

Биогеоценология.
*Роль микроорганизмов в
превращении веществ в природе*

Лекция №13
по дисциплине «Экология микроорганизмов»

План лекции

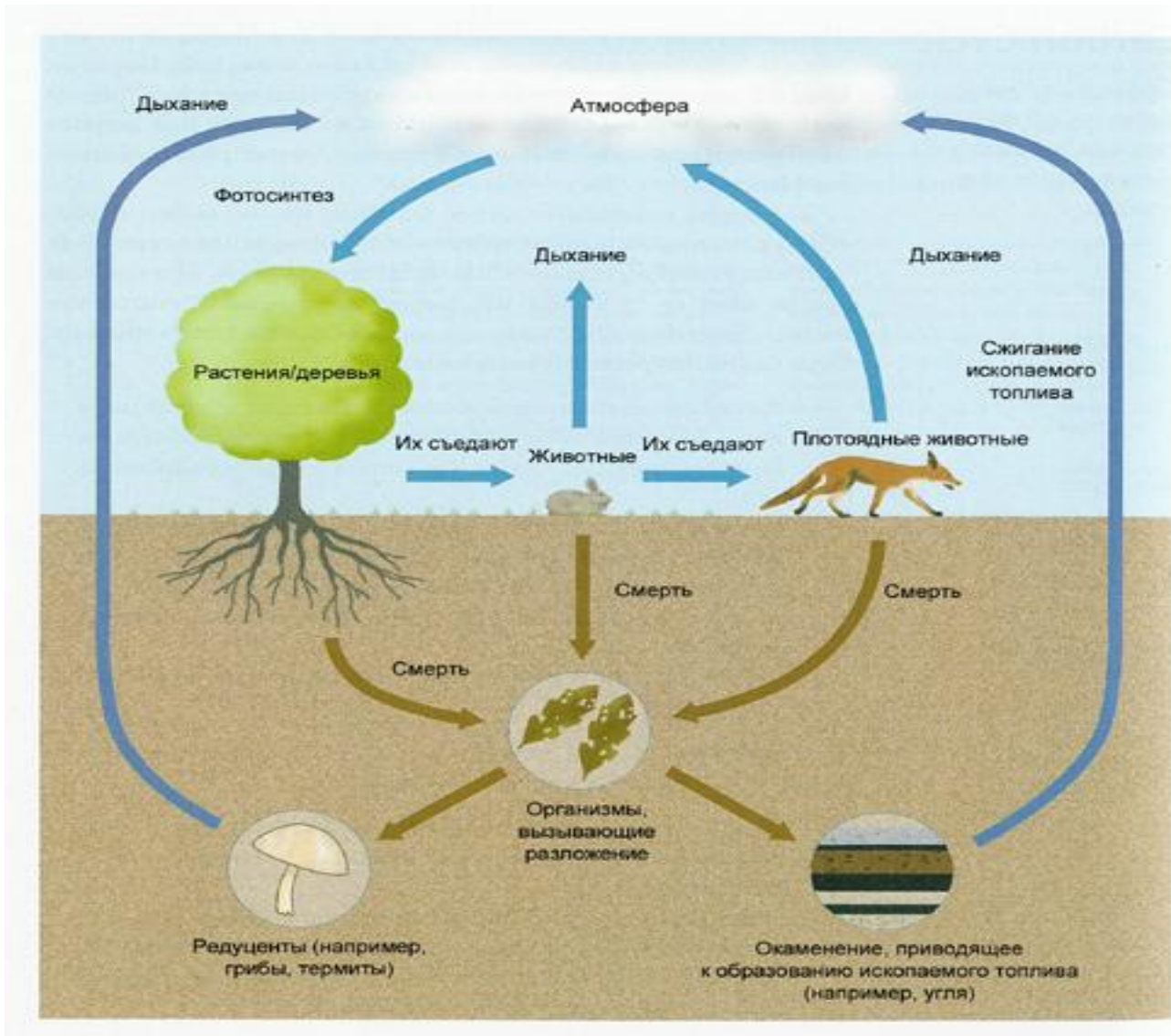
- Роль микроорганизмов в биосфере
- Круговорот углерода, кислорода, азота, фосфора и серы в экосистемах
- Геологическая деятельность бактерий

Круговорот веществ

Микроорганизмы постоянно осуществляют два противоположных процесса:

- синтез из минеральных веществ сложных органических соединений
- разложение органических веществ до минеральных

Единство этих противоположных процессов лежит в основе биологической роли микроорганизмов в круговороте веществ в природе.



Круговорот углерода

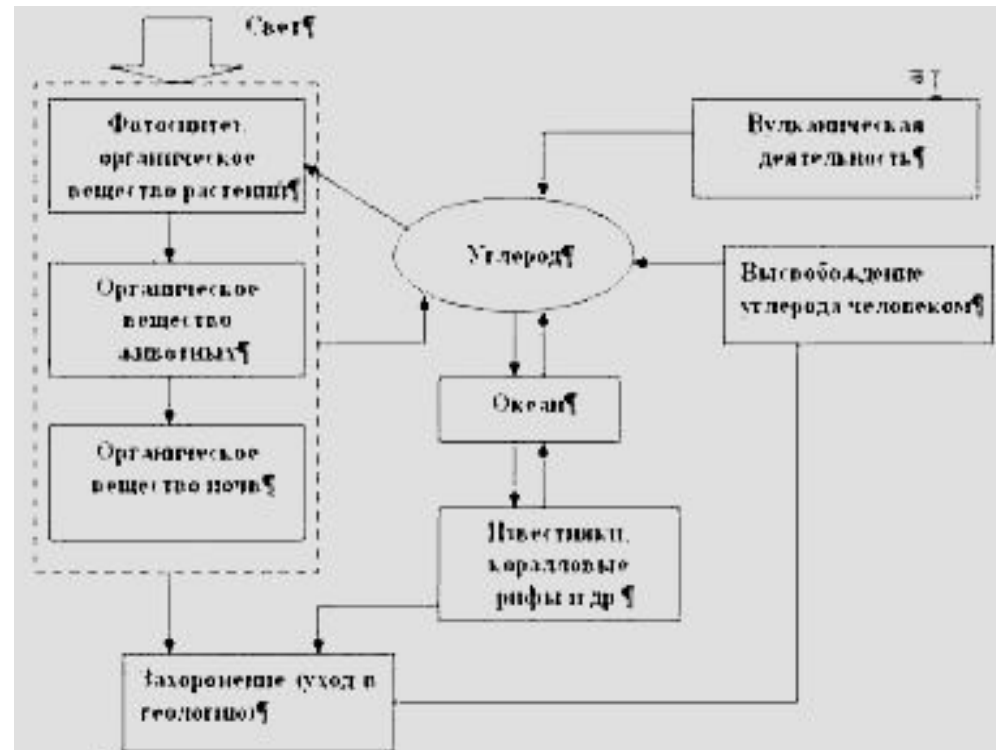
Важнейшим органогеном, входящим в состав микробов, растений, животных, является углерод.

Вся земная жизнь основана на углероде. Каждая молекула живого организма построена на основе углеродного скелета. Атомы углерода постоянно мигрируют из одной части биосферы в другую.

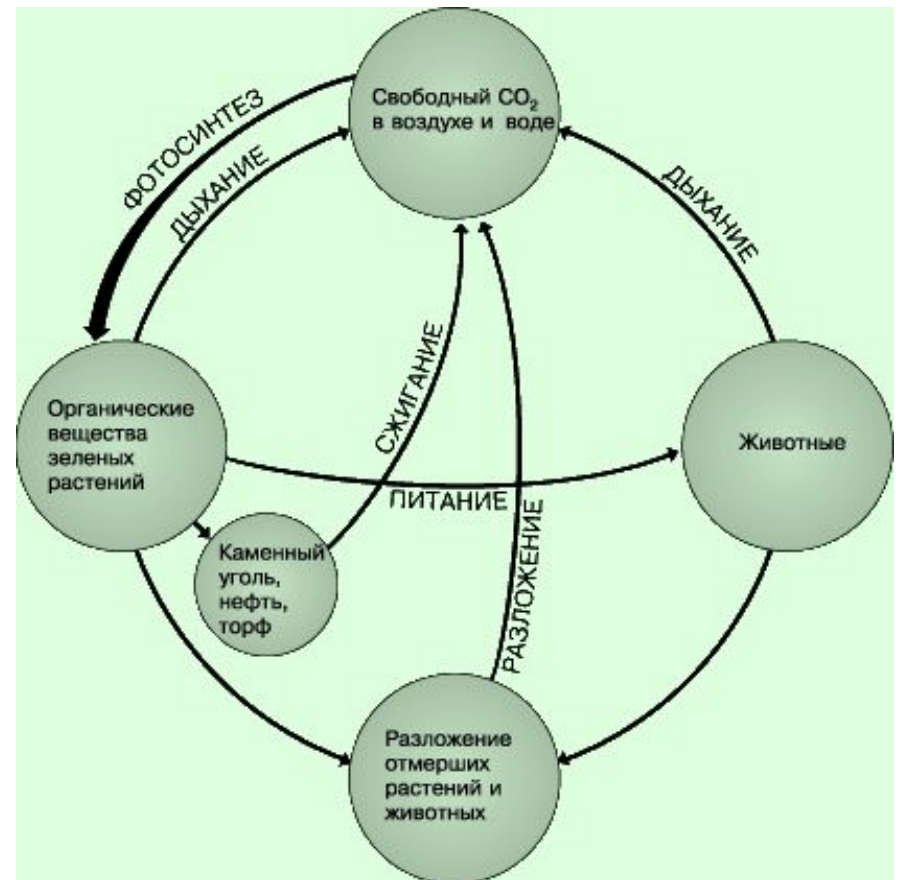
На примере круговорота углерода в природе можно проследить в динамике картину жизни на нашей планете.

Сотни миллионов лет назад значительная часть фотосинтезируемого органического вещества накапливалась и постепенно погребалась под различными минеральными осадками.

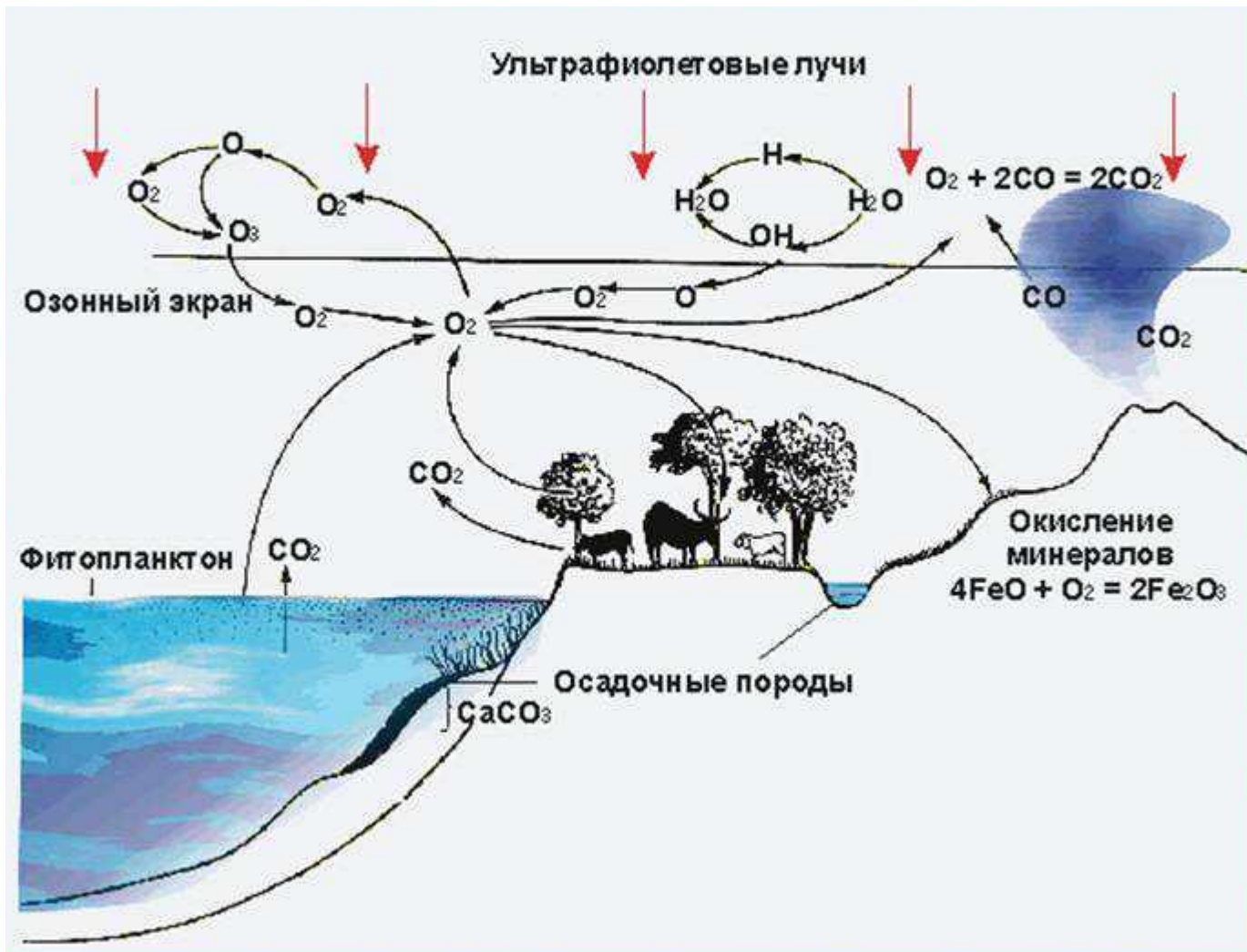
Находясь в породах миллионы лет, этот детрит превращался в нефть, природный газ и уголь. Добывая и сжигая это ископаемое топливо для обеспечения потребностей в энергии, в определенном смысле мы завершаем круговорот углерода.



- Углерод в биосфере часто представлен наиболее подвижной формой - **углекислым газом**. Источником первичной углекислоты биосферы является вулканическая деятельность. Миграция CO_2 в биосфере Земли протекает двумя путями.
- **Первый путь** заключается в поглощении его в процессе фотосинтеза с образованием органических веществ и в последующем захоронении их в литосфере в виде торфа, угля, горных сланцев, рассеянной органики, осадочных горных пород.
- Усвоение углерода с использованием солнечной энергии называется **фотосинтезом**, а с использованием химической энергии — **химиосинтезом**.
- Основной процесс, возвращающий углекислоту в атмосферу, — разложение органических соединений под влиянием микроорганизмов. Этот процесс разложения органических безазотистых соединений называется **брожением**. В природе существует много типов брожений, вызываемых определенными видами микробов.
- **По второму пути миграция углерода** осуществляется созданием карбонатной системы в различных водоемах, где CO_2 переходит в H_2CO_3 , HCO_3^{1-} , CO_3^{2-} . Затем с помощью растворенного в воде кальция (реже магния) происходит осаждение карбонатов биогенным и абиогенным путями. Возникают мощные толщи известняков.

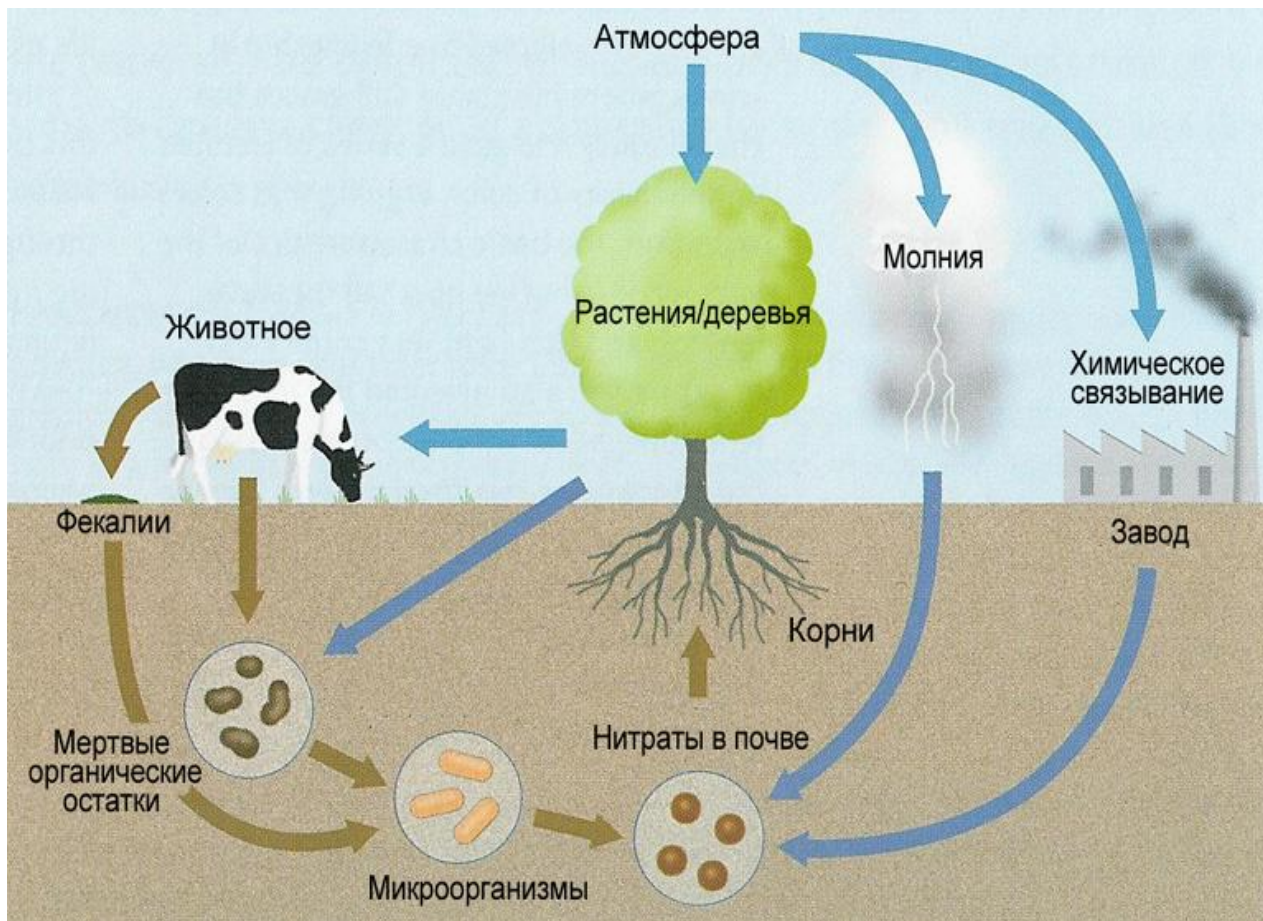


- Особое место в современном круговороте веществ занимает массовое сжигание органических веществ и постепенное возрастание содержания углекислого газа в атмосфере, связанное с ростом промышленного производства и транспорта.
- **Метан** образуется совместно бактериями-бродильщиками и метаногенными организмами.
- **Монооксид углерода** образуется при горении древесины, промышленном окислении не содержащих метан углеводородов, ряде других производственных процессов и работе транспорта, а также в результате окисления атмосферного метана.
Биологический источник образования CO — растения, высвобождающие CO при фотодыхании или фотоокислении компонентов своих клеток.



Круговорот кислорода

- Кислород - наиболее активный газ.
- В пределах биосферы происходит быстрый обмен кислорода среды с живыми организмами или их остатками после гибели.
- В составе земной атмосферы кислород занимает второе место после азота. Господствующей формой нахождения кислорода в атмосфере является молекула O_2 .
- Круговорот кислорода в биосфере весьма сложен, поскольку он вступает во множество химических соединений минерального и органического миров.
- Свободный кислород современной земной атмосферы является побочным продуктом процесса фотосинтеза зеленых растений и его общее количество отражает баланс между продуцированием кислорода и процессами окисления и гниения различных веществ. В истории биосферы Земли наступило такое время, когда количество свободного кислорода достигло определенного уровня и оказалось сбалансированным таким образом, что количество выделяемого кислорода стало равным количеству поглощаемого кислорода.

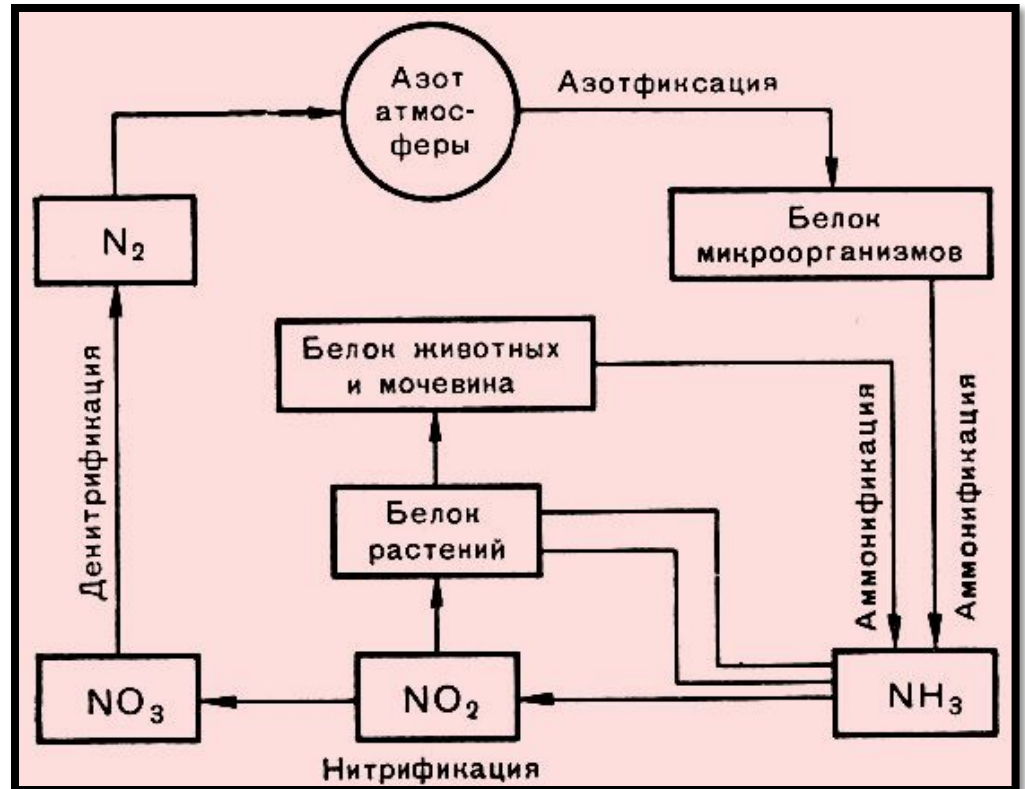


Круговорот азота

*Азот — одно из самых распространенных веществ в биосфере,
Почти 80% воздуха состоит в виде свободной формы азота — N₂.*

Живые организмы не способны напрямую использовать молекулярный азот — его сначала необходимо перевести в «связанное» состояние. В процессе связывания молекулы азота расщепляются, давая возможность отдельным атомам азота участвовать в химических реакциях с другими атомами, например с кислородом, и таким образом мешая им вновь объединиться в молекулу азота. Связь между атомами азота и другими атомами достаточно слабая, что позволяет живым организмам усваивать атомы азота.

В круговороте азота в природе с участием микроорганизмов различают следующие этапы: усвоение атмосферного азота, аммонификацию, нитрификацию, денитрификацию.



- **Усвоение азота из атмосферного воздуха азотфиксирующими бактериями.** Среди микробов, усваивающих атмосферный азот, различают две группы — свободноживущих и клубеньковых.
Свободноживущие азотфиксаторы (*Azotobacter chroococcum*, *Cl. Pasteurianum*) живут и фиксируют азот в почве независимо от растений. *Клубеньковые бактерии* (род *Rhizobium*) — активные фиксаторы атмосферного азота в симбиозе с бобовыми растениями.
- На использовании клубеньковых бактерий основан традиционный метод повышения плодородия почвы: на поле сначала выращивают горох или другие бобовые культуры, потом их запахивают в землю, и накопленный в их клубеньках связанный азот переходит в почву. Затем поле засевают другими культурами, которые этот азот уже могут использовать для своего роста.
- Различные микроорганизмы извлекают азот из разлагающихся материалов и переводят его в молекулы, необходимые им для обмена веществ. При этом оставшийся азот высвобождается в виде аммиака (NH_3) или ионов аммония (NH_4^+). Затем другие микроорганизмы связывают этот азот, переводя его обычно в форму нитратов (NO_3^-). Поступая в растения (и в конечном счете попадая в организмы живых существ), этот азот участвует в образовании биологических молекул. После гибели организма азот возвращается в почву, и цикл начинается снова. Во время этого цикла возможны как потери азота — когда он включается в состав отложений или высвобождается в процессе жизнедеятельности некоторых бактерий (так называемых денитрифицирующих бактерий), — так и компенсация этих потерь за счет извержения вулканов и других видов геологической активности.
- Некоторое количество азота переводится в связанное состояние во время грозы. Электрический разряд нагревает атмосферу вокруг себя, азот соединяется с кислородом (происходит реакция горения) с образованием различных оксидов азота. Более того, при сгорании ископаемого топлива в электрогенераторах и в двигателях внутреннего сгорания происходит разогрев воздуха, как и в случае с разрядом молнии. Азот связывается и при сжигании природного топлива.
- Больше всего связанного азота человек производит в виде минеральных удобрений.
- Каждая экосистема способна усвоить определенное количество азота, и последствия этого в целом благоприятны — растения станут расти быстрее. Однако при насыщении экосистемы азот начнет вымываться в реки. **Эвтрофикация** (загрязнение водоемов водорослями) озер происходит следующим образом: азот удобряет озерные водоросли, и они разрастаются, вытесняя все другие формы жизни в этом озере, поскольку, когда водоросли погибают, на их разложение расходуется почти весь растворенный в воде кислород.

- **Аммонификация** - это минерализация азотсодержащих органических веществ, протекающая под воздействием аммонифицирующих микробов, выделяющих протеолитические ферменты. Благодаря аммонификации представителей растительного и животного мира и их продуктов жизнедеятельности (мочевины, испражнений) почва обогащается азотом и другими соединениями. Одновременно с этим аммонифицирующие микробы выполняют огромную санитарную роль, очищая почву и гидросферу от разлагающегося органического субстрата. Основными представителями широко распространенных в природе аммонифицирующих микробов являются следующие: *Bac. probatus* и *Sporosarcina ureae*; спорообразующие аэробы — это *Bac. mesentericus* (картофельная бактерия), *Bac. megatherium* (капустная бактерия), *Bac. subtilis* (сенная палочка), *Bac. mycoides* (грибовидная бацилла); не образующие спор аэробные аммонификаторы - *E. coli*, *Proteus vulgaris*, *Ps. Fluorescens*; анаэробные спорообразующие аммонификаторы - *Cl. putrificum* (газообразующая клостридия), *Cl. sporogenes*. Аммонификацию вызывают также актиномицеты, грибы, триходермы, живущие в почве.
- **Нитрификация** — следующий за аммонификацией этап превращения азота микроорганизмами. Этот процесс представляет собой окисление аммиака, образующегося при разложении органических азотсодержащих соединений.
- **Денитрификация**, протекающая под воздействием микробов, представляет собой восстановление нитратов с образованием в качестве конечного продукта — молекулярного азота, возвращающегося из почвы в атмосферу. Вызывается этот процесс денитрифицирующими бактериями. Наиболее распространенные из них в природе: *Tiobacillus denitrificans* — палочка, не образующая спор, факультативный анаэроб; *Ps. fluorescens* — подвижная палочка, выделяет зеленоватый пигмент, быстро разлагает нитраты; *Ps. aeruginosa* — бактерия сходна с предыдущей; *Ps. stutzeri* — небольшая палочка, образующая цепочки, разлагает нитраты в анаэробных условиях.



Круговорот фосфора

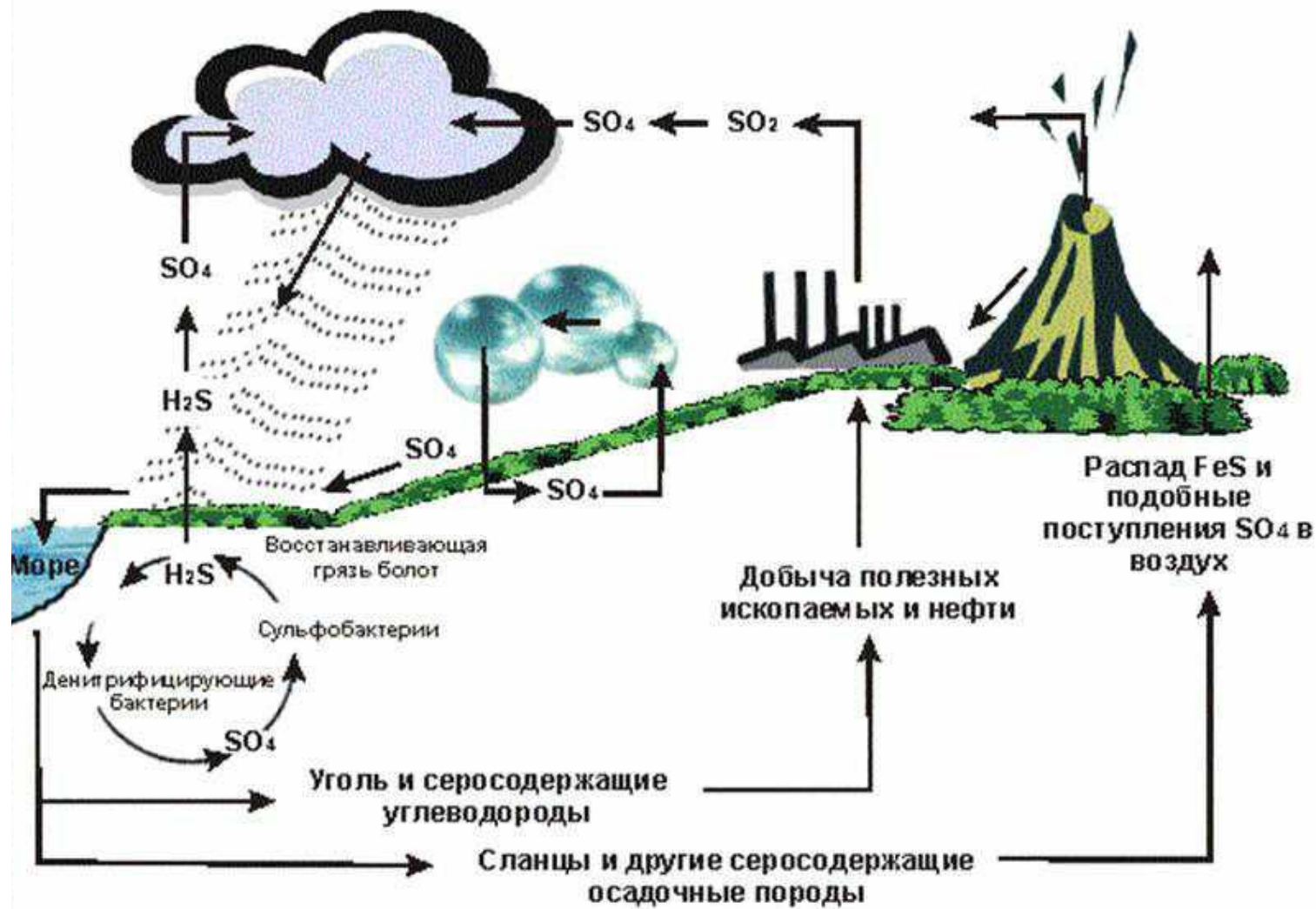
Фосфор входит в состав белков, липидов, молекул, переносящих энергию внутрь клеток. Особенно много его в ядрах клеток, головном мозге человека и животных.

В отличие, например, от углекислого газа, у фосфора нет газовой фазы и, следовательно, нет свободного возврата в атмосферу. Попадая в водоемы, фосфор насыщает, а иногда и перенасыщает экосистемы. Океанические отложения фосфата со временем поднимаются над поверхностью воды в результате геологических процессов, но это происходит в течение миллионов лет.

Следовательно, фосфат и другие минеральные биогены почвы циркулируют в экосистеме лишь в том случае, если содержащие их отходы жизнедеятельности откладываются в местах поглощения данного элемента.



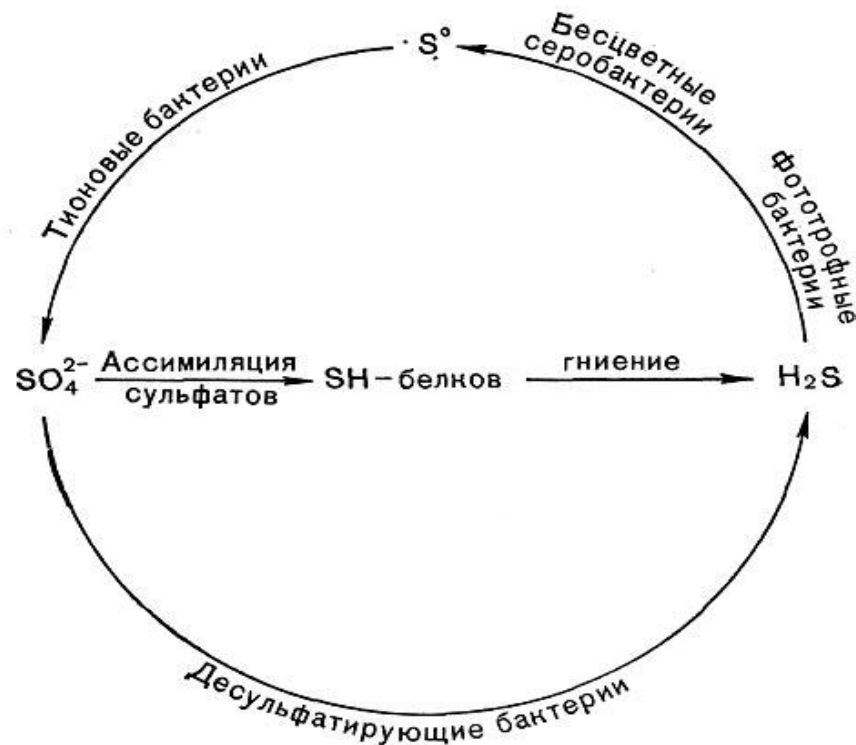
- В различных минералах фосфор содержится в виде **неорганического фосфатона** (PO₄³⁻). Фосфаты растворимы в воде, но не летучи. Растения поглощают PO₄³⁻ из водного раствора и включают фосфор в состав различных органических соединений, где он выступает в форме так называемого **органического фосфата**. 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.
- Микроорганизмы, участвующие в превращении фосфора, живут в почве, воде. Их роль сводится к двум процессам: минерализации фосфора, входящего в состав органических веществ, и превращению фосфорнокислых солей из слабо растворимых в хорошо растворимые.
- **Минерализацию фосфора** вызывают гнилостные бактерии, в частности *Bac. megatherium*. Образующаяся при этом фосфорная кислота связывается со щелочами почвы и превращается в слабо растворимые соли кальция, железа, магния и, следовательно, малодоступные для растений.
- В дальнейшем под действием почвенных кислотообразующих бактерий, особенно нитрифицирующих, эти соли превращаются в **растворимые соединения фосфорной кислоты**, доступные для растений.

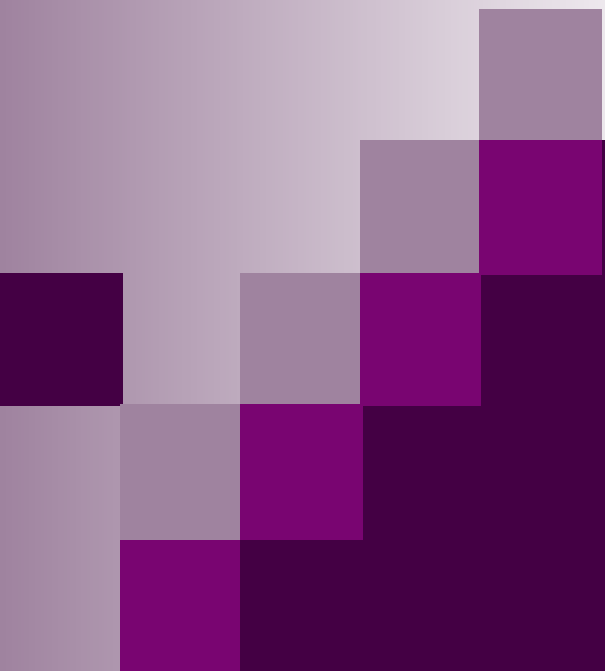


Круговорот серы

- Сера является важным составным элементом живого вещества. Большая часть ее в живых организмах находится в виде органических соединений.
- Кроме того, сера входит в состав некоторых биологически активных веществ: витаминов, а также ряда веществ, выступающих в качестве катализаторов окислительно-восстановительных процессов в организме и активизирующих некоторые ферменты.
- Сера представляет собой исключительно активный химический элемент биосферы и мигрирует в разных валентных состояниях в зависимости от окислительно-восстановительных условий среды.
- В связи с окислением сульфидных минералов в процессе выветривания сера в виде сульфатиона переносится природными водами в Мировой океан. Сера поглощается морскими организмами, которые богаче ее неорганическими соединениями, чем пресноводные и наземные.
- В атмосфере также присутствуют соединения серы, главным образом карбонилсульфид, сульфат (в основном в аэрозолях, морских брызгах), диоксид серы, диметилсульфид и сероводород.
- Бактерии, усваивающие соединения серы, называют **серобактериями**. При разложении в почве органических серосодержащих веществ, а также при восстановлении солей серной, сернистой и серноватистой кислот образуется сероводород, ядовитый для растений и животных. Этот газ превращается в безвредные, доступные для растений соединения серобактериями.
- Биогенной теории образования серы придерживался В. И. Вернадский, указывая, что накопление серы происходит в местах, где обитают серобактерии. Более полно гипотеза была разработана Б. Л. Исаченко. Было показано, что в результате деятельности сульфатредуцирующих и тионовых бактерий типа *Thiobacillus thioparus* процесс образования самородной серы происходит и сейчас.

- **Сульфаты** восстанавливаются до сероводорода в процессе диссимиляционной сульфатредукции бактериями родов *Desulfovibrio*, *Archaeoglobus* и др. или в процессе ассимиляционной сульфатредукции растениями и микроорганизмами.
- **Молекулярная сера** может также восстанавливаться до H_2S бактериями, осуществляющими диссимиляционное восстановление серы (*Desulfuromonas* spp., *Wolinella* spp., *Pyrodictium* spp. и *Thermoproteus* spp.).
- Аэробные серные бактерии (*Thiobacillus* spp., *Beggiatoa* spp.) окисляют **сероводород** до сульфата с использованием O_2 как акцептора электронов.
- Некоторые представители этой группы (*Thiobacillus denitrificans*, *Thioploca* spp.) могут сочетать окисление серы с восстановлением нитрата.





*Роль микроорганизмов в
преобразовании полезных
ископаемых*

Геологическая деятельность бактерий

- Бактерии способны осуществлять процессы, приводящие к разрушению или образованию месторождений полезных ископаемых, минералов и горных пород, а также к миграции отдельных элементов. Изучение этих процессов важно для наших теоретических представлений о круговороте элементов на Земле. Кроме того, многие микробиологические процессы имеют значение для добычи полезных ископаемых.
- На большую роль микроорганизмов в перемещении, концентрации и рассеянии химических элементов в биосфере указывал В.И.Вернадский.
- Благодаря трудам С. И. Виноградского, М. Бейеринка, А. Клюйвера, Ван-Ниля, Б.Л.Исаченко была выяснена роль бактерий в круговороте азота, серы и некоторых других элементов.



Роль бактерий в преобразовании нефти

- В настоящее время существуют две теории о происхождении нефти — органическая и минеральная. В этом процессе участвуют и микроорганизмы.
- Сульфатредуцирующие бактерии, используя органические вещества нефти, предварительно преобразованные аэробной микрофлорой, образуют сероводород, который, реагируя с кальцием, образует CaS , затем в результате реакции с угольной кислотой образуется вторичный кальцит. Вторичный кальцит **запечатывает нефтяную залежь**. Микрофлора в запечатанной залежи очень бедна или вообще отсутствует, и в таком виде нефтяная залежь не подвергается воздействию микроорганизмов.
- При контакте нефти с пластовыми водами начинается процесс **разрушения ее микроорганизмами**. Особенно энергично этот процесс протекает при закачке воды в пласт, когда нарушаются анаэробные условия. В первую очередь распаду подвергаются более легкие фракции нефти. Распад нефти часто сопровождается выделением горючих газов. При длительной эксплуатации месторождения процессы окисления нефти усиливаются, так как количество бактерий в пластовых водах увеличивается. Особенно интенсивное образование сероводорода происходит при закачке в нефтяной пласт богатой сульфатами морской воды. Большие количества сероводорода вызывают **коррозию нефтяного оборудования**.
- Вторичная отдача нефти может быть увеличена за счет **выделения бактериями кислот** (в частности, уголекислоты), которые увеличивают поры известняковых коллекторов за счет образования газов. Газы, растворяясь в нефти, увеличивают ее **подвижность**. Таким образом, бактерии принимают активное участие в окислении и преобразовании нефтяных и газовых месторождений.
- Для уничтожения сульфатредуцирующих бактерий была проведена закачка в пласт формалина, которая дала положительные результаты. Подобные опыты говорят о возможности вмешательства человека в деятельность микроорганизмов и возможности регулирования микробиологических процессов в природе.
- Изучение распространения метан- и пропанокисляющих бактерий было положено Г. А. М о г и л е в с к и м в основу микробиологического метода поиска нефти и газа.



Роль бактерий в образовании торфа и угля

- **Торф** — горючее полезное ископаемое, образующееся в процессе естественного отмирания и неполного распада болотных растений в условиях избыточного увлажнения и затруднённого доступа воздуха. От почвенных образований торф принято отличать по содержанию в нём органических соединений (не менее 50% по отношению к абсолютно сухой массе).
- По данным микробиологических анализов торфа, в поверхностном слое число бактерий достигает 700 млн. в 1 г сырого торфа, на глубине 25—50 см — до 25 млн.
- Хорошая аэрация, наличие доступных органических веществ и высокая температура способствуют быстрому превращению растительного материала в торф. Высокое содержание лигнина и гуминовых кислот характерно как для торфа, так и для бурых и каменных углей. Для торфа исходным материалом являются мхи и другая болотная растительность, для бурых углей — остатки болотного кипариса и родственных ему пород. Основное образование каменных углей происходило в каменноугольном и пермском периодах, когда господствовали папоротникообразные растения.
- Согласно В. О. Таусону, образование углей и торфа происходит в две стадии.
- Первая стадия — период быстрого разложения нестойких веществ растительных остатков и накопление устойчивых соединений типа лигнина, кутина и др. — проходит под действием микроорганизмов. Вторая — период медленного превращения этих соединений в еще более стойкие продукты, например превращение легкорастворимых в щелочах гуминовых кислот в совершенно нерастворимые вещества каменных углей. Вторая фаза проходит в анаэробных условиях. В формировании каменных углей в этот период микроорганизмы участия не принимают.



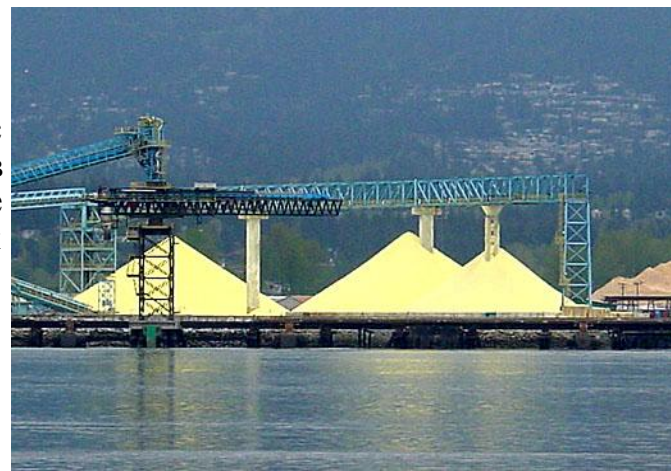
Роль бактерий в преобразовании серы

- Биогенной теории образования серы придерживался В. И. Вернадский, указывая, что накопление серы происходит в местах, где обитают серобактерии. Более полно гипотеза биогенного образования месторождений серы была разработана Б. Л. Исаченко. Исследования М. В. Иванова, проведенные в Шор-Су, подтвердили предположение, что процесс образования серы в этом месторождении продолжается и сейчас в результате деятельности сульфатредуцирующих и тионовых бактерий типа *Thiobacillus thioparus*. Процесс образования самородной серы происходит условиях постоянного подтока сероводородных вод.

- Изучение распространения тионовых бактерий, их физиологии и лабораторные опыты по окислению серной руды показали, что процесс окисления ведут две группы бактерий. При залегании месторождения в карбонатах окисление серной руды начинает *Th. thioparus*, некоторые расы которой имеют оптимальный pH 9,0. Их деятельность приводит к образованию серной кислоты и снижению pH до 4. Такая реакция среды благоприятна для развития *Th. thiooxidans*.

- Окислительная деятельность тионовых бактерий на серных месторождениях приносит большой вред — сотни и тысячи тонн руды становятся непригодными для дальнейшего обогащения на фабриках. При разработке серных месторождений нужно постепенно понижать уровень сероводородных вод, не обнажая на долгое время серусодержащие породы.

- Микробиологические процессы окисления протекают и на складах руды. Они сопровождаются разогревом руды, что, в свою очередь, ускоряет химическое и биологическое окисление. Поэтому долгое хранение на складах ухудшает качество руды, затрудняет ее выплавку. Быстрая переработка руды — один из способов уменьшения потерь от микробиологического окисления серы.



Бактериальное выщелачивание руд

- Способность *Th. ferrooxidans* окислять сульфиды нашла практическое применение для бактериального выщелачивания бедных руд. В настоящее время этот процесс используется в основном для обогащения медных руд с настолько низким содержанием меди, что их неэкономично обрабатывать обычным способом. Роль бактерий в этом процессе была выяснена недавно. В 1958 г. одной американской фирмой был запатентован способ бактериальной регенерации серноокислого окисного железа, выщелачивания меди и цинка из бедных руд, а также метод биологического обогащения молибденовых, железохромовых и железотитановых концентратов путем освобождения их от железа.
- В настоящее время во многих странах микроорганизмы применяются для промышленного получения меди, урана и других металлов.
- Бактериальное выщелачивание руд делится на кучное и чановое. Проводится кучное выщелачивание отвалов, которые складывают на подготовленной цементированной площадке. Крупные куски руды чередуют с мелкими, предусматривают вентиляционные ходы. Отвалы периодически орошают кислыми бактериальными растворами. Медь в результате окисления переходит в воду в виде медного купороса, затем ее выделяют из водного раствора. Чановое выщелачивание экономично проводить для более дорогого сырья, например для обогащения концентратов. При этом способе выщелачивания часто образуются высокие концентрации металлов, поэтому целесообразно применять культуры бактерий, предварительно приученные к высоким концентрациям меди, мышьяка и других элементов. Так, при чановом выщелачивании успешно протекает процесс освобождения оловянных и золотых концентратов от мышьяка. В этих концентратах мышьяк присутствует в основном в виде арсенопирита — сульфида, легко окисляемого *Th. ferrooxidans*. Процесс очистки концентратов, содержащих 4—6% мышьяка, протекает около 120 ч.
- В настоящее время получает широкое распространение гидрометаллургия. Бактериальное выщелачивание занимает среди других гидрометаллургических методов одно из первых мест.
- Сульфидам часто сопутствуют редкие элементы. В такие сульфиды, как пирит, арсенопирит, антимонит, бывают включены мельчайшие частицы золота, которые при химическом и бактериальном окислении сульфидов должны освободиться. Так, при окислении гравитационного концентрата под действием бактерий в раствор переходило около 0,5 мг/л золота.
- Таким образом, бактерии способны воздействовать даже на такой инертный металл, как золото. Кроме *Th. ferrooxidans* и других тионовых бактерий, которые оказывают косвенное воздействие, существуют микроорганизмы, способные создавать вещества, вступающие в воднорастворимый комплекс с золотом. И. П а р е были выделены гетеротрофные бактерии, которые образовывали на органических средах, содержащих пептон и соли органических кислот, вещества неизвестной природы, растворяющие золото. Под действием бактерий, определенных как *Vac. firmus* и *Vac. sphaericus*, в раствор переходило до 10 мг/л золота. Возможно, что расшифровка химической природы воднорастворимого комплекса золота даст промышленности новый растворитель.