

Лекция

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ

ЦИКЛЫ



Состав биосферы Земли

**Живое
вещество**

Косное

Биогенное

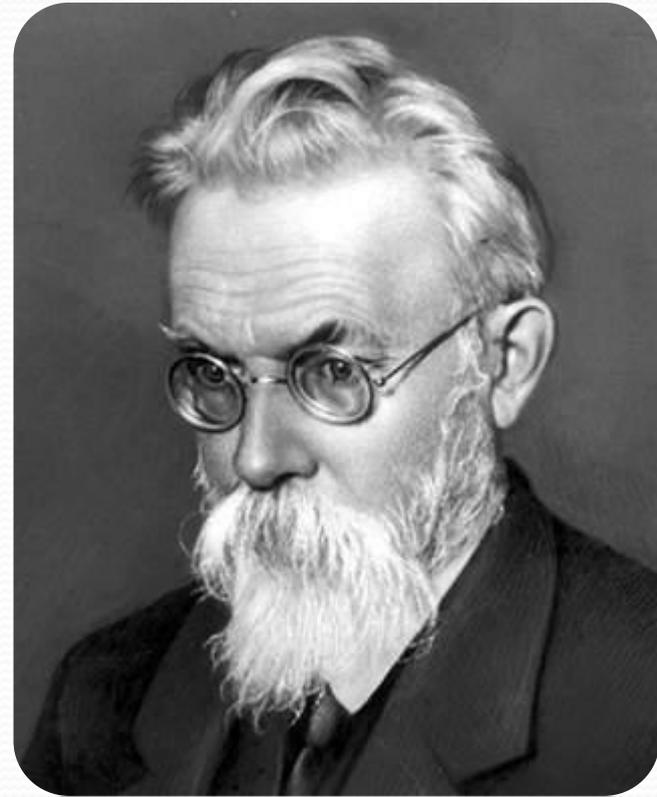
Биокосное

Живое вещество

«Под именем живого вещества я буду подразумевать всю совокупность организмов, растительности и животных, в том числе и человека.

С геохимической точки зрения, эта совокупность организмов имеет значение только той массой вещества, которая ее составляет, ее химическим составом и связанной с ней энергией...»

В. И. Вернадский 1919 г.



Важнейшие функции живого вещества в биосфере:

- газовая,
- концентрационная,
- окислительно-восстановительная,
- биохимическая,
- функция биогеохимической деятельности человека.

Газовая функция:

- основные газы атмосферы Земли, азот и кислород, биогенного происхождения.

Осуществляется зелеными растениями, выделяющими кислород в процессе фотосинтеза, а также всеми растениями и животными, выделяющими углекислый газ в результате дыхания.



Концентрационная функция:

● организмы накапливают в своих телах многие химические элементы, среди которых на первом месте стоит углерод.

Благодаря концентрирующей функции живых организмов образовались залежи мела, известняка, торфа, углей, нефти, серы, железные, марганцевые руды.

Ca

P

C

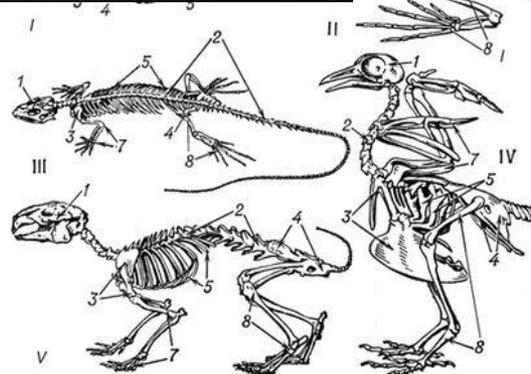
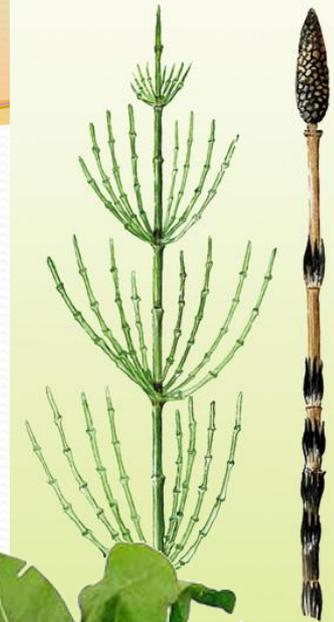


Концентрационная функция

концентраторами кремния
являются хвощи, осоки

йода и кальция —
водоросли ламинария,
щавель

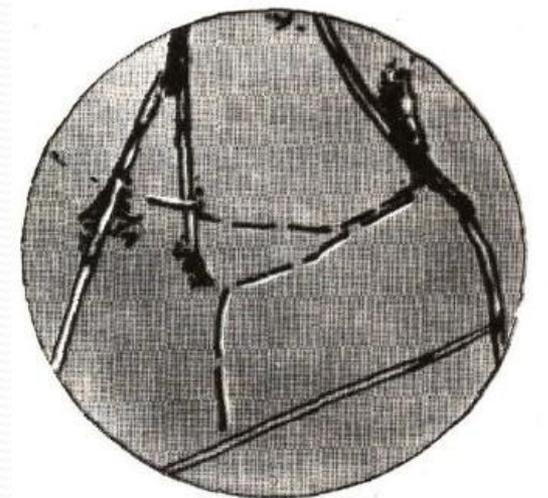
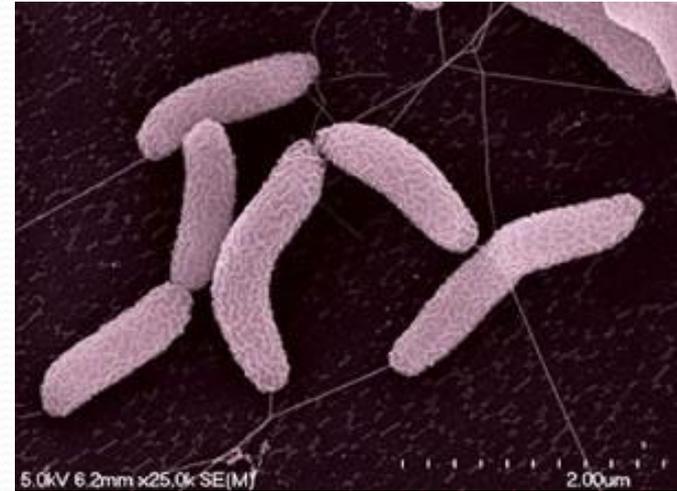
фосфора —
скелеты позвоночных
животных



Окислительно-восстановительная функция

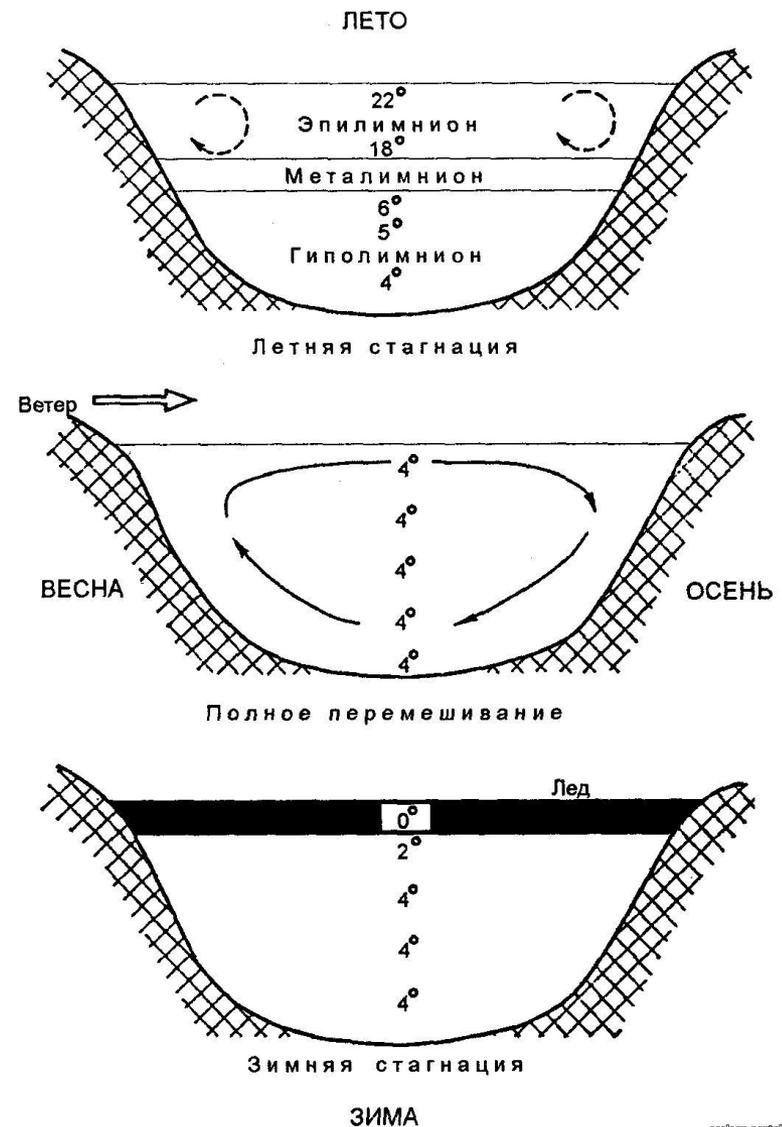
- выражается в химических превращениях веществ в процессе жизнедеятельности. В результате образуются соли, окислы, новые вещества.

С данной функцией связано формирование железных и марганцевых руд, залежей серы, известняков и т.п.



Окислительно-восстановительная функция

● Организмы, обитающие в водоемах, регулируют кислородный режим и создают условия для растворения или же осаждения ряда металлов (V, Mn, Fe) и неметаллов (S) с переменной валентностью.



Биохимическая функция

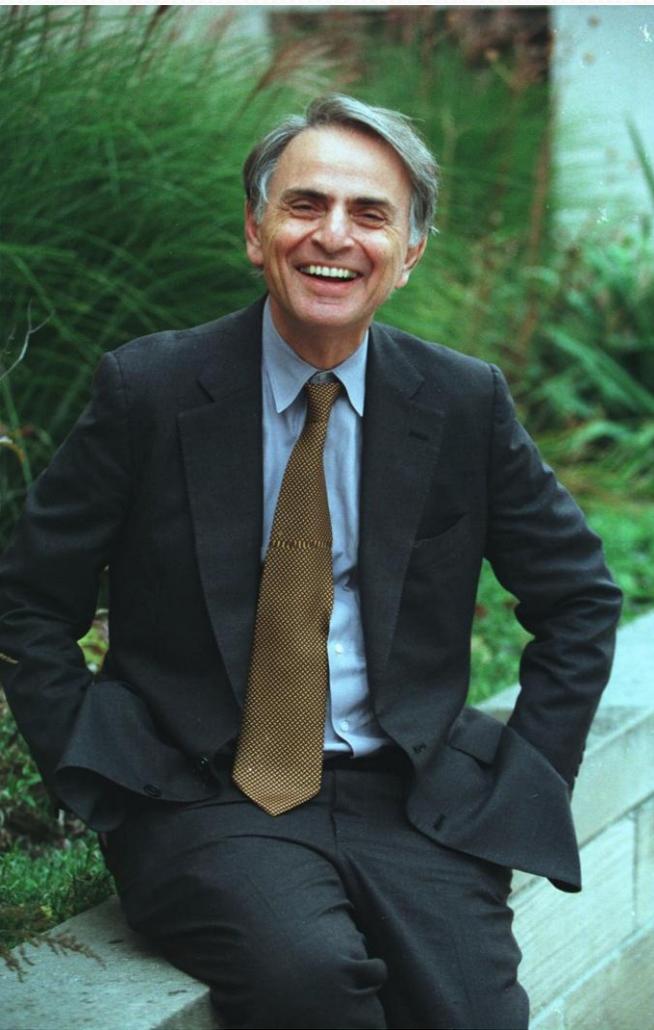
- размножение, рост и перемещение в пространстве («расползание») живого вещества, что приводит к круговороту химических элементов в природе.



Биогеохимическая деятельность человека

- связана с биогенной миграцией атомов, многократно усиливающейся под влиянием хозяйственной деятельности человека.
- охватывает все вещества земной коры, в том числе такие концентраторы углерода, как уголь, нефть, газ и др.





Я есть совокупность воды, кальция и органических молекул, называемая Карлом Саганом.

Вы представляете собой почти такую же систему молекул с другим совокупным названием.

И только-то? Неужели в нас нет ничего, кроме молекул?

Кое-кому кажется, что это унижает человеческое достоинство.

Лично я нахожусь вдохновляющим то, что наш мир позволяет

развиваться столь тонким и сложным молекулярным машинам,

какими являемся мы с вами.

Карл Саган

Биогенные элементы (биогены)



Макроэлементы

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



Микроэлементы

Fe, Cl, Na, Zn, V, Mo,
B, Co, Cu, Si, Se, Cr,
Ni, I, F, Sn, As

Биогеохимический цикл (БГХ-цикл)

круговорот химических веществ из неорганической среды через растительные и животные организмы обратно в неорганическую среду с использованием солнечной энергии и энергии химических реакций.

БГХ-цикл

Фонды – совокупности веществ, содержащих рассматриваемый элемент в определенной форме.

Потоки – пути преобразования элемента, переводящие его из одного фонда в другой.

Обменные

Резервные

атмосфера
гидросфера
Циклы
газообразных
веществ

круговорот
воды

литосфера
Осадочные циклы

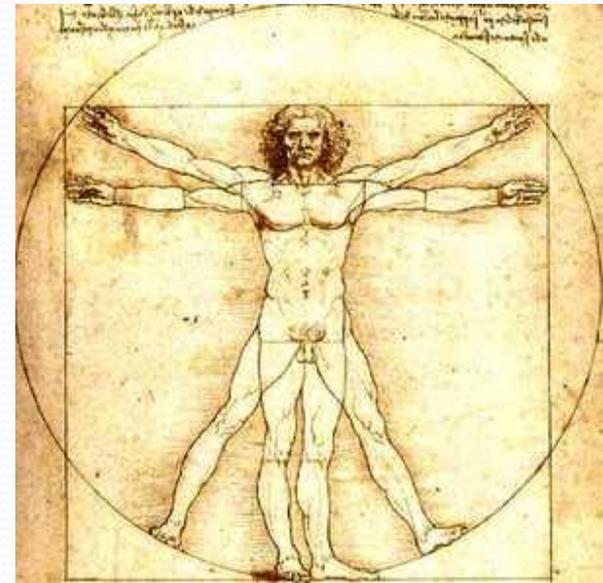
Существование подобных круговоротов создает
возможность для **саморегуляции системы**
(или гомеостаза), что придает экосистеме
устойчивость:

**удивительное постоянство процентного
содержания различных элементов.**

Гомеостаз

(греч. homoios — одинаковый, подобный и stasis — состояние, неподвижность)

способность организма или открытой системы сохранять постоянство своего внутреннего состояния посредством скоординированных реакций, направленных на поддержание динамического равновесия в изменяющихся условиях среды.



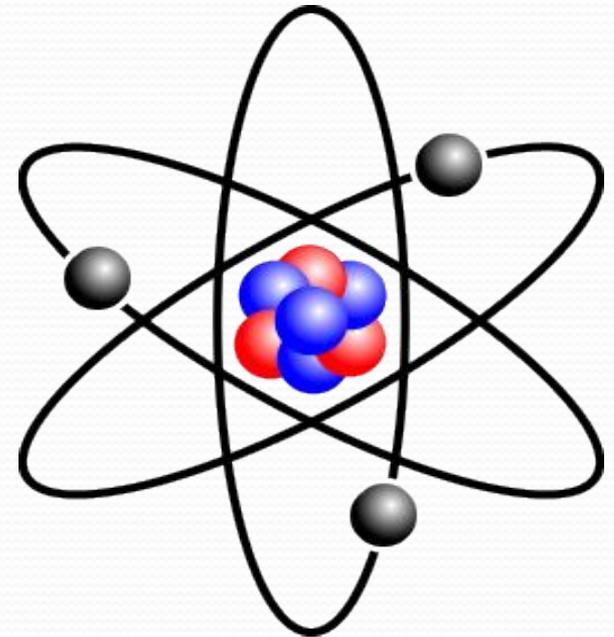
Гомеостаз (*Н.Ф. Реймерс*)

Состояние внутреннего динамического равновесия природной системы, поддерживаемое регулярным возобновлением основных ее структур, вещественно-энергетического состава и постоянной функциональной саморегуляцией ее компонентов.



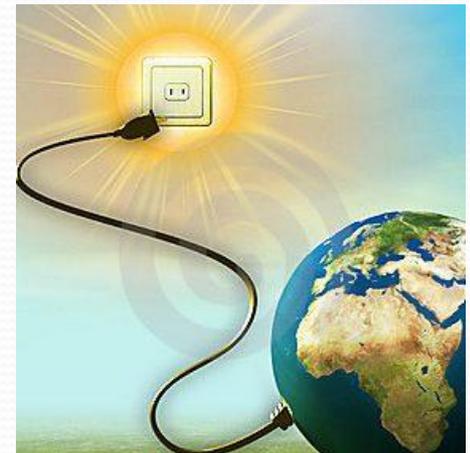
Гомеостаз (*Н.Ф. Реймерс*)

Гомеостаз характерен и необходим для всех природных систем – от космических до организма и атома.



Источники энергии БГХ-ЦИКЛОВ

- энергия Солнца, преобразованная гидросферой и атмосферой в гидрологическом цикле;
- энергия Солнца, накопленная в органических веществах в ходе фотосинтеза;
- хтоническая энергия – материнская энергия Земли.

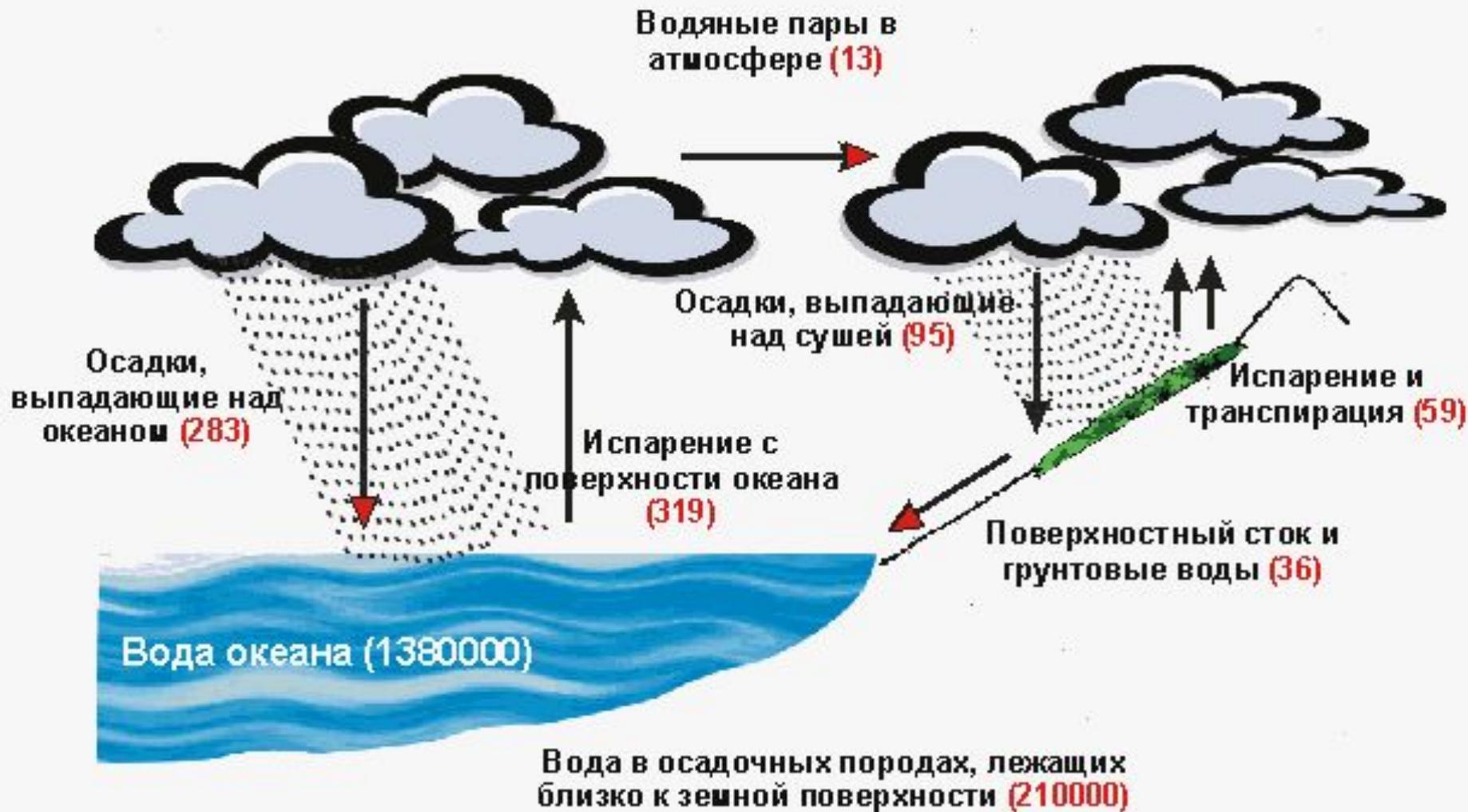


Круговорот воды (гидрологический цикл)

- круговорот воды за счет испарения, конденсации и осадков.
- Переход из жидкого в газообразное и твердое состояние и обратно, - один из главных компонентов абиотической циркуляции веществ.
- Происходят перераспределение и очистка планетарного запаса воды.
- Время оборота пресной воды составляет ≈ 1 год.



Количества воды во всех фондах и потоках (цифры в скобках) выражены в миллиардах миллиардов (10^{18}) граммов в год



Q испарения

=

Q осадков

**Q испар. океан
+
Q испар. суша**

-45 т м³

+45 т м³

**Q осадки океан
+
Q осадки суша**

Влияние деятельности человека на глобальный круговорот воды:

Сток воды в океан увеличивается, и пополнение фонда грунтовых вод сокращается в результате:

- покрытия земной поверхности непроницаемыми материалами,
- строительства оросительных систем,
- уплотнения пахотных земель,
- уничтожения лесов и т.п.

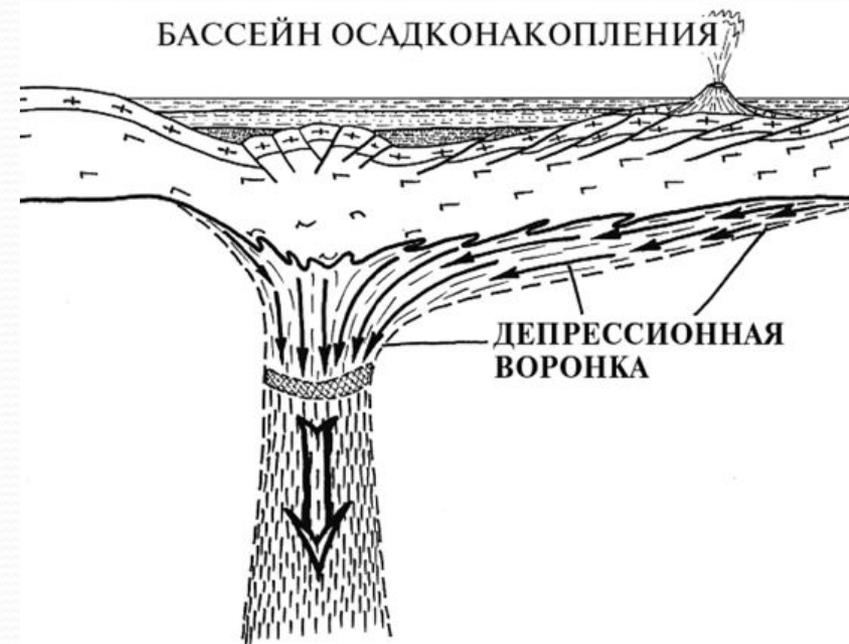
Влияние деятельности человека на глобальный круговорот воды:

Рост объема поверхностного стока приводит к:

увеличению риска наводнений,
усилению эрозии почв,
резервуары подземных вод выкачиваются быстрее,
чем заполняются

депресссионные воронки
площадью до 50000 км²,
снижение уровня в центре
воронки 80-130 м

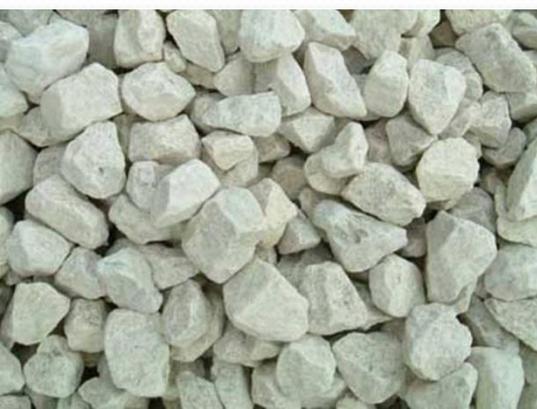
(Москва, Брянск, Санкт-Петербург)



Круговорот углерода

5	С	6
	12,011	
	$2s^2 2p^2$	
	Углерод	2
13	Si	14
815	28,0855	

- Самый интенсивный биогеохимический цикл хотя общее содержание этого элемента в земной коре составляет всего около 0,1%.
- В природе углерод существует в двух основных формах – в карбонатах (известняках) и углекислом газе. Свободный углерод встречается в виде алмаза, графита и угля



Основная масса аккумулирована:

- в карбонатах на дне океана (10^{16} т),
- в кристаллических породах (10^{16} т),
- каменном угле и нефти (10^{16} т)

и участвует в большом цикле круговорота.

Миграция углекислого газа в биосфере Земли протекает 2 путями

- Первый путь – поглощение органических веществ и в последующее захоронение их в литосфере в виде торфа, угля, горных сланцев, рассеянной органики, осадочных горных пород. В недрах Земли находятся большие скопления нефти, представляющей сложную смесь различных углеродсодержащих соединений, преимущественно углеводородов.

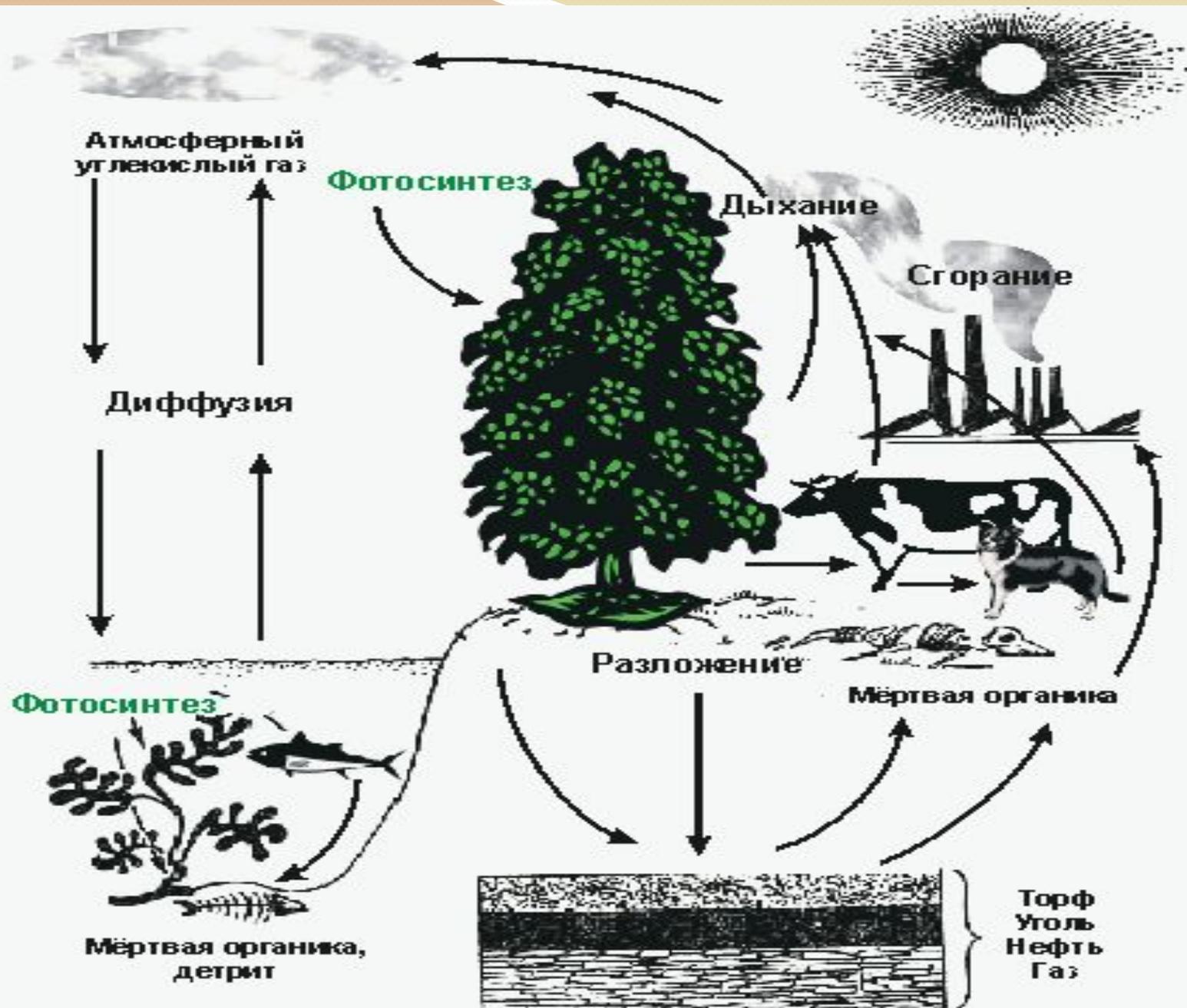
Все эти вещества произведены фотосинтезирующими растениями за разное время:

- возраст лесов - десятки и сотни лет;
- торфяников - тысячи лет;
- угля, нефти, газов - сотни миллионов лет.

- **Второй путь** - создание карбонатной системы в различных водоемах, где CO_2 переходит в H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} .
- Затем с помощью растворенного в воде кальция (реже магния) происходит осаждение карбонатов CaCO_3 биогенным и абиогенным путями.

Содержание углерода
литосфера / гидросфера / атмосфера
28 5570 : 57 : 1

- Углекислый газ атмосферы и гидросферы обменивается и обновляется живыми организмами за **395 лет**.



Потребление углекислого газа из воздуха:

- в процессе фотосинтеза
$$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$$
- в реакциях с карбонатами в океане
$$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$$
- при выветривании горных пород
$$\text{Fe}_2\text{S}_3 + 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{HCO}_3)_3 + 3\text{H}_2\text{S}.$$
- осадочные карбонатные породы
$$\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2.$$

Поступление углекислого газа в атмосферу

- Дыхание всех организмов.
- Минерализация органических веществ;
Минерализация - распад органического вещества до CO_2 , воды и простых солей.
- Выделение по трещинам земной коры из осадочных пород.
- Выделение из мантии Земли при вулканических извержениях (незначительная часть - до 0,01 %).
- Сжигание древесины и топлива.

Низкое содержание CO_2 и высокие концентрации O_2 в атмосфере сейчас служат *лимитирующими факторами для фотосинтеза*, а зеленые растения и карбонаты океана являются регуляторами этих газов, поддерживающими относительно стабильное их соотношение (0,03% и 21 %).

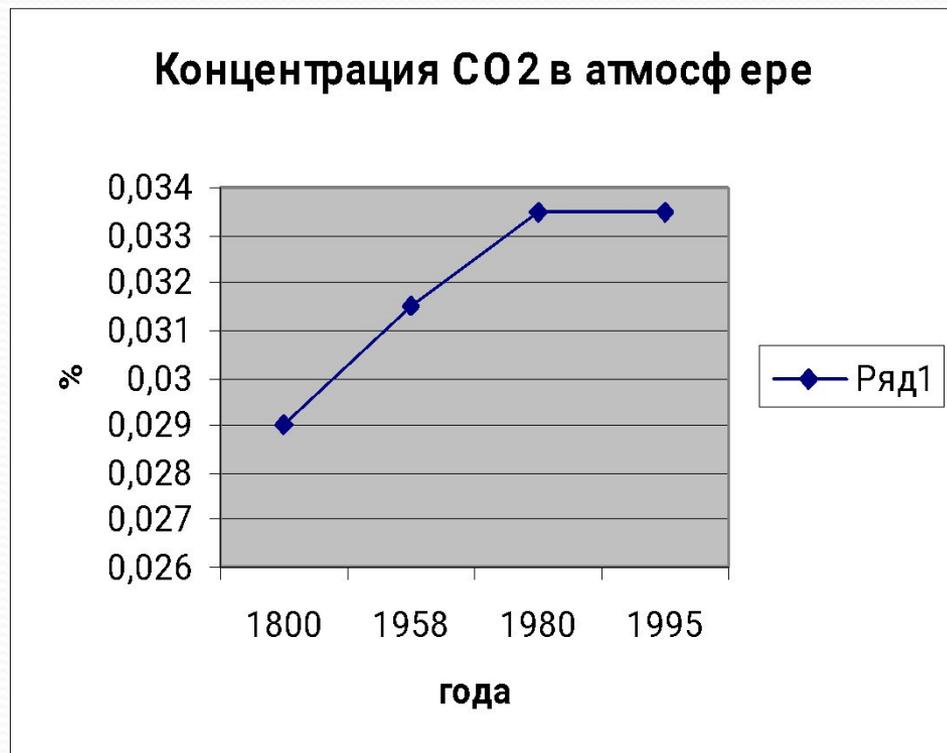
- Таким образом, «зеленый пояс» Земли и карбонатная система океана являются буферной системой, которая поддерживает относительно постоянное содержание CO_2 в атмосфере.
- Полагают, что до наступления индустриальной эры потоки углерода между атмосферой, материками и океанами были сбалансированы.



Человек тем или иным путем извлекает эти запасы из недр и постепенно увеличивает поток CO_2 в атмосферу

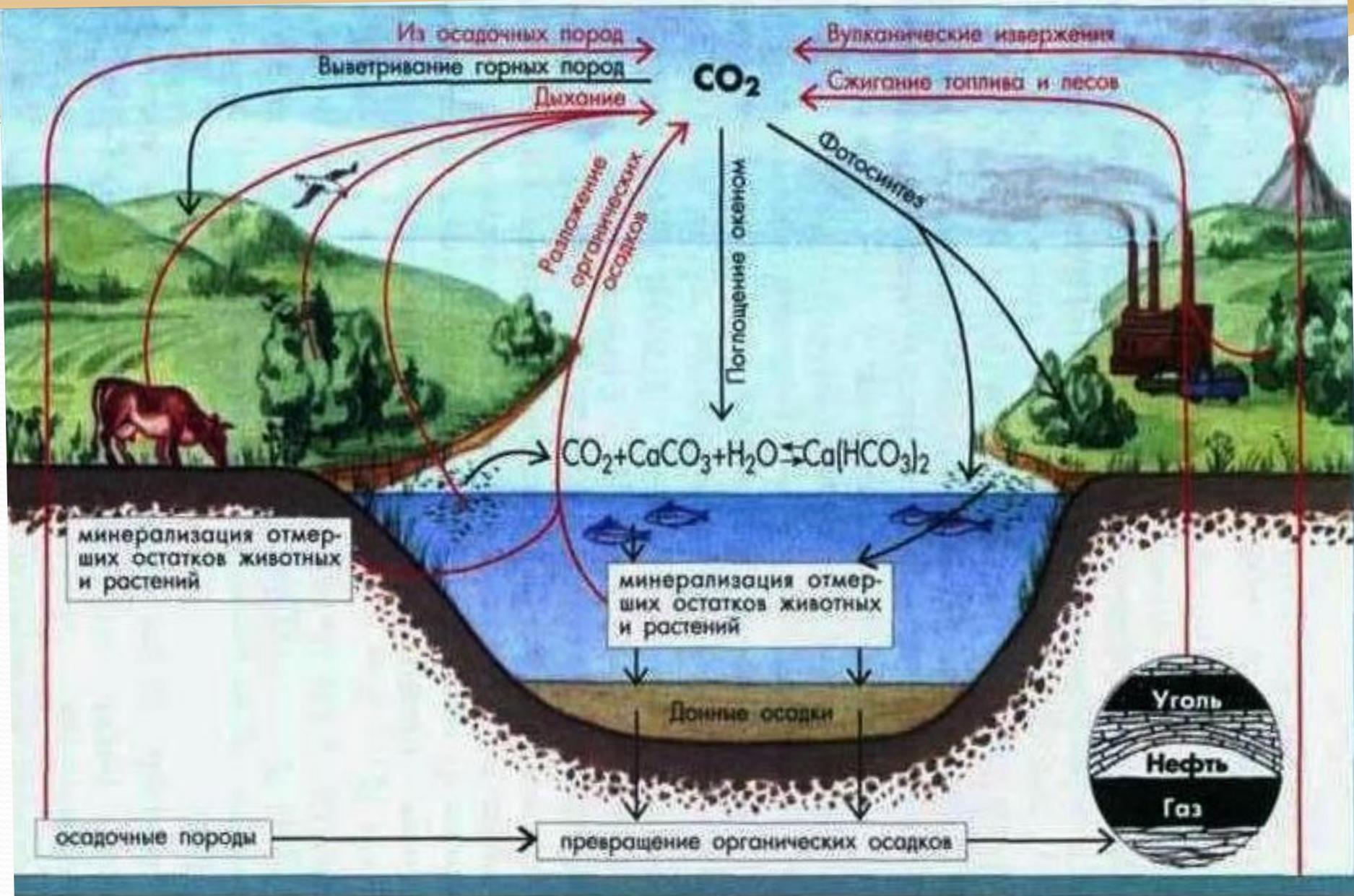
Главные причины увеличения содержания CO_2 в атмосфере:

- сжигание горючих ископаемых в промышленности,
- на транспорте,
- уничтожение лесов.



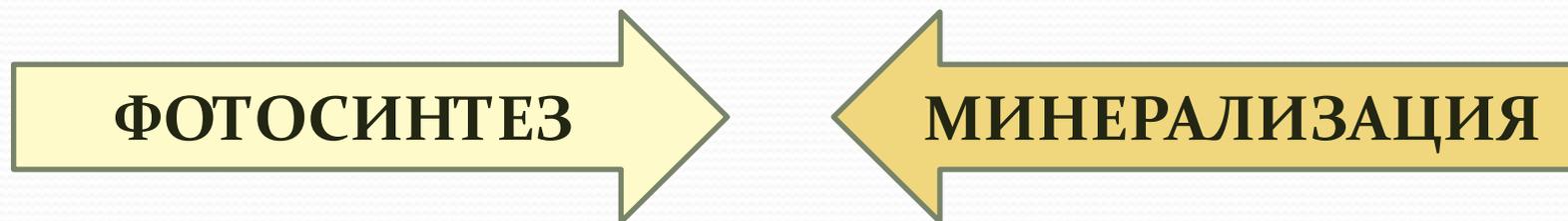
При уничтожении лесов содержание углекислого газа в атмосфере увеличивается, т.к. леса важные накопители углерода: в биомассе лесов приблизительно в 1,5 раза, а в лесном гумусе в 10 раз больше, чем в атмосфере





Биотический круговорот углерода: \rightarrow - потребление CO_2 ; \leftarrow - поступление CO_2 в атмосферу

- Биогеохимический круговорот углерода в биосфере в целом и в конкретном ландшафте – из CO_2 в живое вещество и обратно в CO_2 – приводится в действие единством двух противоположно направленных процессов – фотосинтеза и минерализации.



- Но часть углерода посредством медленно идущих циклических процессов удаляется, отлагаясь в осадочных породах.

- Баланс атмосферного углерода определяется биогеохимическими круговоротами, в каждом из которых осуществляются приход и расход CO_2 .
- Почва служит связующим звеном между биогеохимическими круговоротами углерода.
- В течение 4х лет растения суши и моря усваивают столько углерода, сколько его содержится в атмосфере, а в течение 300 лет - в гидросфере.

Круговорот азота



Азот входит в состав важнейших органических молекул - ДНК, белков, липопротеидов, АТФ, хлорофилла и др.

Недостаток азота часто является фактором, лимитирующим биологическую продукцию.

Отношение общего количества азота к количеству углерода в биомассе составляет 16 : 106.

Круговорот азота

Молекулярный азот атмосферы недоступен растениям, ассимиляция его ими возможна только из связанных форм — аммиака, нитратов, мочевины.

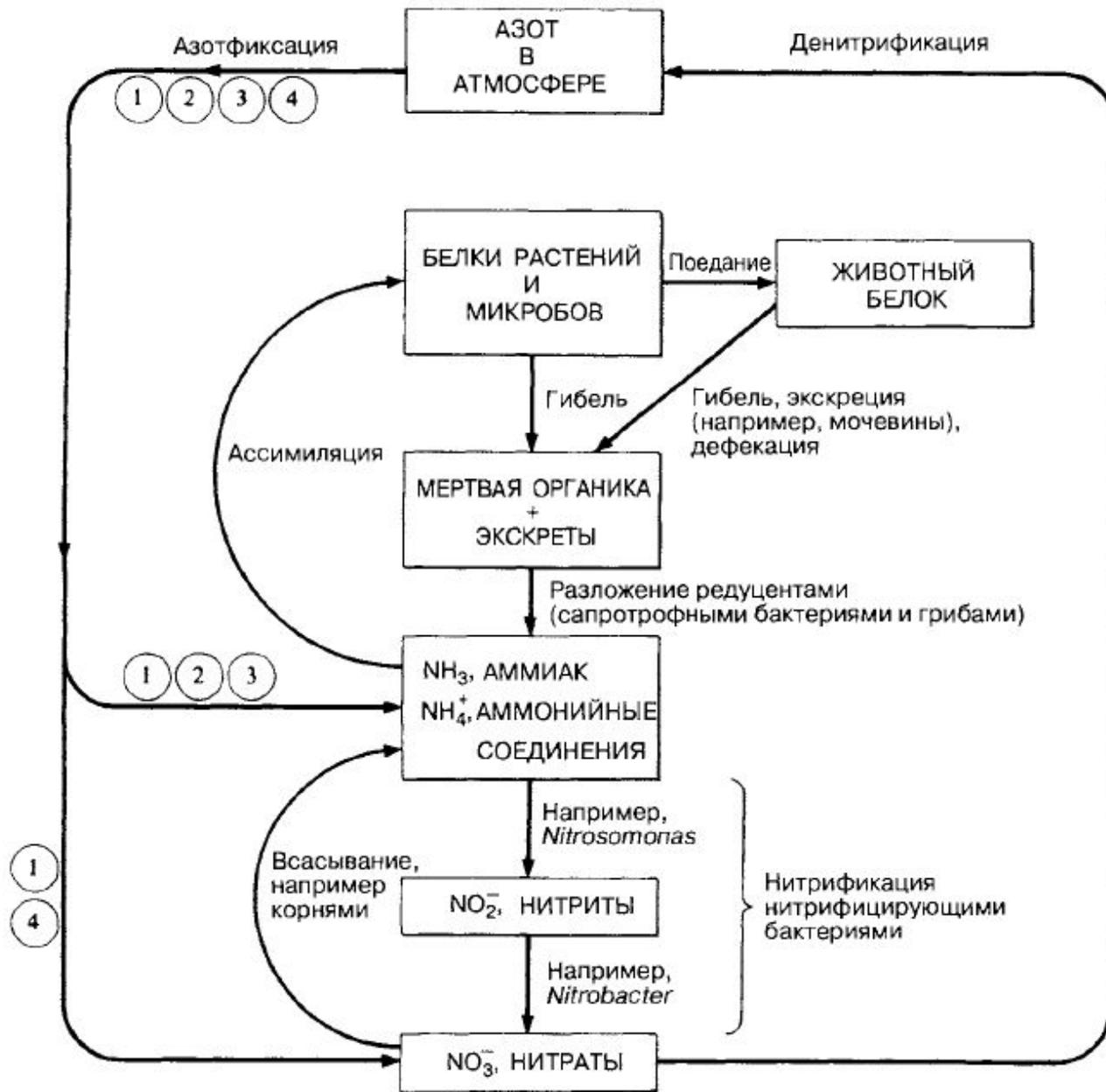
Поэтому круговорот азота целиком поддерживается деятельностью **азотфиксирующих бактерий**.

Аммонифицирующие бактерии, разлагая органическое вещество, переводят азот в аммиачную форму, а продолжающие этот процесс **нитрификаторы** окисляют его до нитритов и нитратов.

Денитрифицирующие бактерии завершают цикл, освобождая азот из нитратов и переводя его вновь в молекулярную форму.



Рис. 2.9. Клубеньковые бактерии рода *Rizobium*



Вещества
→ Процессы с участием организмов

Процессы азотфиксации в порядке убывания их роли:

- 1 промышленная, например метод Габера
- 2 мутуалистическими циано- и другими бактериями, например *Rhizobium* в клубеньках бобовых
- 3 свободноживущими циано- и другими бактериями, например *Azotobacter*, *Clostridium*
- 4 атмосферная — образование оксидов азота при вспышках молний и т. п.

Денитрификация бактериями, например *Thiobacillus denitrificans*, *Pseudomonas denitrificans*

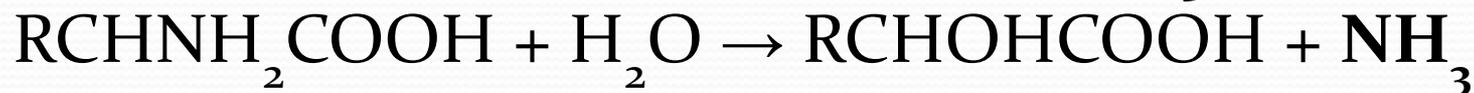
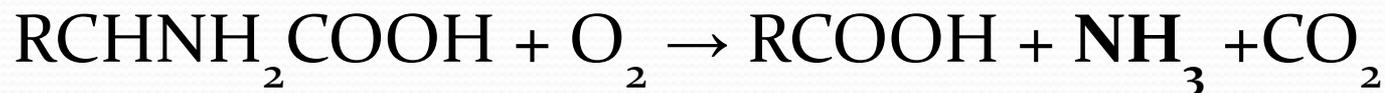
Аммонификация

Аммонификация - разложение, гниение белков с образованием аммиака.



Аммонификация осуществляется редуцентами.

Аминокислоты ($\text{RCHNH}_2\text{COOH}$) разлагаются бактериями, актиномицетами, грибами как в аэробных, так и в анаэробных условиях:

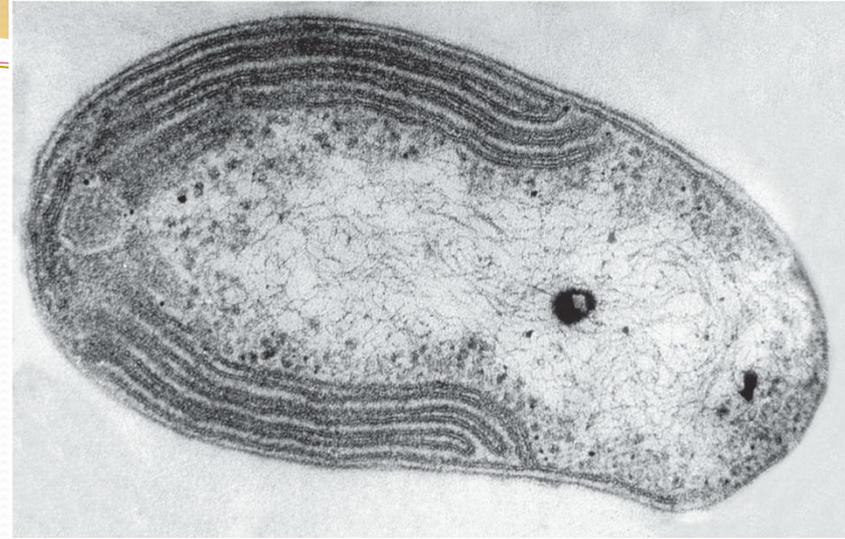


В результате белкового обмена в животных организмах выделяется мочевина $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, которая тоже служит источником NH_3



Нитрификация

- процесс превращения азотосодержащих веществ в форму, пригодную для усвоения высшими растениями:



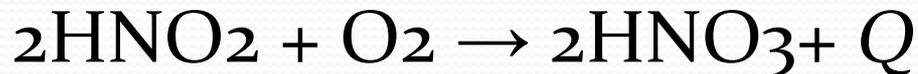
Аммиак - Нитриты – Нитраты

протекает в процессе жизнедеятельности нитрифицирующих бактерий в две фазы.

В первой фазе аммиак окисляется до азотистой кислоты (или нитритов):

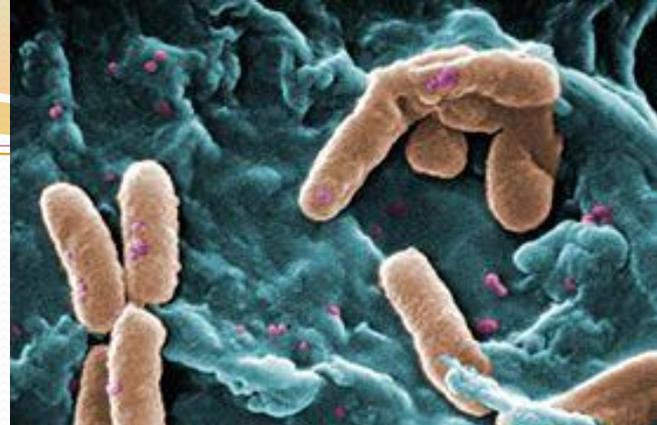


Во второй фазе азотистая кислота окисляется до азотной (или до нитратов):

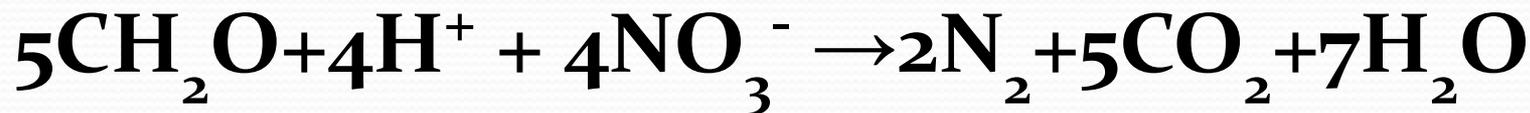


Денитрификация

- разрушение группой почвенных и водных бактерий солей азотной кислоты (нитратов) до нитритов, молекулярного азота и аммиака.



Pseudomonas aeruginosa (синегнойная палочка)





Растения
(восстановление нитратов,
синтез аминокислот)

Ткани и экскременты
животных

Вулканическая
деятельность

Моча

Органические остатки
(аминокислоты)

Аммонификация

Промышленная
фиксация

**Денитри-
фикация**

Азот
атмосферы

Аммиак или аммоний

фиксация при
грозовых
разрядах

Биологическая
фиксация

Нитрификация

Нитраты
в почве

Нитриты

Грунтовые воды

Птицы

Озёра, реки, моря, океаны

Планктон

Рыбы

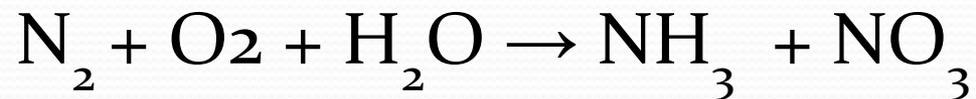
Связывание
глубоководными
осадками



Круговорот азота



Независимый от жизнедеятельности бактерий механизм вовлечения молекулярного азота в биологические циклы — разряды молний, способствующие возникновению аммиака и нитрата.



Однако эти процессы не восполняют потерь при денитрификации.

Потребление азота

происходит:

- в процессе биологической фиксации N_2 из воздуха - азотфиксации благодаря деятельности азотфиксирующих микроорганизмов;
- в результате естественных физических процессов фиксации N_2 в атмосфере и превращения его в оксиды NO_x и NH_3 (при грозовых электрических разрядах);
- при фотосинтезе минеральные соединения азота (NH_4^+ , NO_2 , NO_3) потребляются растениями;
- в процессе промышленного синтеза NH_3 .

Поступление азота происходит:

В атмосферу:

- в процессе минерализации азотсодержащих органических веществ до оксидов азота и последующей денитрификации, т.е. восстановления их до молекулярного газа N_2 ,
- с вулканическими газами,
- с дымом, выхлопными газами.

В водоемы:

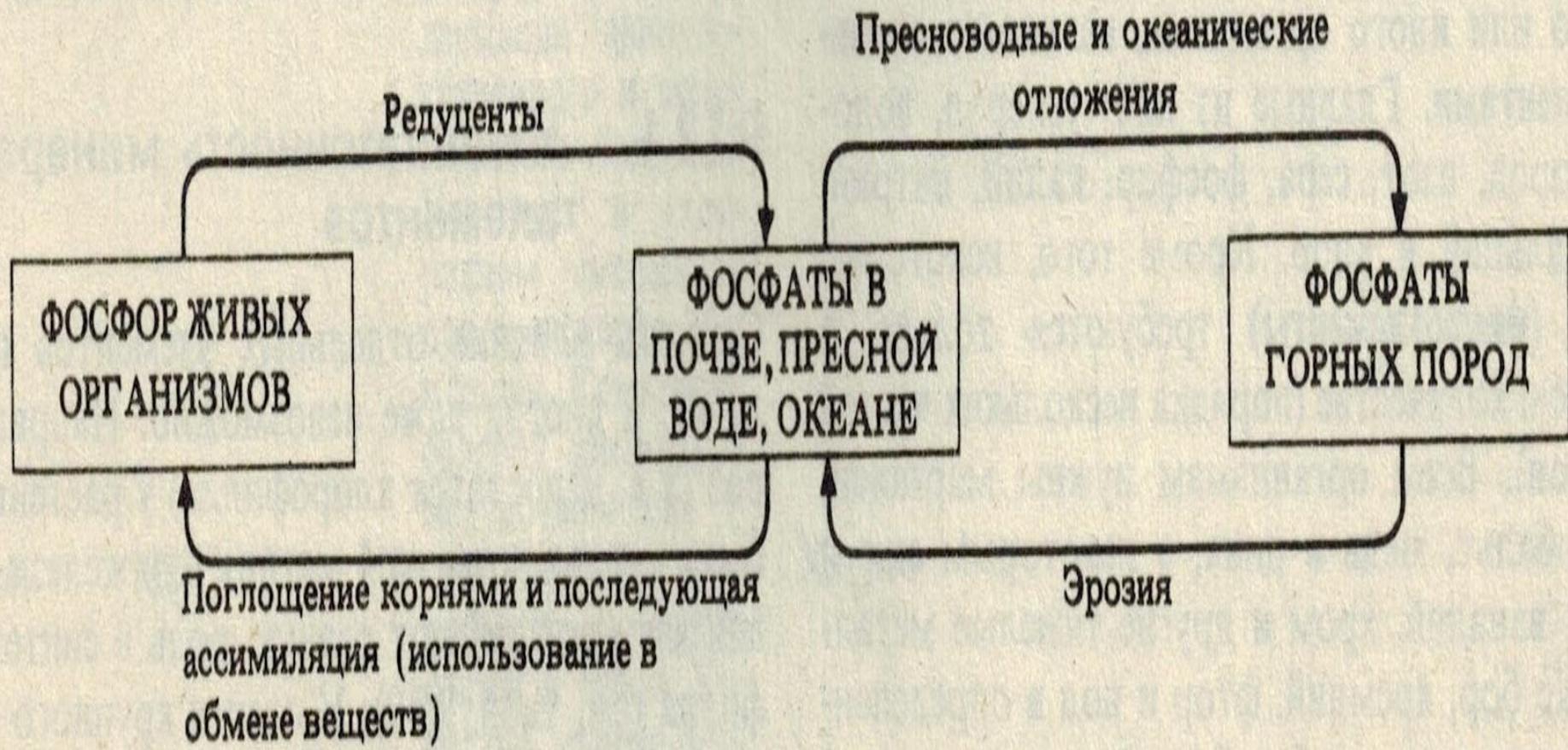
- со стоками с городских и сельских территорий,
- с городскими, промышленными и сельскохозяйственными сточными водами.

Круговорот фосфора

Фосфор – один из основных компонентов живого вещества и входит в состав нуклеиновых кислот (ДНК и РНК), клеточных мембран, аденозинтрифосфата (АТФ) и аденозиндифосфата (АДФ), жиров, костей и зубов.

Круговорот фосфора, как и других биогенных элементов, совершается по большому и малому циклам.





- Особенности биогеохимического цикла фосфора заключается в том, что, в отличие от азота и углекислого газа, резервным фондом его является не атмосфера, а горные породы и отложения, образовавшиеся в прошлые геологические эпохи.
- Фосфор очень медленно перемещается из фосфатных пород на суше к живым организмам и обратно.

- Запасы фосфора, доступные живым существам, полностью сосредоточены в литосфере.
- Основные источники неорганического фосфора – изверженные или осадочные породы. Фосфаты растворимы в воде, но не летучи. В земной коре содержание фосфора не превышает 1%, что лимитирует продуктивность экосистем.

- Из пород земной коры неорганический фосфор вовлекается в циркуляцию континентальными водами. Он поглощается растениями, которые при его участии синтезируют различные органические соединения и, таким образом, включаются в трофические цепи.
- Затем органические фосфаты вместе с трупами, отходами и выделениями живых существ возвращаются в землю, где снова подвергаются воздействию микроорганизмов и превращаются в минеральные формы, употребляемые зелёными растениями.

- В экосистеме океана фосфор приносится текучими водами, что способствует развитию фитопланктона и живых организмов. Одновременно происходит постоянное оседание (седиментация) органических веществ.
- Осевший на небольшой глубине органический фосфор возвращается в круговорот.
- Фосфаты, отложенные на больших морских глубинах не участвуют в малом круговороте. Однако тектонические движения способствуют подъёму осадочных пород к поверхности.

- В наземных системах круговорот фосфора проходит в оптимальных естественных условиях с минимумом потерь.
- По пищевым цепям фосфор переходит от растений ко всем прочим организмам экосистемы. При каждом переходе велика вероятность окисления содержащего фосфор соединения в процессе клеточного дыхания для получения организмом энергии.
- Когда это происходит, фосфат в составе мочи или ее аналога вновь поступает в окружающую среду, после чего снова может поглощаться растениями и начинать новый цикл.

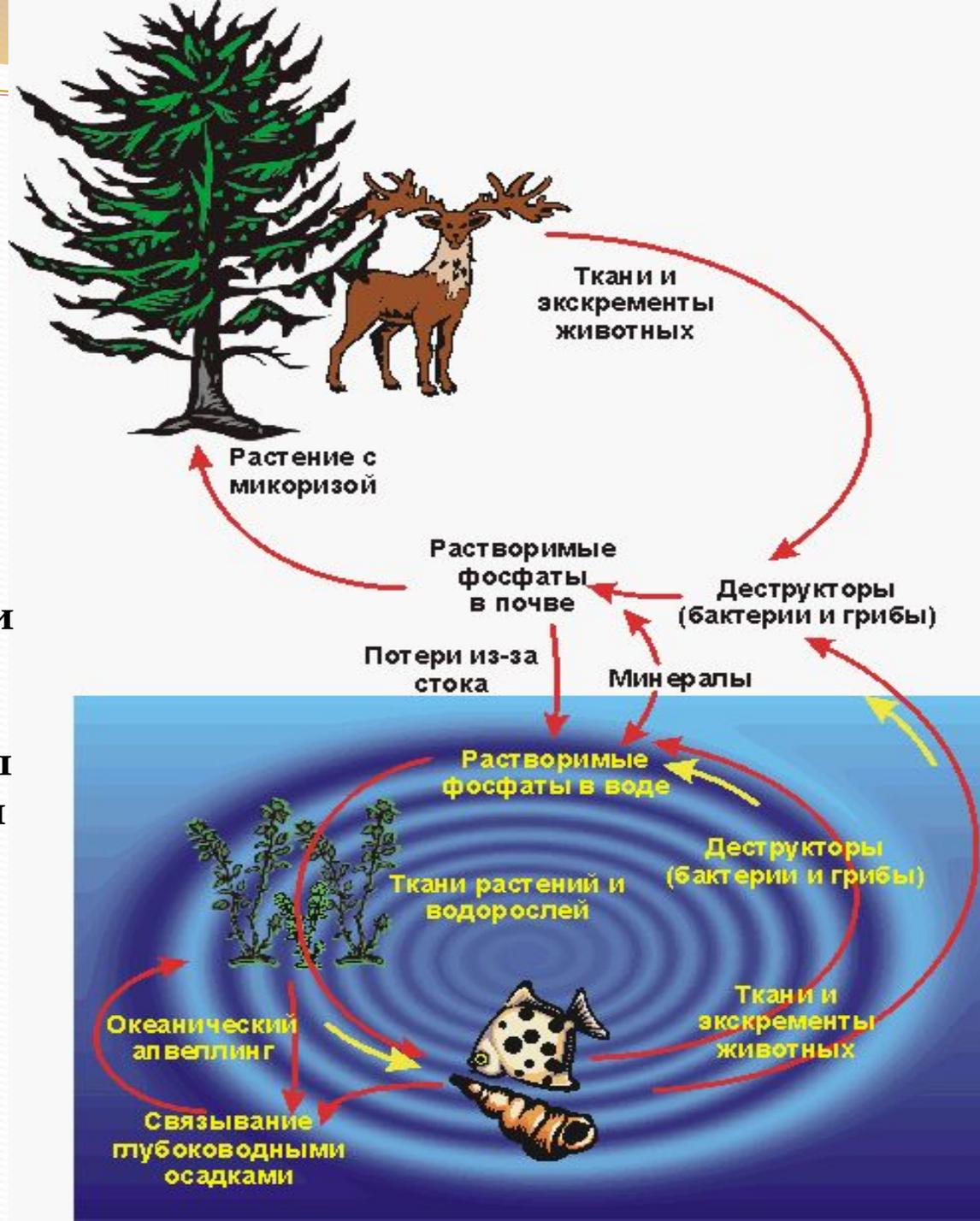
- Попадая в водоемы, фосфор насыщает, а иногда и перенасыщает экосистемы.
- Что-то может вернуться на сушу с помощью рыбоядных птиц, но это очень небольшая часть общего количества, оказывающаяся к тому же вблизи побережья.
- Океанические отложения фосфата со временем поднимаются над поверхностью воды в результате геологических процессов, но это происходит в течение миллионов лет.
- фосфаты циркулируют в экосистеме лишь в том случае, если содержащие их "отходы" жизнедеятельности откладываются в местах поглощения данного элемента. В естественных экосистемах так в основном и происходит.

- Фосфор концентрируется живым веществом, где его содержание примерно в 10 раз больше, чем в земной коре.
- Вследствие легкой окисляемости фосфор в свободном состоянии в природе не встречается.
- Из природных соединений фосфора самым важным является ортофосфат кальция $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, который в виде минерала фосфорита иногда образует большие залежи.
- В растениях фосфор содержится главным образом в белках семян, в животных организмах - в белках молока, крови, мозговой и нервной тканей.

- Организмы усваивают фосфор из почв, водных растворов.
- Деятельность человека в настоящее время направлена на увеличение содержания фосфора в окружающей среде (фосфатизация суши).
- Она происходит за счёт вылова продуктов моря, богатых фосфором, и главным образом в результате извлечения фосфора для производства фосфорных удобрений, различных фосфорсодержащих препаратов.

Круговорот фосфора

Микориза - симбиотическое обитание грибов на корнях и в тканях корней высших растений. В микоризе гриб получает от корней углеводы и снабжает растение водой и минеральными элементами питания/



Потребляется фосфор:

- растениями и животными для построения белков протоплазмы ,
- в промышленном производстве удобрений, моющих средств и рыбопродуктов.

Поступление фосфора в биотический круговорот происходит:

- в процессе эрозии фосфатных пород ,
- вследствие минерализации продуктов жизнедеятельности и органических остатков растений и животных.

Источники поступления фосфора в океаны

- бытовые сточные воды, обогащенные фосфорсодержащими моющими средствами;
- промышленные сточные воды от предприятий, производящих удобрения;
- поверхностный сток с сельскохозяйственных угодий;
- после биологической очистки сточные воды обогащаются минеральным фосфором вследствие интенсификации минерализации органических веществ на очистных сооружениях.

- Образующиеся при минерализации органических веществ фосфаты поступают с отходами и сточными водами в наземные и водные экосистемы, где вновь могут потребляться растениями в процессе фотосинтеза.
- Вынос фосфатов на сушу осуществляется в основном с рыбой. Но это не компенсирует их поток с суши в море.
- Механизмы возвращения фосфора в круговорот в природе недостаточно эффективны и не возмещают той его части, которая захоранивается в осадках.

- Добывается ежегодно около 2 млн. т фосфорсодержащих пород.
- Большая часть этого фосфора попадает в море с *моющими средствами*, в производстве которых он используется, и с *удобрениями*, т. е. выключается из круговорота.
- **Деятельность человека приводит к потерям фосфора из круговорота: избыточное поступление в водоемы из антропогенных источников и последующее захоронение в глубоководных океанических осадках.**

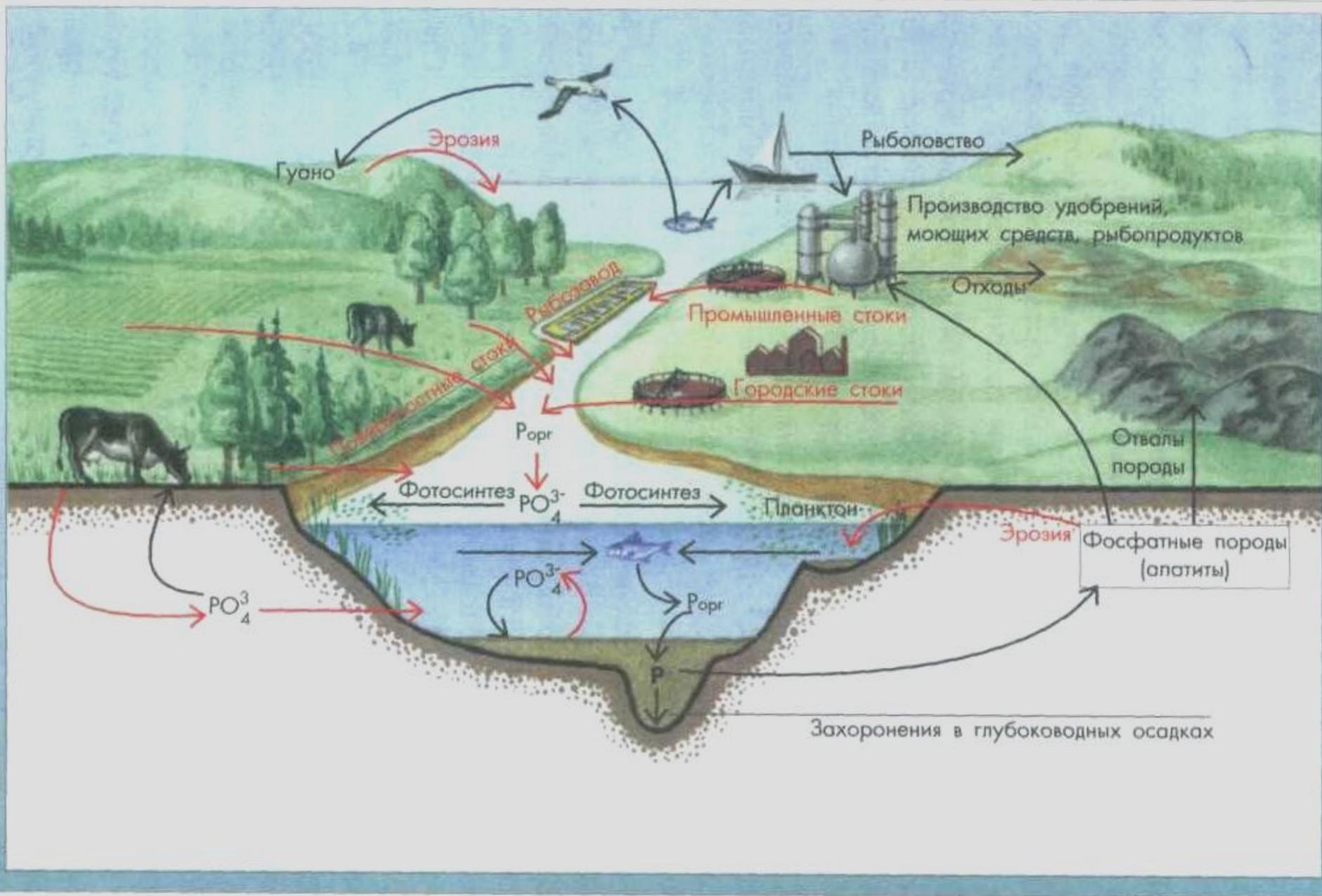


Рис. 4.7. Биотический круговорот фосфора: \rightarrow - потребление фосфора; \rightarrow - поступление фосфора