



## Контекст: круговорот азота

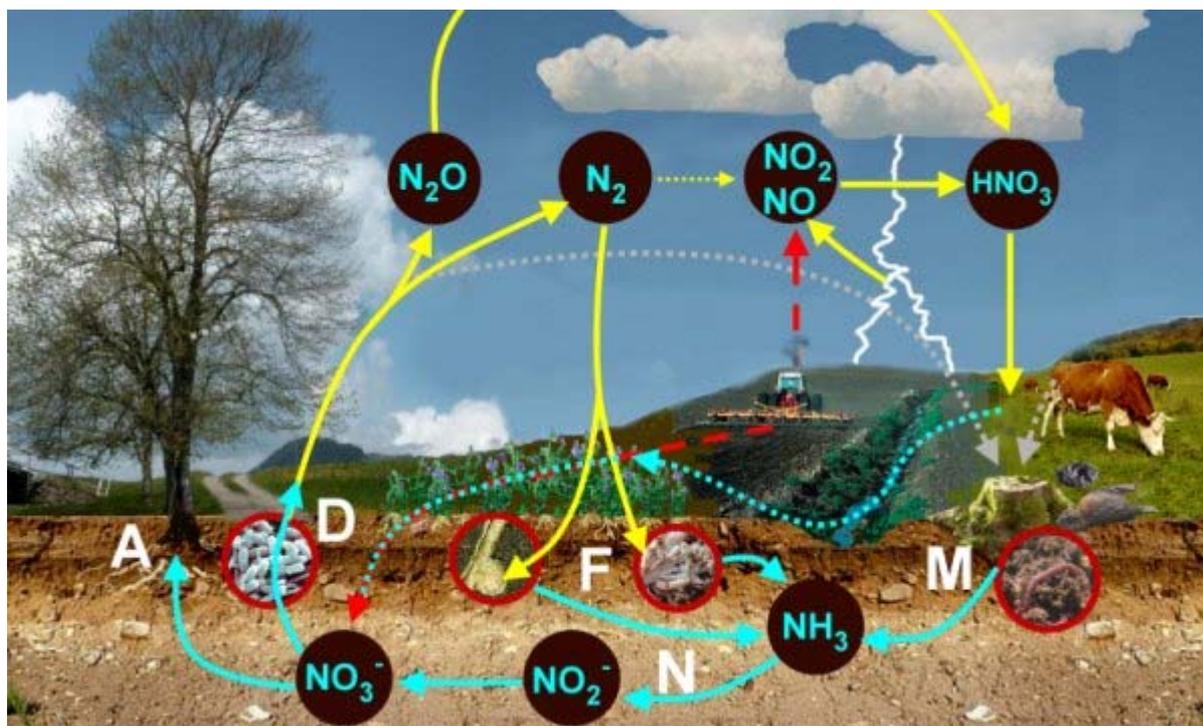
### Ключевые слова:

фиксация азота, нитрификация, денитрификация, ассимиляция, внесение удобрений, эмиссия оксида азота



### Круговорот азота

Круговорот азота необходим для жизни на планете Земля и, конечно, для нас, людей. Соединения азота играют важную роль в обмене веществ живых организмов. Много органических молекул в организме растений, животных и людей включают соединения азота (например, аминокислоты, протеины и ДНК). Соединения азота также участвуют в химических процессах в атмосфере и воздействуют на систему климата.



1. Круговорот азота: А – ассимиляция растениями, F – фиксация азота бактериями в симбиозе с растениями или бактериями, живущими в почве, N – нитрификация, D – денитрификация, M – минерализация.

Схема: Элмар Ухерек.

В основном, круговорот азота состоит из химических реакций в воздухе (окисление является доминирующим) и из химических реакций в биосфере: в растениях и микроорганизмах в почве (окисление или восстановление).

## Фиксация, нитрификация и денитрификация азота

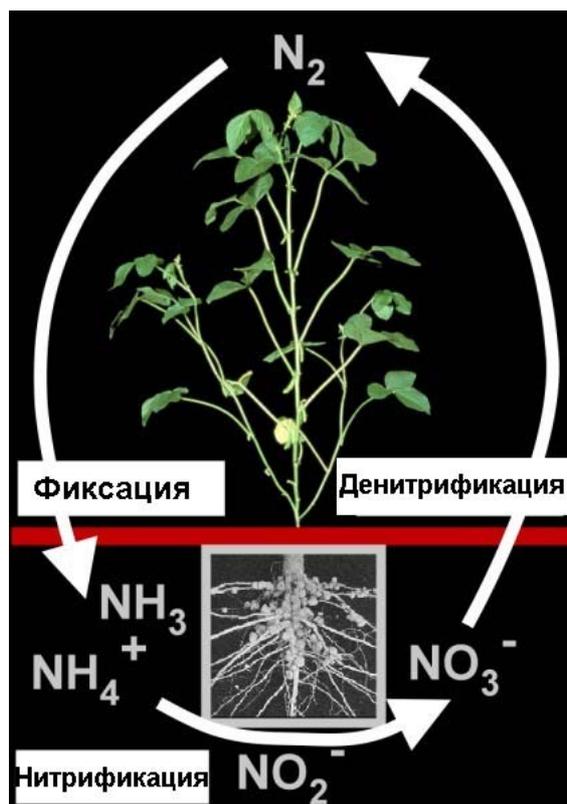
Для роста растениям необходимы соединения азота. В природе азот может быть в формах, усвояемых растениями (таких как нитраты или соединения аммония) или неусвояемых ими (таких как молекулярный азот или оксид азота). В течение фиксации азота или его денитрификации происходит обмен между обеими формами.

**Фиксация азота** – процесс усвоения растениями соединений азота из воздуха (главным образом из молекулярного азота,  $N_2$ ). Фиксация азота возможна многими бактериями и цианобактериями. Они живут или в почве, или в симбиозе с растениями, или с несколькими разновидностями животных. Например, семья бобовых растений (Fabaceae) содержит такие бактерии на своих корнях.

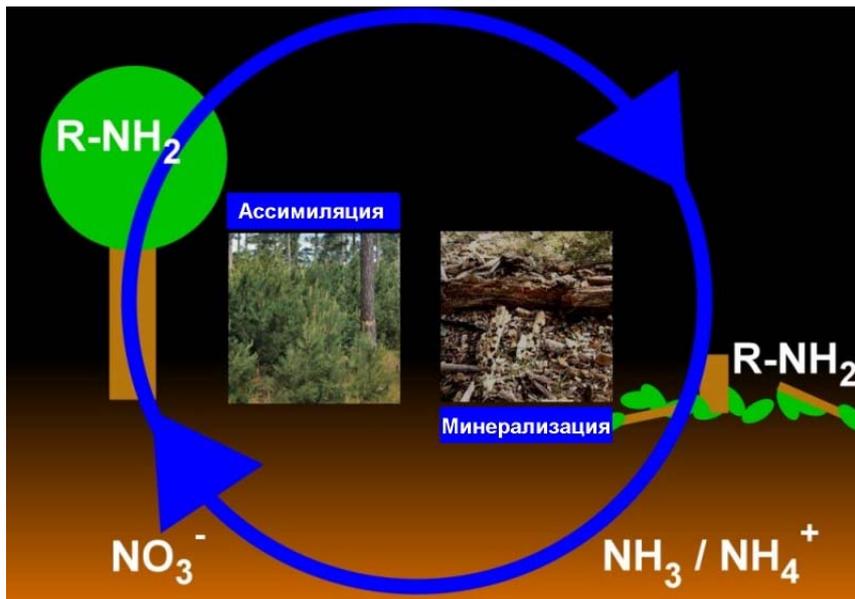
Продукты фиксации азота – аммиак, нитриты или нитраты.

**Нитрификация** является вторым шагом фиксации азота. Если аммиак – первичный продукт фиксации азота, мы можем назвать переход аммиака в нитриты и нитраты (нитрифицирующими бактериями) – нитрификацией.

**Денитрификация** является процессом разложения нитрата с получением азота. Это выполняется микроорганизмами (палочковидная бактерия, псевдомонас и другие бактерии), которые при усвоении переключаются от кислорода к нитрату, в особенности в недостаточно проветриваемых почвах. Процесс денитрификации может привести к нескольким промежуточным продуктам. Наиболее важный – закись азота. Газы возвращаются в атмосферу. Закись азота – долгоживущий парниковый газ. Фиксация азота является процессом, противоположным денитрификации.



2. Биологический круговорот азота в почве состоит из а) фиксации азота бактериями, которые могут жить в симбиозе с растениями (как на корнях сои) и б) денитрификации другими бактериями, которые выделяют молекулярный азот или  $N_2O$  при respirации. Коллаж: Элмар Ухерек.



3. Ассимиляция и минерализация определяет поглощение соединений азота из почвы и объединение их в биомолекулы растений, и конверсию в неорганический азот после отмирания растений, соответственно.

Схема: Элмар Ухерек.

## Ассимиляция и минерализация

Усваиваемые соединения азота могут накапливаться в почве в неорганической форме (нитрат) или могут быть включены в живой организм как органический азот.

**Ассимиляция** – переход неорганического азота (типа нитрата) в органическую форму азота как, например, аминокислоты. Нитрат переходит с помощью ферментов сначала в нитрит (редуктаза нитрата), затем в аммиак (редуктаза нитрита). Аммиак входит в состав аминокислот.

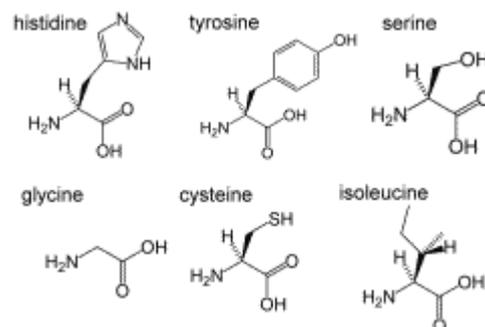
**Минерализация** (аммонификация) это процесс, в течение которого редуценты, такие как земляные черви, термиты, слизняки, улитки, бактерии и грибы преобразовывают органический азот отмерших растений в неорганические формы. Первый шаг это формирование аммиака и его солей ( $\text{NH}_4^+\text{X}$ ).

Ассимиляция и минерализация являются противоположными процессами.

## Атмосферное окисление

Самые важные пути естественного производства оксидов азота это окислительные процессы при высоких температурах. Это может быть при высокой температуре лесных пожаров или при окислении молекулярного азота (инертного в нормальных условиях) при извержениях вулкана или при разрядах молнии.

Главными продуктами таких процессов являются оксид азота,  $\text{NO}$ , и диоксид азота,  $\text{NO}_2$ , а после дальнейших реакций – азотная кислота. Как было сказано в тексте “Исследования”, определенные концентрации  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  приводят к формированию озона при помощи солнечного света и эмиссии углеводов.



4. Аминокислоты – это азот, содержащийся в биомолекулах. Из аминокислот образуются белки.

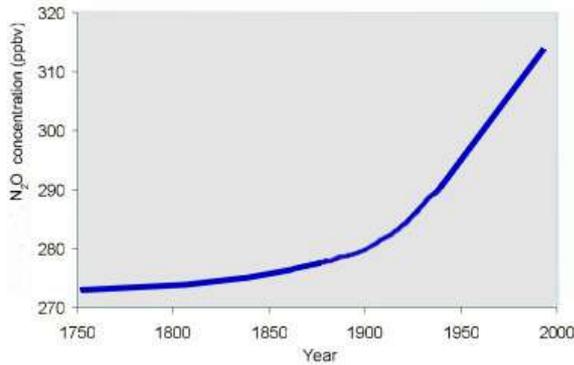


## Влияние человеческой деятельности

### Оксиды азота и озоновый смог

В дополнение к естественным источникам, люди ответственны за эмиссию  $\text{NO} / \text{NO}_2$  в результате горения при технических процессах. Самое распространенное – это горение в автомобильных двигателях. При определенных условиях если средние концентрации в воздухе становятся слишком высокими, это может привести к озоновому смогу.

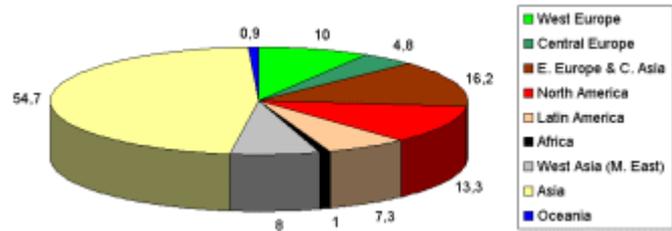
Кроме того, оксиды азота в атмосферных реакциях преобразовываются в азотную кислоту, что вносит свой вклад в кислотные дожди и к их отрицательным последствиям.



**5. Увеличивающаяся фракция закиси азота (веселящий газ) в воздухе – прежде всего, вследствие употребления азотных удобрений. Диаграмма: Элмар Ухерек.**

### Внесение удобрений и эвтрофикация

Чтобы улучшать условия для растущих зерновых культур, в почву вносятся азотсодержащие удобрения. Это можно бы назвать технической фиксацией азота, базируемой, например, на синтезе аммиака в процессе Габера-Боша.



**6. Мировое производство аммиака в 2004 г. на регион (данные в миллионах тонн N) для внесения удобрений и других промышленных нужд. Данные взяты из страницы статистики Международной ассоциации промышленности удобрения IFA**



**7. Рост производства азотсодержащих удобрений очень увеличился за последние десятилетия. График от IFA.**

Если внесено слишком много удобрений и излишек не принят растениями, это вызывает двойное отрицательное действие. Аммиак и нитраты смываются в водоемы и прибрежные зоны. Здесь они вызывают сильный рост растений и морских водорослей (фитопланктона), и в результате жизнь в воде может быть погашена, так как содержание кислорода будет уменьшаться из-за разложения отмирающих растений.

Кроме того, денитрификация увеличивается и производится больше закиси азота  $\text{N}_2\text{O}$ . Это увеличивает парниковый эффект, а закись азота, достигающая стратосферы, преобразовывается в другие оксиды азота, способствующие истощению озонового слоя.

Автор: Элмар Ухерек. Институт Химии Макса Планка, Майнц.