

Биогеохимические циклы углерода, азота и серы

Три элемента — одна система жизни и климата.



Почему круговороты вещества важны для биосферы

Без постоянного обмена веществ атмосфера, почвы и океан быстро утратили бы устойчивость. Именно биогеохимические циклы удерживают баланс между жизнью, минералами и климатом, а их нарушения отражаются на всей планете.



Углерод как основа органического вещества

Каркас живой материи

Атомы углерода образуют прочные цепи и кольца, из которых строятся углеводы, липиды, белки и нуклеиновые кислоты. Поэтому именно он задаёт архитектуру клеток и тканей.

Главные резервуары

Углерод распределён между атмосферой, живой биомассой, почвами, океаном и осадочными породами. Эти хранилища различаются по объёму и скорости обмена веществом.

Пути обмена

Переходы углерода обеспечивают фотосинтез, дыхание, разложение органики, растворение углекислого газа в воде и его захоронение в осадках. Так поддерживается непрерывность круговорота.

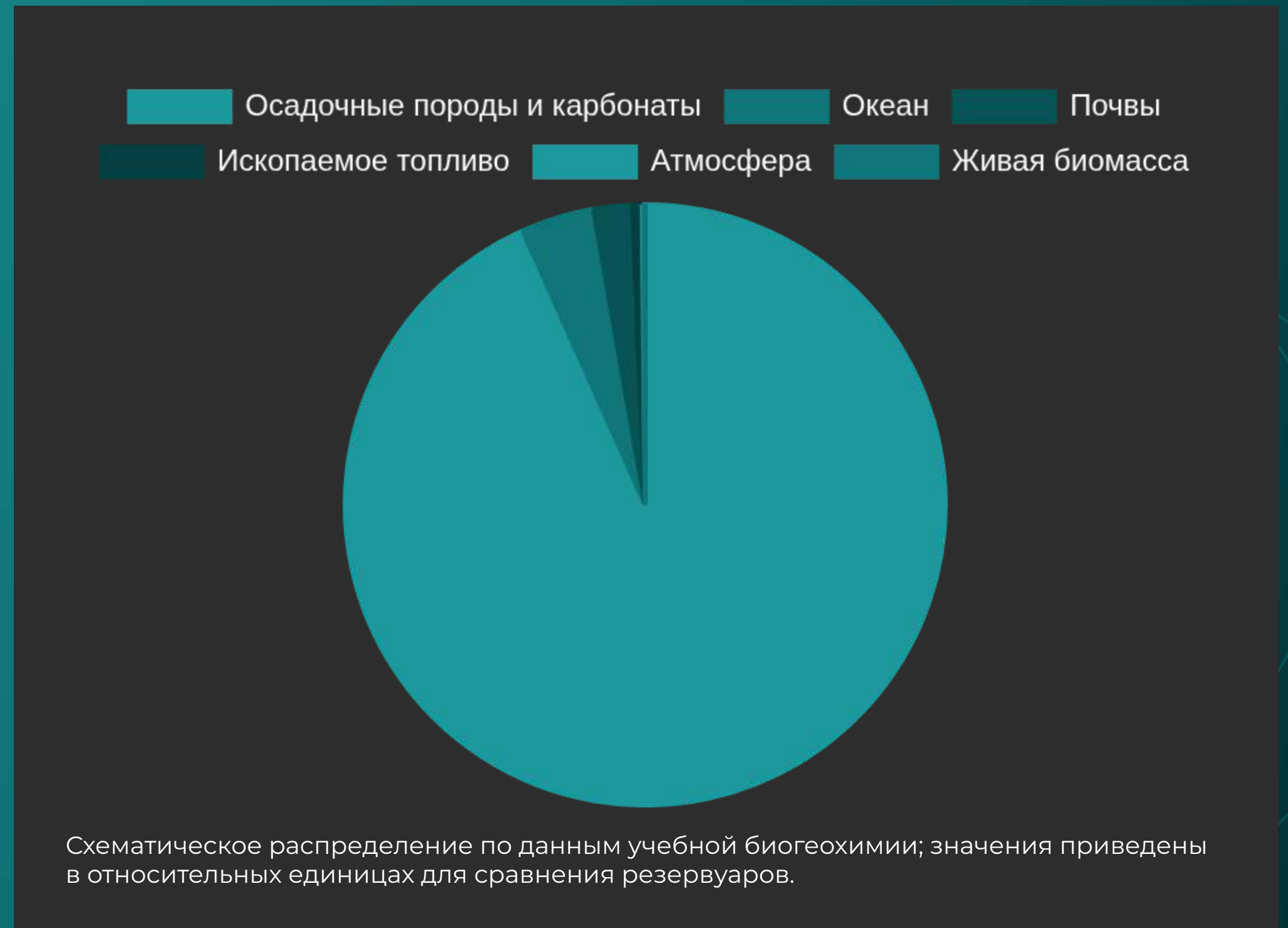
Связь с жизнью

Доступность углерода определяет образование органического вещества, рост организмов и накопление энергии в экосистемах. Без этого элемента невозможны ни питание, ни долговременное хранение биомассы.

Распределение углерода по основным резервуарам

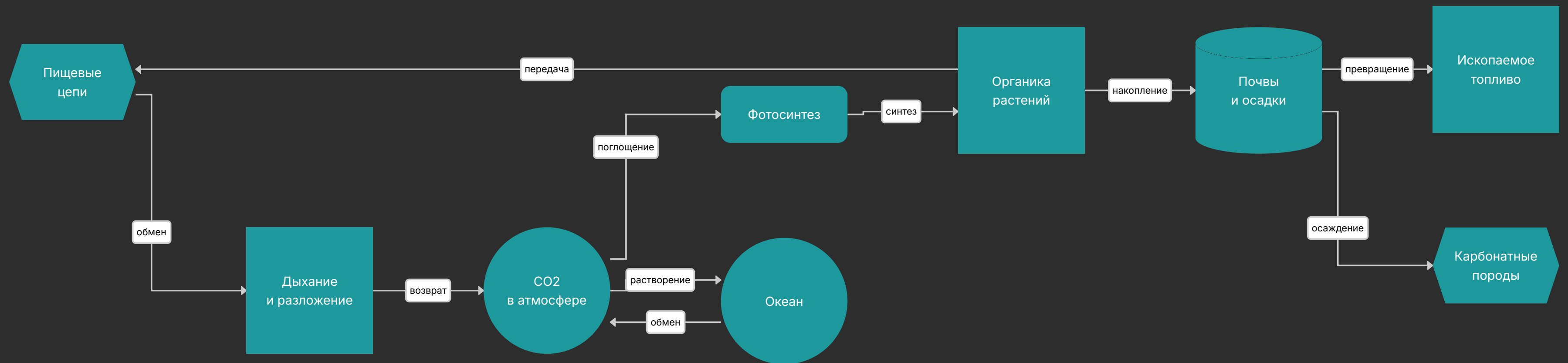
Диаграмма показывает не только крупнейшие хранилища углерода, но и то, где его запасы меняются быстрее всего под влиянием человека.

Атмосфера содержит малую долю углерода, однако именно её состав реагирует на выбросы быстрее всего.



Круговорот углерода: основные этапы

Схема построена по основным биогеохимическим переходам углерода между атмосферой, биотой, океаном и осадками.



Фотосинтез, дыхание и связь с климатом

Фотосинтез как поглощение

Зелёные растения и фитопланктон связывают углекислый газ, превращая его в органическое вещество. Этот процесс ежегодно вовлекает огромные массы углерода в биосферу.

Дыхание возвращает CO₂

Живые организмы, а также микроорганизмы-разрушители высвобождают углерод при дыхании и разложении. Благодаря этому круговорот остаётся непрерывным и замкнутым.

Природные поглотители

Леса, болота и океан служат крупными поглотителями углерода. Они замедляют рост его концентрации в атмосфере и помогают смягчать климатические колебания.

Почему это важно

Если поглощение и выделение углерода нарушаются, меняется не только состав воздуха, но и тепловой баланс планеты. Поэтому углеродный цикл напрямую связан с климатом.



420 ppm
превышала
концентрация CO₂
в атмосфере в 2023 году.

Это отражает ускоренный рост выбросов и усиливает парниковый эффект, делая влияние хозяйственной деятельности на климат особенно заметным.

NOAA Global Monitoring Laboratory, данные по концентрации CO₂ в атмосфере за 2023 год.

Азот как ограничивающий элемент для роста

1. Азот в составе клетки

Азот входит в аминокислоты, белки, ДНК, РНК и хлорофилл. Поэтому без него невозможно ни построение тканей, ни деление клеток, ни нормальный фотосинтез.

2. Недоступность атмосферного N₂

Хотя воздух почти на четыре пятых состоит из азота, молекула N₂ очень устойчива из-за прочной тройной связи. Большинство организмов не может использовать её напрямую.

3. Фиксированные формы

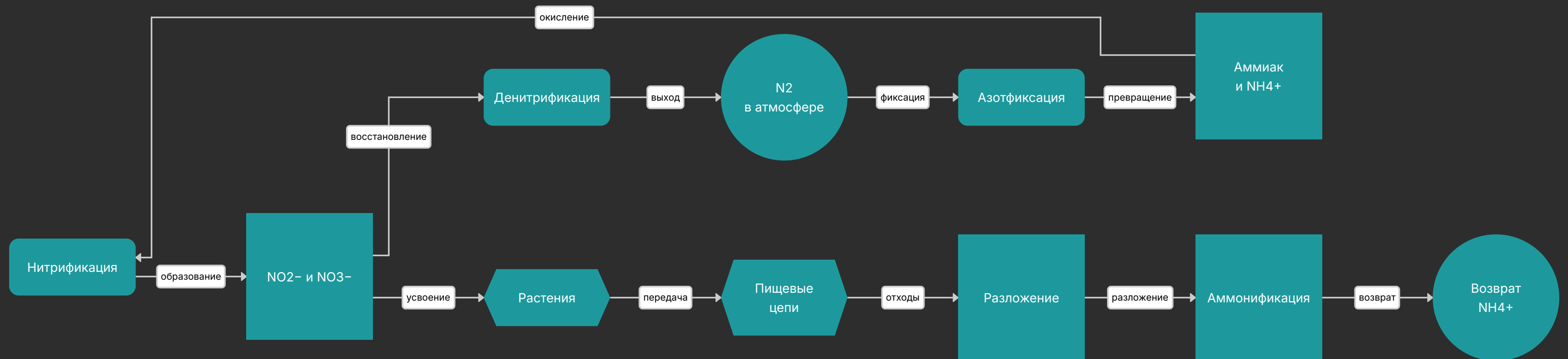
Растения и животные усваивают только доступные соединения: ионы аммония, нитраты и органические формы азота. Именно они входят в питание и биосинтез.

4. Почему азот ограничивает рост

Если доступного азота мало, замедляются образование белков и наращивание биомассы. Поэтому во многих экосистемах именно азот становится фактором, сдерживающим продуктивность.

Азотный цикл: от атмосферы к биомассе

Схема показывает превращения азота в атмосфере, почве и живых организмах, включая микробные процессы.



Преобразования и потери соединений азота в почве

Интенсивность процессов заметно меняется при колебаниях влажности, температуры и доступа кислорода, поэтому почва быстро реагирует на условия среды.

Нитрификация обычно идёт активнее при хорошей аэрации, тогда как денитрификация и вымывание становятся важными путями потерь азота.



Роль микроорганизмов в азотном цикле



Фиксация азота

Клубеньковые бактерии рода *Rhizobium* переводят атмосферный N_2 в доступные растениям соединения. Благодаря симбиозу с бобовыми культурами они создают основу азотного питания многих наземных экосистем.



Нитрификация

Нитрифицирующие бактерии превращают аммоний сначала в нитриты, а затем в нитраты. Эти формы легко поглощаются корнями, поэтому именно микробы делают азот реально доступным для растений.



Цианобактерии

Свободноживущие цианобактерии обогащают воду и почву фиксированным азотом, особенно там, где других источников питания мало. Их деятельность поддерживает первичную продукцию в водоёмах и влажных биотопах.



Условия работы

Скорость микробных превращений зависит от pH, аэрации, влажности, температуры и запаса органики. При неблагоприятных условиях круговорот азота замедляется, а экосистемы быстрее испытывают его дефицит.

Азотные удобрения и экологические риски

1.

Рост урожайности

Процесс Габера—Боша сделал возможным массовое производство аммиака и резко увеличил доступность азота для сельского хозяйства. Это поддержало рост урожайности и обеспечило питание для растущего населения.

2.

Потери в водоёмы

Часть внесённых соединений азота не усваивается растениями и вымывается в реки и озёра. Там нитраты стимулируют бурный рост водорослей, нарушают прозрачность воды и вызывают эвтрофикацию.

3.

Парниковый эффект

В почвах избыток реактивного азота может превращаться в закись азота N_2O . Этот газ вносит вклад в усиление парникового эффекта и сохраняется в атмосфере значительно дольше многих загрязнителей.

4.

Подкисление почв

Аммонийные и нитратные соединения изменяют химический состав почвы и могут усиливать её подкисление. В результате ухудшается доступность питательных веществ, а чувствительные растения развиваются заметно хуже.



Сера как элемент белков и минералов

Структура белков

Сера входит в аминокислоты цистеин и метионин, поэтому без неё невозможен полноценный синтез белков. Дисульфидные связи, образованные с её участием, помогают удерживать пространственную форму молекул.

Обмен веществ

Соединения серы необходимы для работы ряда коферментов и ферментов клеточного обмена. Благодаря этому элементу протекают важные реакции, связанные с ростом, восстановлением тканей и энергетическим обменом.

Основные формы

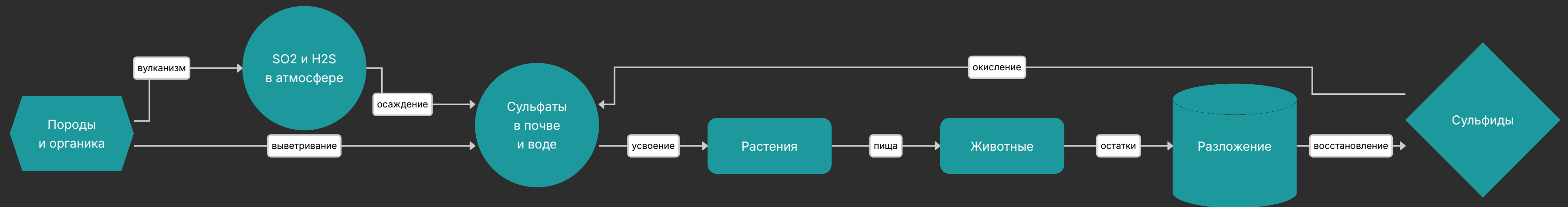
В природе сера встречается в виде сульфидов, сульфатов, элементной серы и органических соединений. Эти формы постоянно переходят одна в другую в ходе окисления, восстановления и биологического усвоения.

Крупные резервуары

Наибольшие запасы серы сосредоточены в океане, осадочных породах и вулканических газах. Именно эти резервуары определяют долговременный фон её круговорота и поступление в атмосферу.

Круговорот серы: атмосфера, вода и почва

Схема показывает, как сера переходит между литосферой, гидросферой, атмосферой и живыми организмами под действием выветривания, микроорганизмов и вулканизма.



Сера и кислотные осадки

Невидимый след заводских труб

Дым, поднимающийся над промышленной трубой, содержит диоксид серы, который в воздухе постепенно окисляется. Затем он соединяется с влагой и возвращается на землю уже в виде кислотных осадков, незаметно меняя химический состав почв и воды.



Когда облака становятся агрессивными

Капли в облаках могут накапливать серную кислоту и выпадать вместе с дождём или снегом. На листовых пластинках появляются ожоги, а чувствительные растения теряют способность нормально расти и удерживать воду.



Разрушение материалов и ландшафта

Кислотные осадки повреждают не только живые организмы, но и камень, бетон, металл. На фоне серого неба и промышленных выбросов особенно заметны потускневшие фасады, ослабленные конструкции и угнетённая растительность.



Сравнение углеродного, азотного и серного циклов

Таблица сопоставляет три цикла по форме элемента, биологической роли, ключевым микроорганизмам и характерным нарушениям, связанным с деятельностью человека.

Углерод, азот и сера различаются по формам и функциям, но их нарушения быстро отражаются на состоянии экосистем, почв, водоёмов и атмосферы.

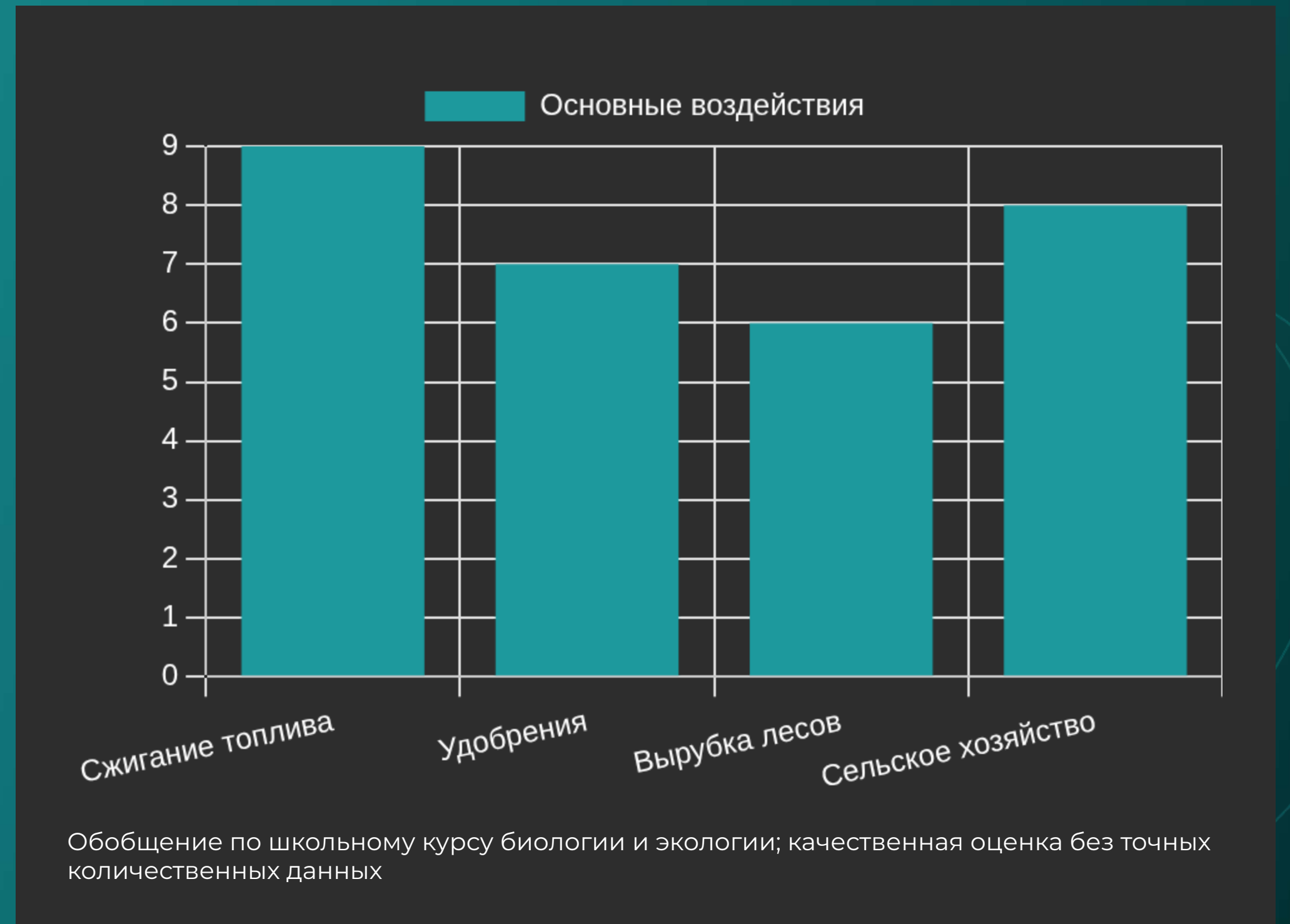
Цикл	Главные формы	Биологическая роль	Нарушение
Углерод	CO2, органика	Биомасса, климат	Парниковый эффект
Азот	N2, NO3-	Белки, ДНК	Эвтрофикация
Сера	SO2, SO4 ²⁻	Белки, ферменты	Кислотные осадки

Учебные данные по биогеохимическим циклам; обобщение по материалам школьной биологии

Антропогенное влияние на три цикла

На диаграмме показаны разные источники воздействия человека: энергетика, сельское хозяйство и землепользование меняют состав атмосферы, почв и водоёмов одновременно.

Сильнее всего нарушаются потоки углерода и реактивного азота, но последствия быстро затрагивают и серный цикл, особенно вблизи промышленных центров.



Связь циклов между собой

1. Почва как узел обмена

Именно в почве углерод, азот и сера встречаются в органическом веществе, минеральных соединениях и продуктах разложения. Здесь один процесс почти всегда влияет на скорость других превращений.

2. Связь питания и фотосинтеза

Недостаток азота ограничивает образование хлорофилла и замедляет фотосинтез, а значит, уменьшает накопление углерода в растениях. Поэтому продуктивность экосистемы зависит сразу от нескольких элементов.

3. Обмен через разложение

Разложение опавших листьев, остатков организмов и почвенной органики одновременно возвращает углерод в атмосферу, азот в доступные формы, а серу — в новые минеральные соединения.

Практические меры сохранения баланса циклов



Сокращение выбросов

Снижение сжигания угля, нефти и газа уменьшает поступление CO₂ и SO₂ в атмосферу. Это помогает сдерживать потепление и снижает риск кислотных осадков.



Восстановление экосистем

Леса, болота и плодородные почвы служат естественными накопителями углерода и средой для азотного и серного обмена. Их восстановление повышает устойчивость природных систем.



Точное внесение удобрений

Дозированное применение азотных удобрений позволяет избежать потерь нитратов и загрязнения водоёмов. Такой подход поддерживает урожайность без избыточной нагрузки на окружающую среду.



Очистка стоков и газов

Фильтрация промышленных выбросов и контроль сельскохозяйственных стоков уменьшают поступление серы и азота в воздух и воду. Это важная мера профилактики деградации экосистем.



Постоянный мониторинг

Наблюдение за кислотностью, содержанием нитратов и запасами углерода позволяет вовремя замечать нарушения. Регулярные измерения помогают принимать меры до появления необратимых изменений.

Циклы углерода, азота и серы — основа устойчивости биосферы

Эти три круговорота поддерживают жизнь, но зависят от равновесия между природными процессами и деятельностью человека. Понимание их связей помогает сохранять климат, почвы, воду и биоразнообразие.

