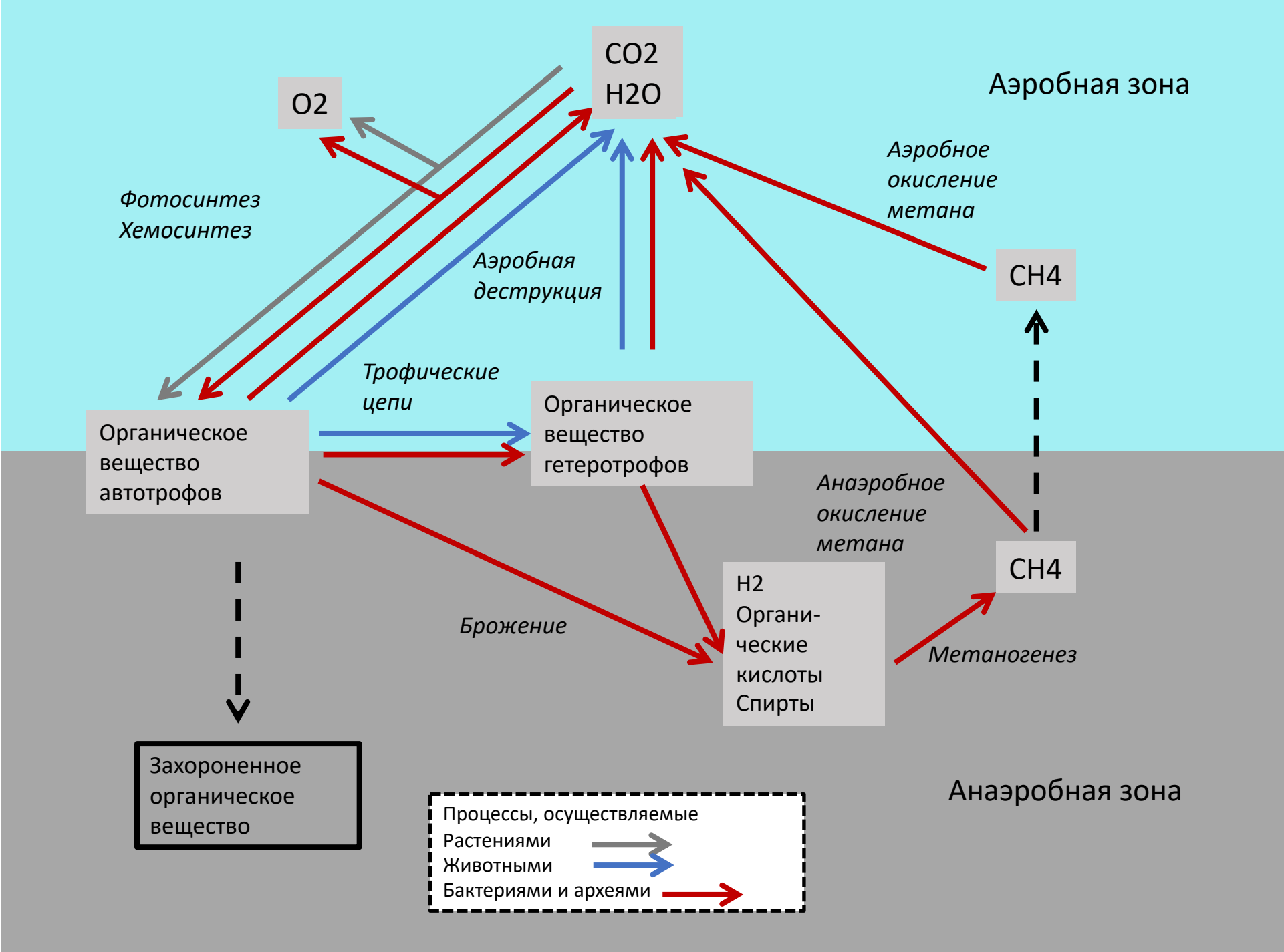
Кератиназы – ферменты грибов, бактерий и архей

Способны разлагать альфа- и бета-кератины до пептидов и аминокислот

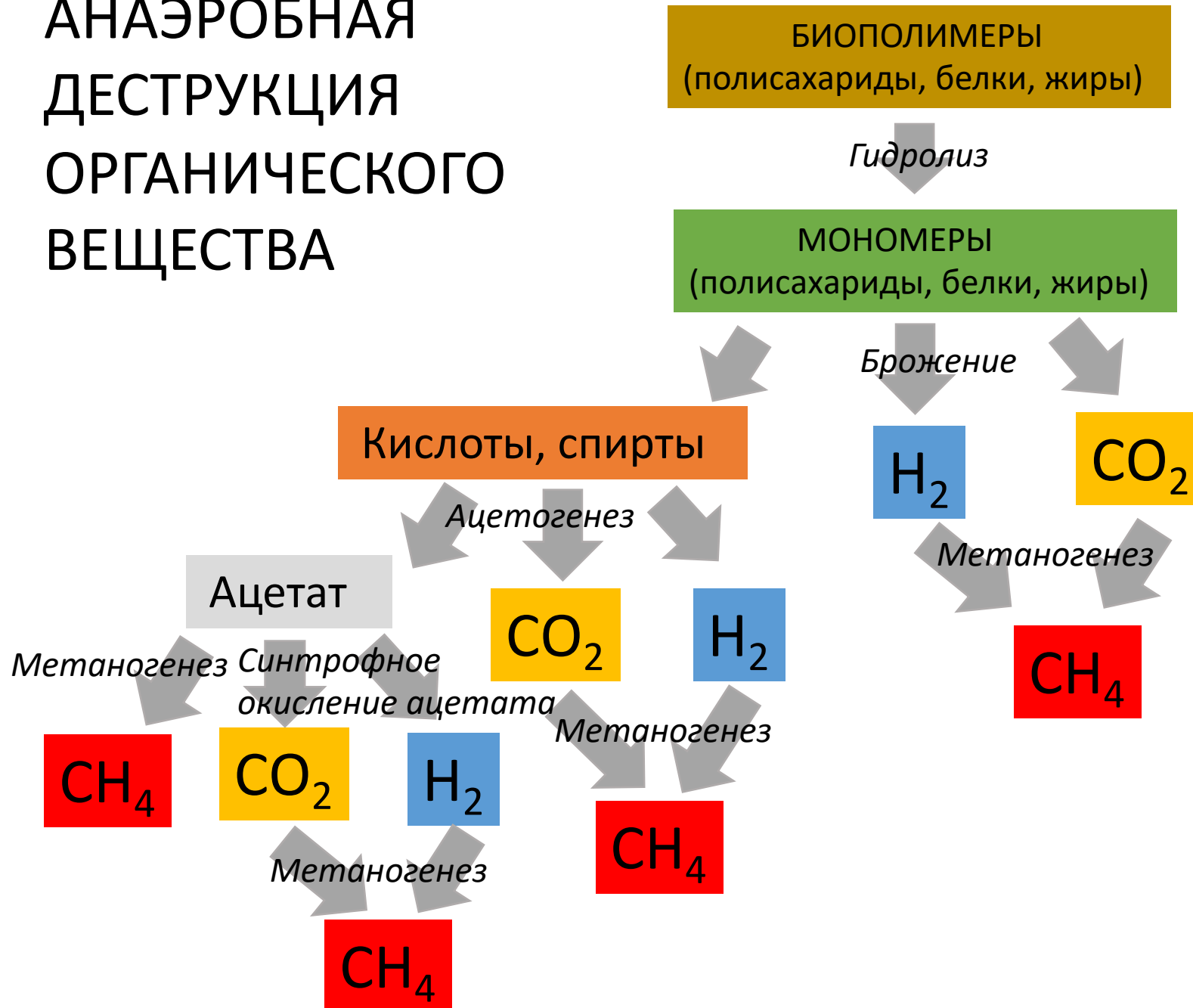


контроль опыт контроль опыт

Разложение перьев анаэробными гипертермофильными археями (Т 85°C, 7 дней культивирования)



# АНАЭРОБНАЯ ДЕСТРУКЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА



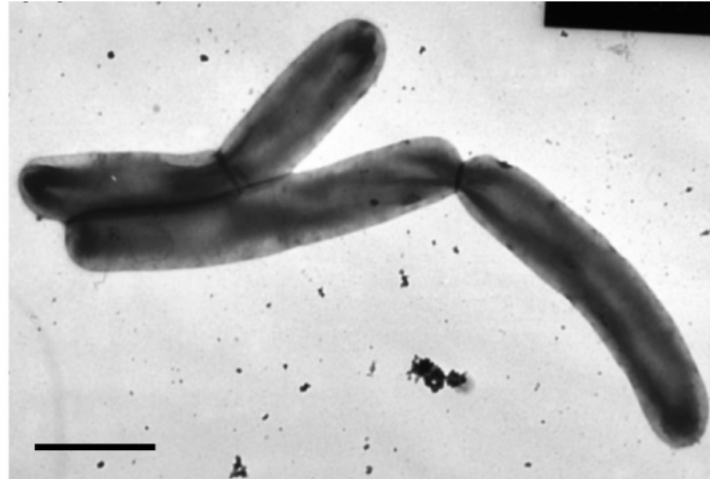
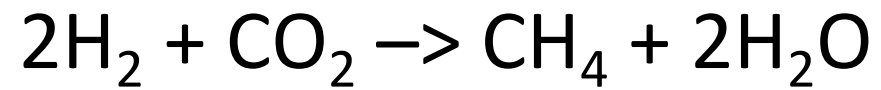
Метан образуется:

- на стадии брожения, стимулируя его
- на стадии ацетонегеза, делая его возможным
- на стадии синтрофного разложения ацетата
- непосредственно из ацетата

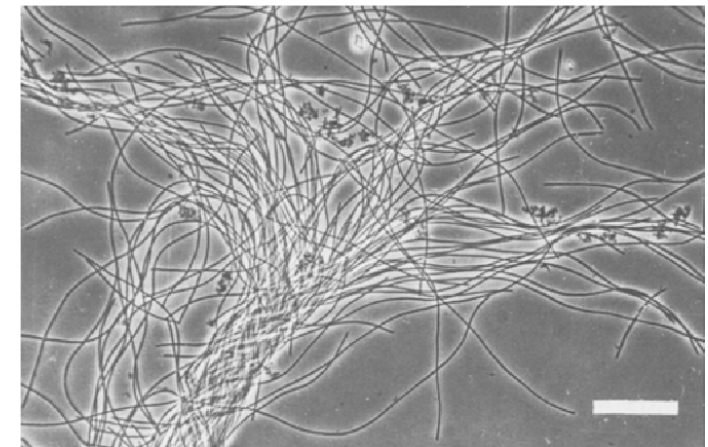
# МЕТАНОГЕНЕЗ

Археи филума *Euryarchaeota*

Литотрофный метаногенез



Ацетокластический метаногенез

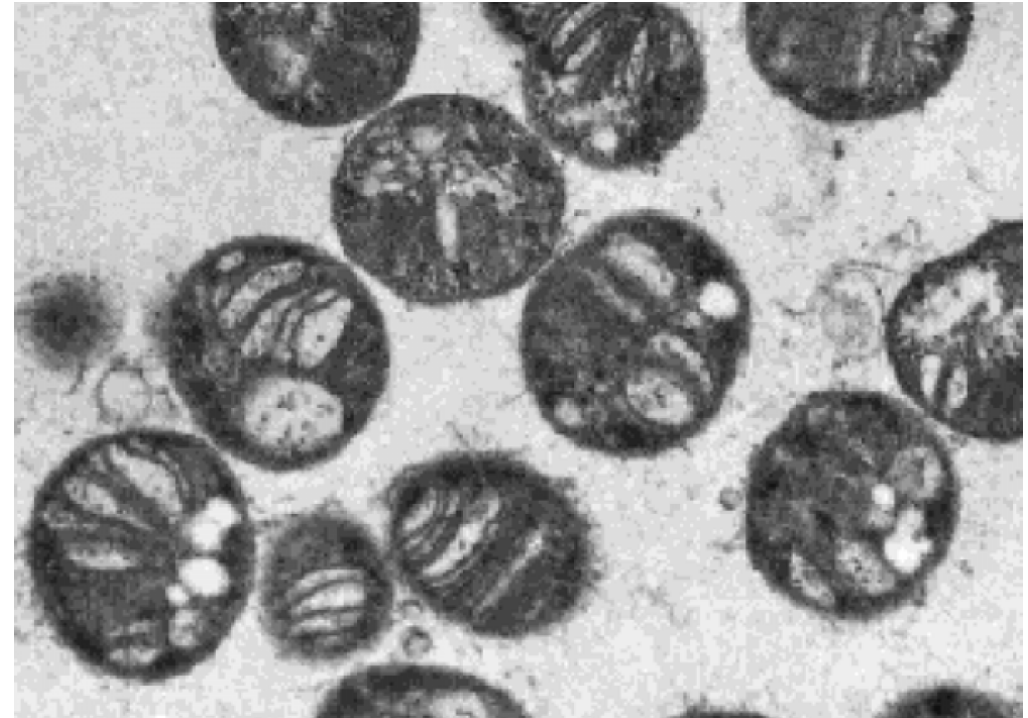


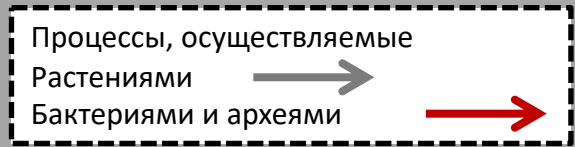
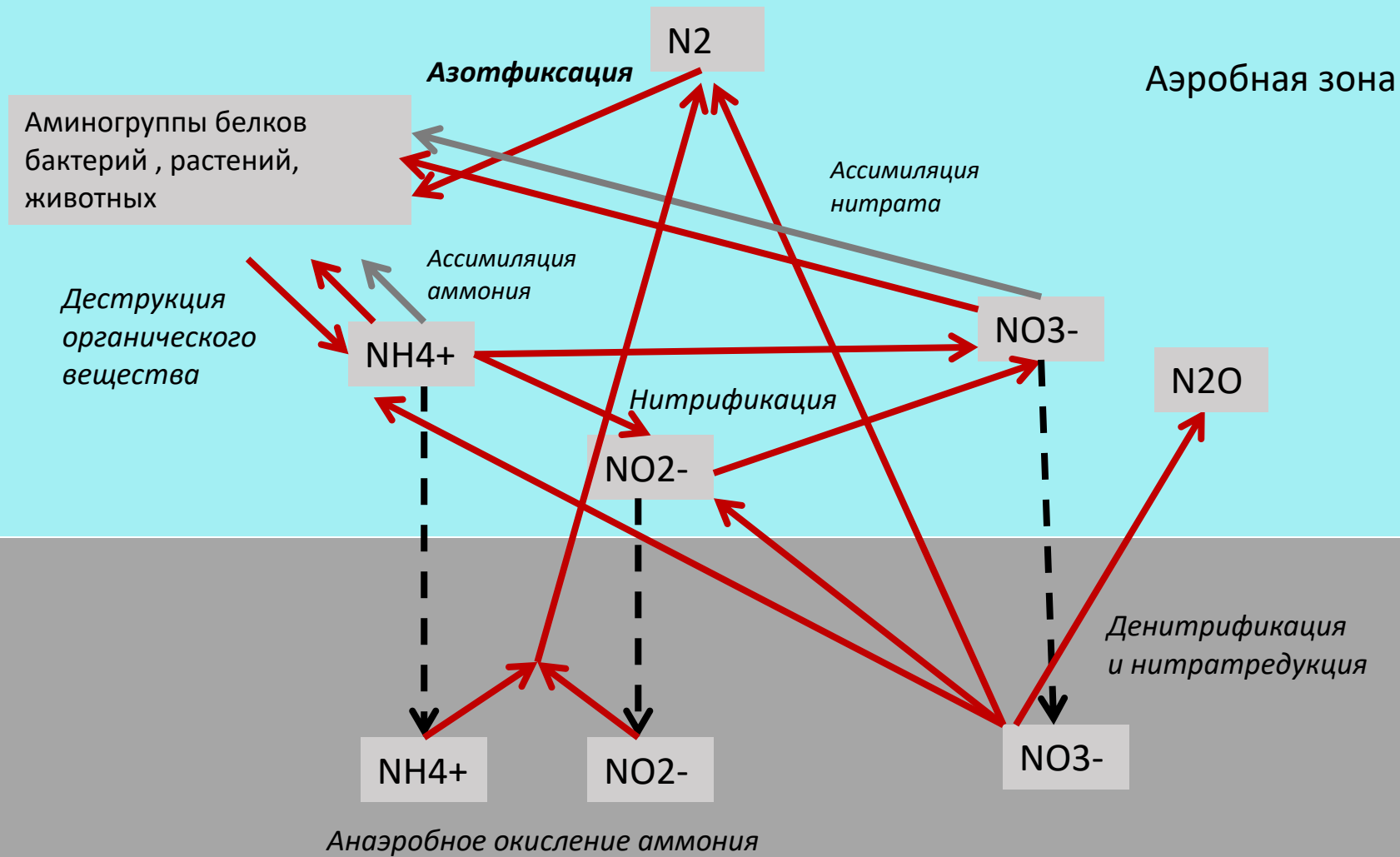
# МЕТАНОКИСЛЯЮЩИЕ БАКТЕРИИ



Аэробное окисление метана идет на границе аэробной и анаэробной зон и является фильтром, частично ограничивающим выход метана в атмосферу

Осуществляется бактериями разных филогенетических линий





# АССИМИЛЯЦИЯ АЗОТА=АЗОТФИКСАЦИЯ

Азот необходим всем живым организмам для построения белков

Основная часть азота на Земле –  $N_2$ , свободный азот атмосферы (80%)

Только прокариоты имеют механизм для включения свободного азота в свой обмен

Фермент **нитрогеназа**, есть у многих бактерий и архей

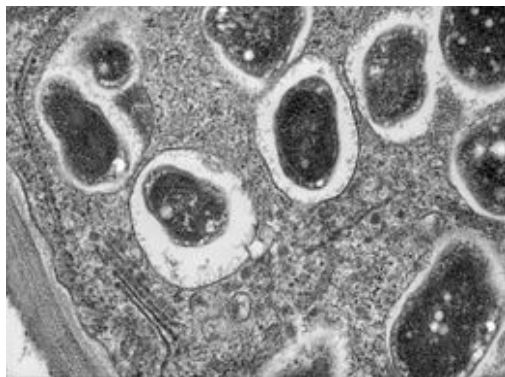


# АССИМИЛЯЦИЯ АЗОТА=АЗОТФИКСАЦИЯ

Симбиотические азотфиксаторы  
– клубеньковые бактерии  
бобовых

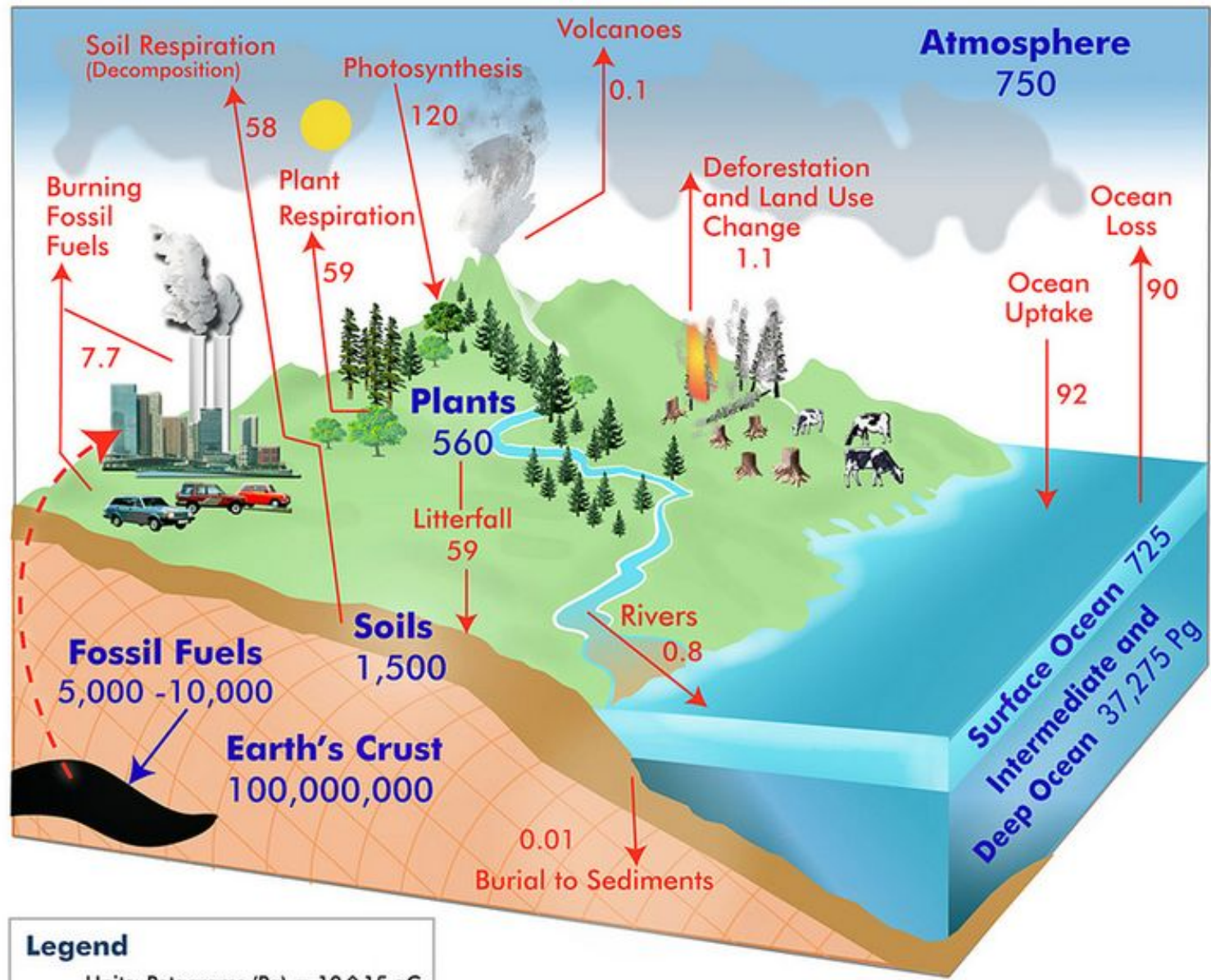


Свободноживущие азотфиксаторы  
ассоциированы с корнями и  
питаются их эксудатами



Присутствуют в кишечнике  
травоядных млекопитающих,  
обеспечивая их азотом







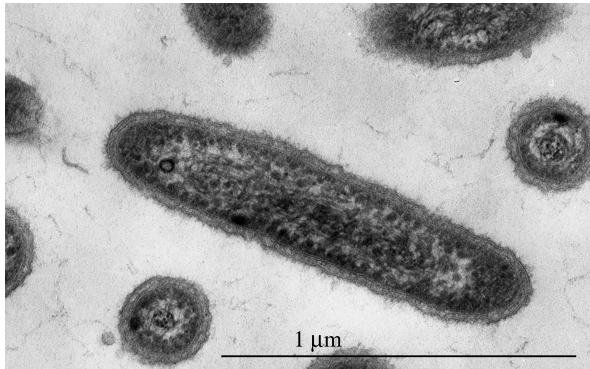
## Phylum *Ignavibacteria*



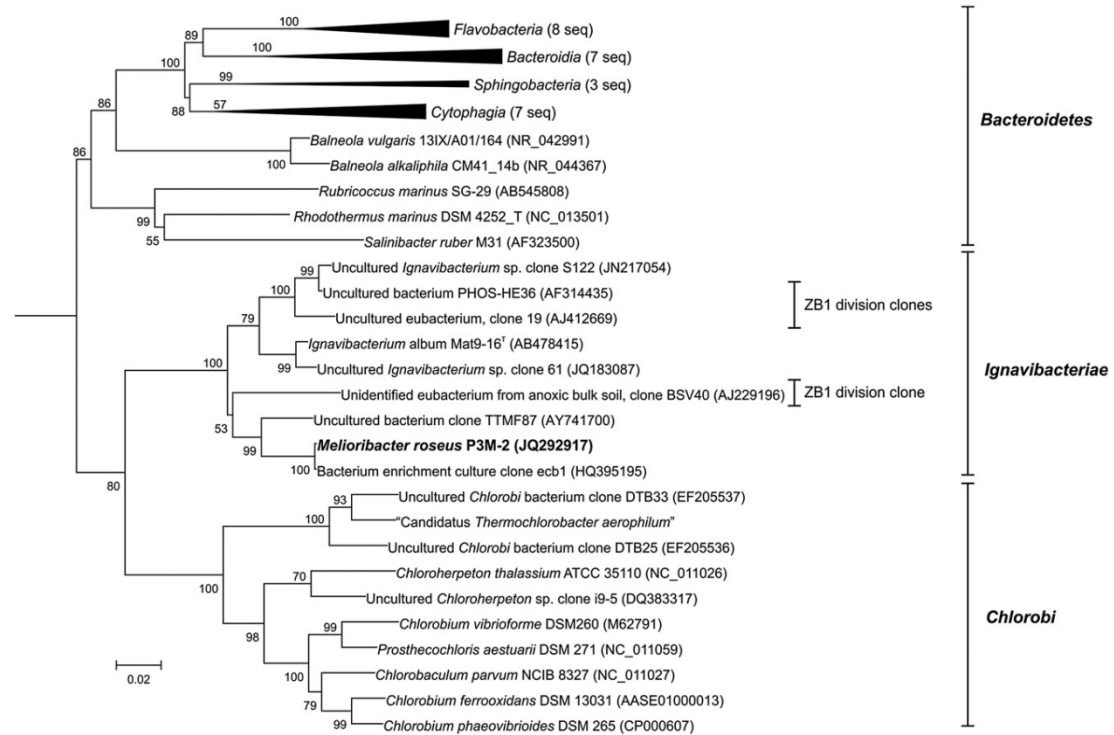
Илья  
Кубланов



Ольга  
Подосокорска  
я

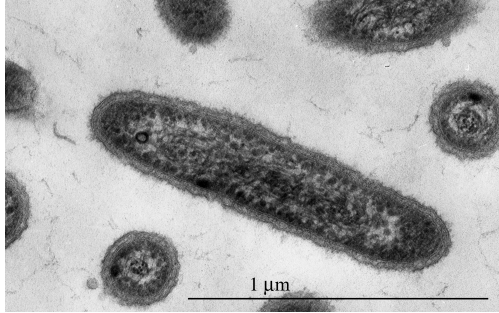


*Melioribacter roseus*



*Podosokorskaya et al., Environmental Microbiology, 2013, 15:1759-71.*

## Phylum *Ignavibacteria*

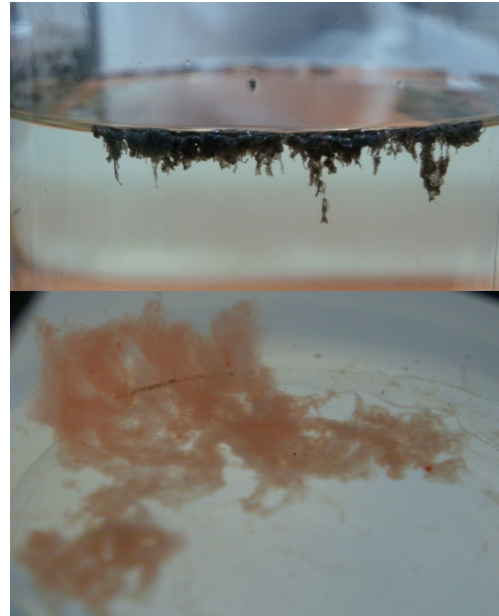


*Melioribacter roseus*

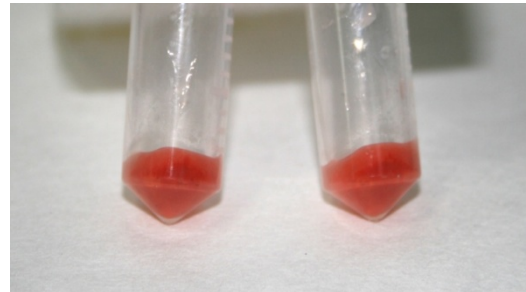
Moderate thermophile  
Facultative anaerobe

Substrates: mono- and disaccharides, polysaccharides (MCC, CMC, xylan, starch, lichenan, dextran, xanthan gum), proteins, acetate

Electron acceptors: oxygen, Fe(III), arsenate, nitrite



Biofilms



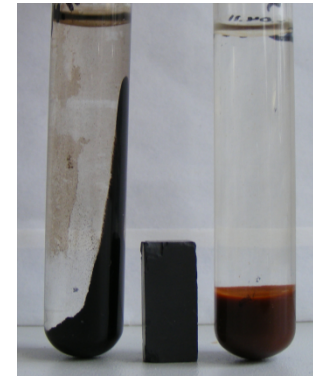
Precipitated cells



Илья  
Кубланов



Ольга  
Подосокорская



Iron reduction



Arsenate reduction

# Разложение углеводородов

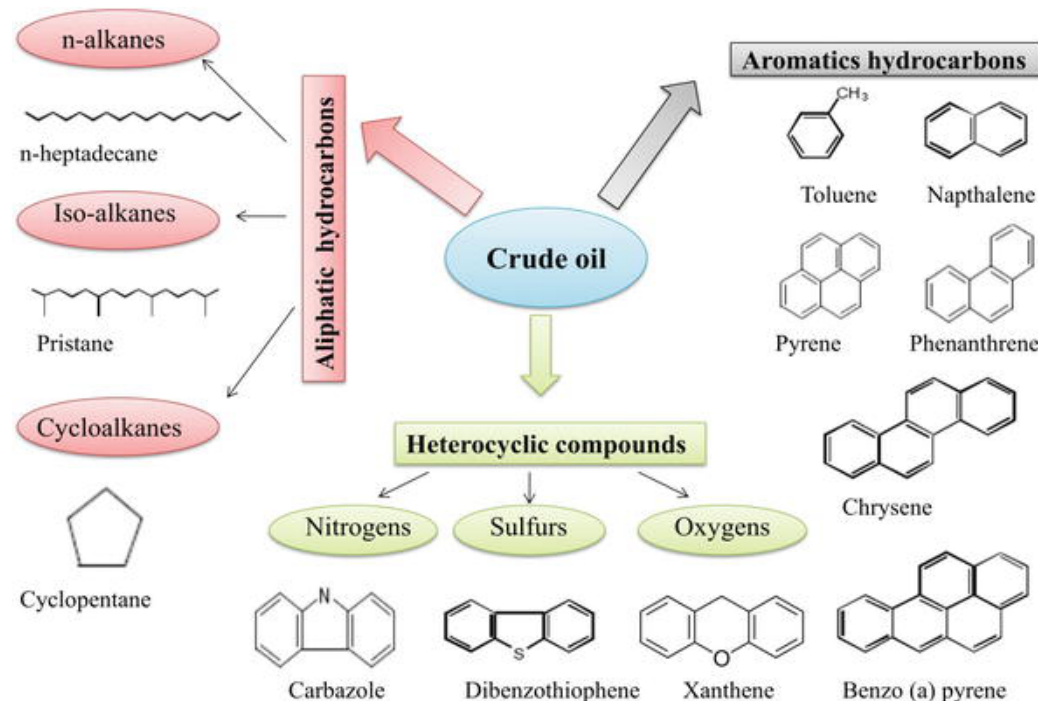
Нефть и нефтепродукты

Разлагаются аэробно и анаэробно (сульфатредукция), в том числе при низких температурах

Большое значение имеет продукция биосурфактантов (ПАВ)

Только бактерии и грибы

Алканы (парафины) разлагаются с помощью фермента алкан-монооксигеназы



# Разложение углеводородов

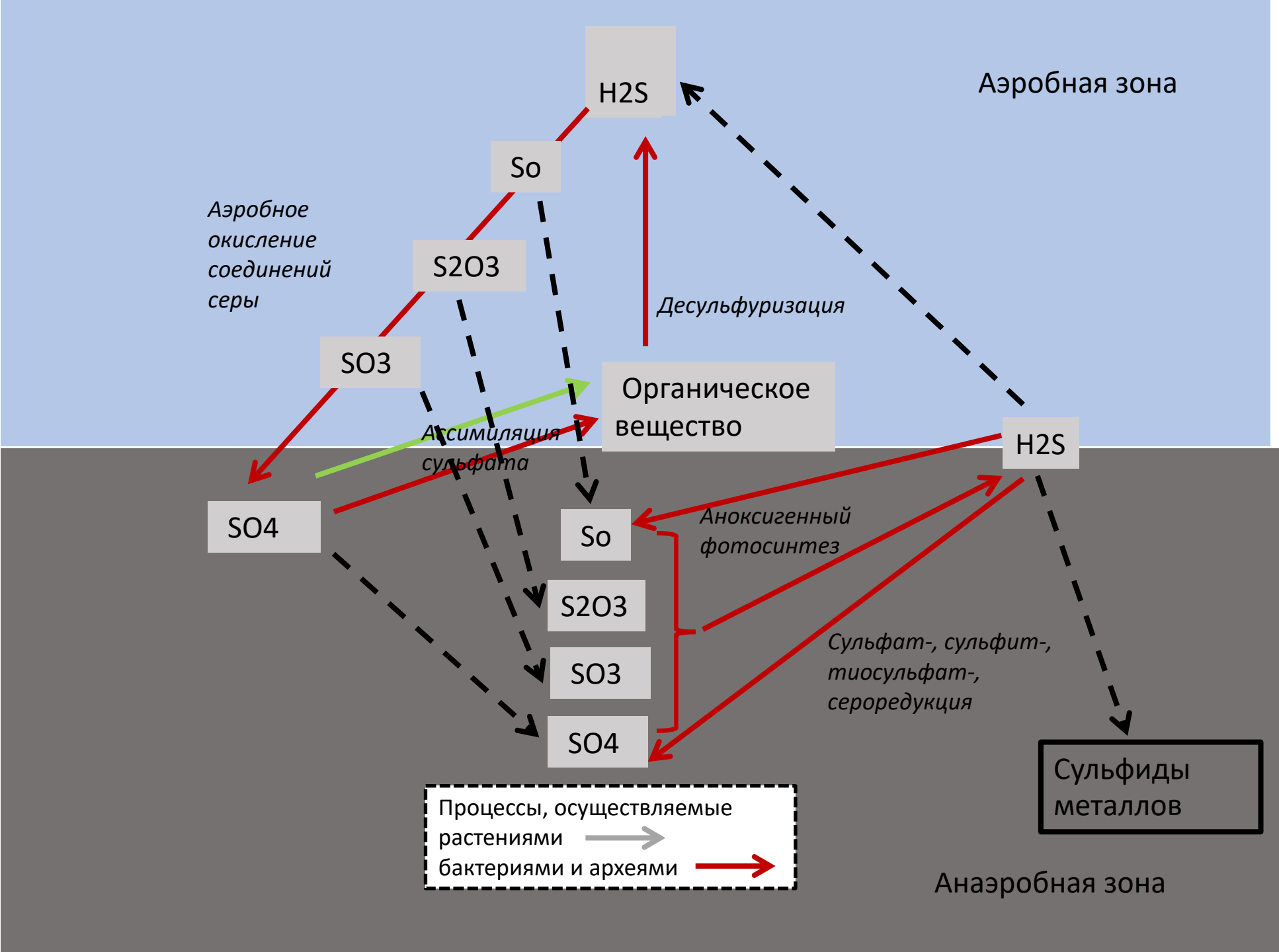
Способность бактерий окислять углеводороды широко используется для очистки загрязненных биотопов

Препараты обычно включают смесь микроорганизмов с разными свойствами



Разлив нефти в Мексиканском заливе произошел на глубине 1525 м (2010 г.)

Активация аборигенной микрофлоры, разлагающей углеводороды при низких температурах



*Аэробное окисление соединений серы*

*Десульфуризация*

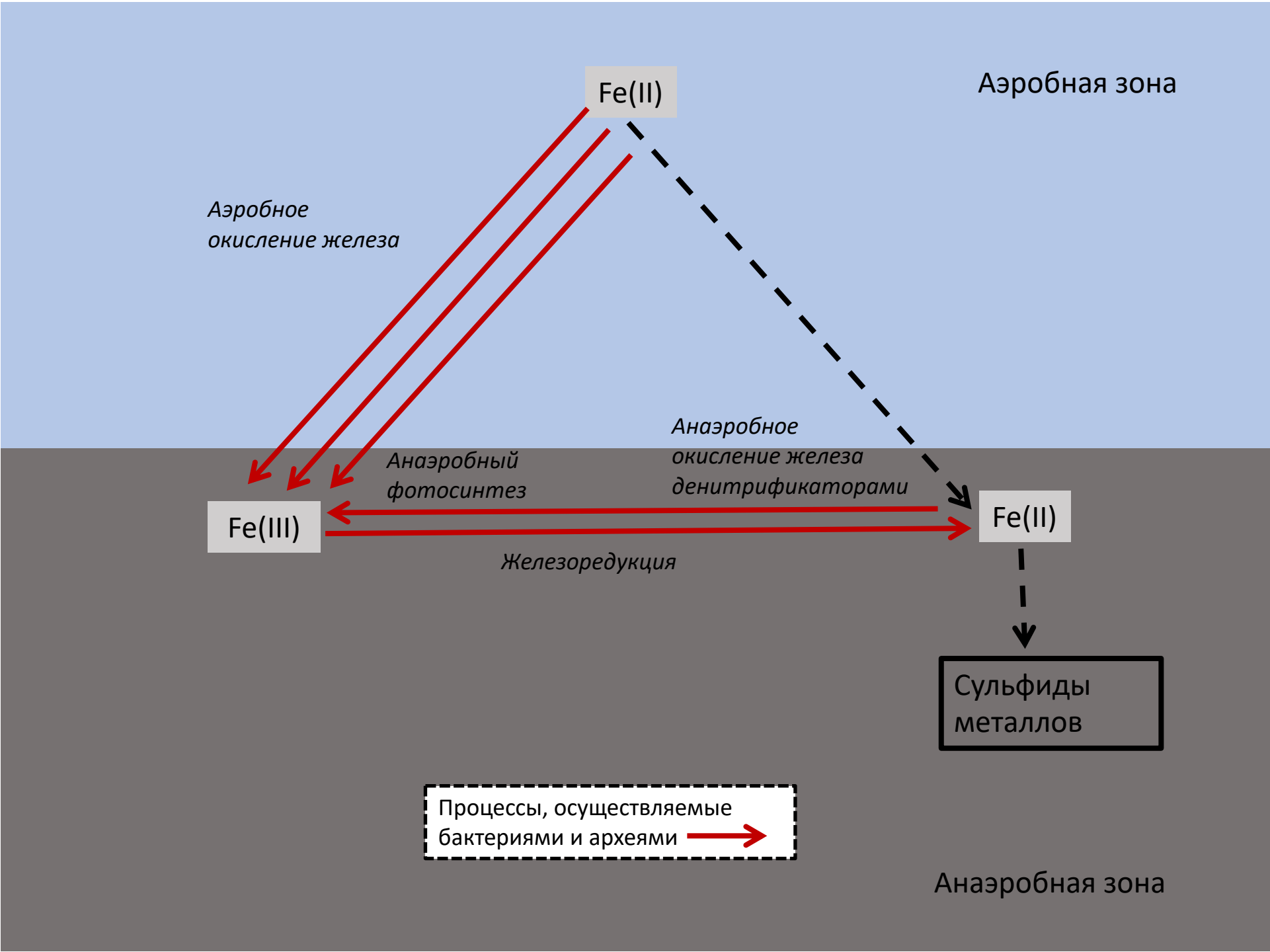
*Ассимиляция сульфата*

*Аноксигенный фотосинтез*

*Сульфат-, сульфит-, тиосульфат-, сероредукция*

Процессы, осуществляемые растениями →  
 бактериями и археями →

**Анаэробная зона**



Fe(II)

Аэробная зона

Аэробное окисление железа

Анаэробное окисление железа денитрификаторами

Анаэробный фотосинтез

Fe(III)

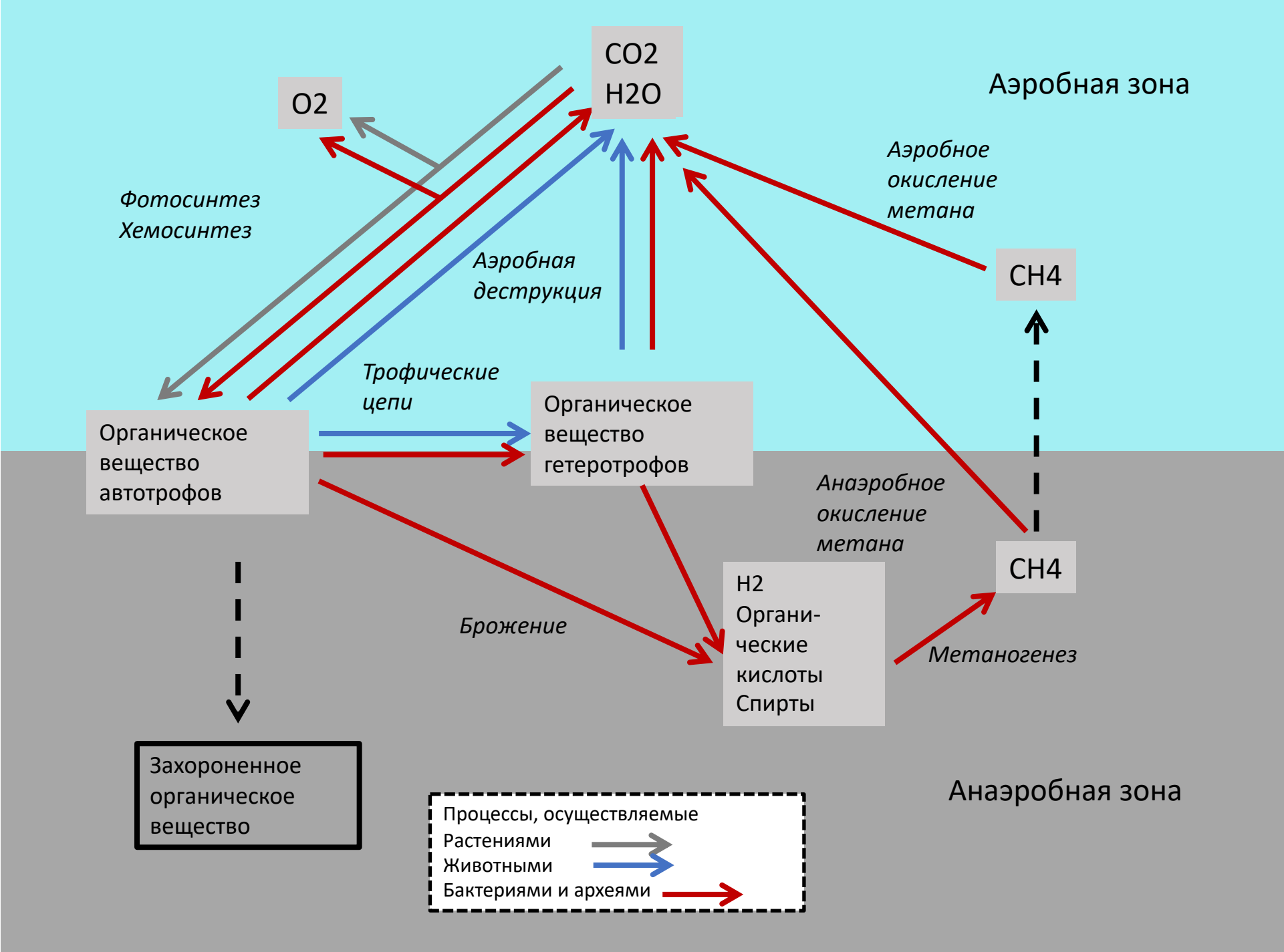
Fe(II)

Железоредукция

Сульфиды металлов

Процессы, осуществляемые бактериями и археями

Анаэробная зона



Фотосинтез  
Хемосинтез

$O_2$

$CO_2$   
 $H_2O$

Аэробная зона

Аэробное  
окисление  
метана

Аэробная  
деструкция

$CH_4$

Трофические  
цепи

Органическое  
вещество  
автотрофов

Органическое  
вещество  
гетеротрофов

Анаэробное  
окисление  
метана

$CH_4$

Брожение

$H_2$   
Органи-  
ческие  
кислоты  
Спирты

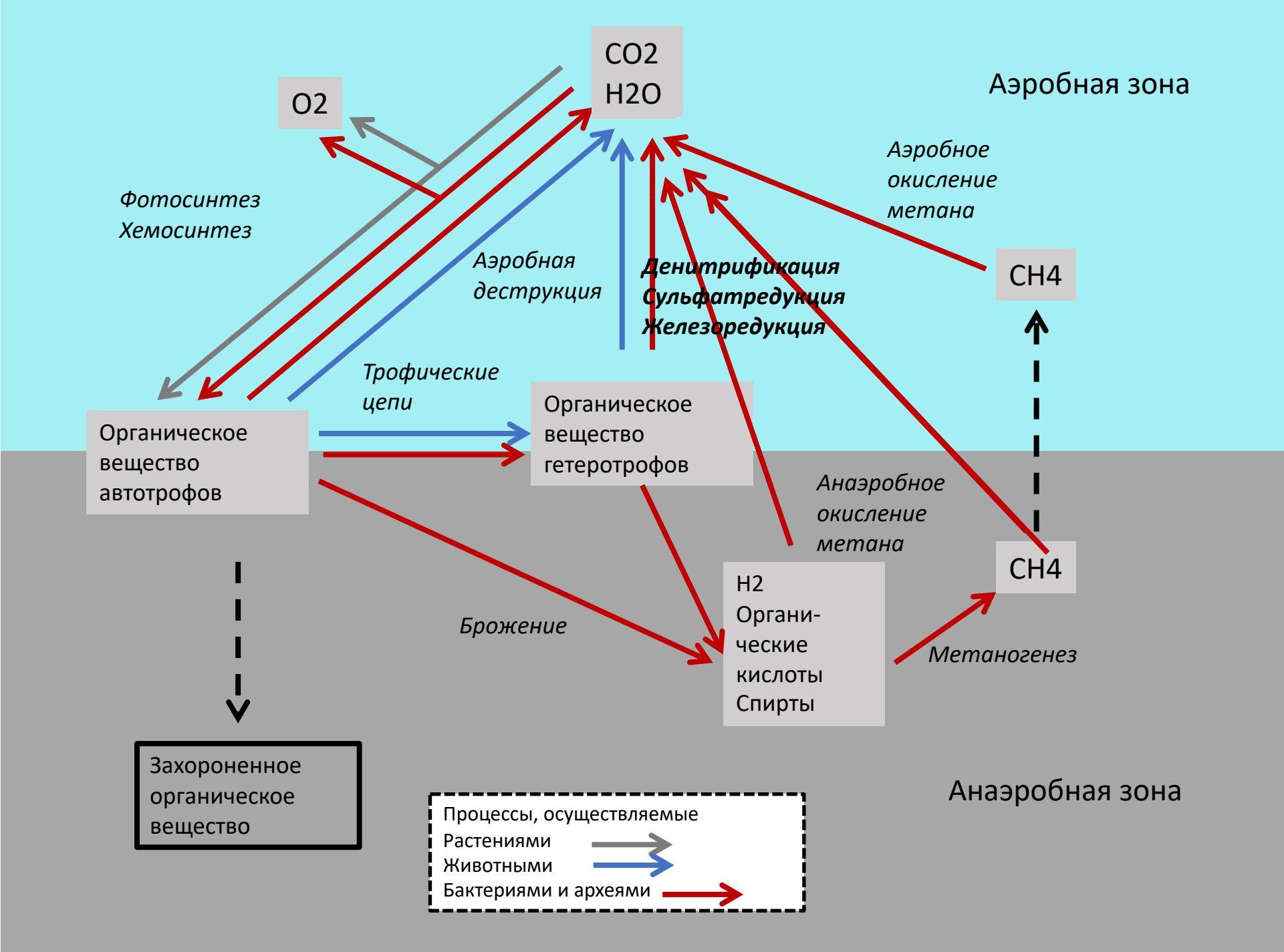
Метаногенез

↓

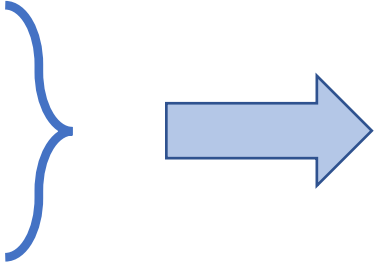
Захороненное  
органическое  
вещество

Анаэробная зона

Процессы, осуществляемые  
Растениями →  
Животными →  
Бактериями и археями →



# БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЦИКЛЫ ЭЛЕМЕНТОВ

- Обязательно разомкнуты
  - Процессы идут с разной скоростью
- 
- Обеспечиваются пулы свободных соединений**
- Циклы важнейших биогенных элементов многократно пересекаются и взаимодействуют между собой