

## КРУГОВОРОТ АЗОТА И ЕГО СОЕДИНЕНИЙ В ПОЧВЕ

Обзор

Филиппова Л.С.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-4758-9479;

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

\* Копирующийся автор (fil.gasdertyu5[at]gmail.com)

### Аннотация

Азот является одним из самых распространенных в природе элементов, входит в состав основных биологических соединений и является одним из важнейших элементов для развития растений. Источниками азота в его круговороте являются атмосфера, органические остатки и азотсодержащие удобрения. В данной работе представлены основные минеральные и органические формы нахождения азота в почве. Рассмотрены основные процессы миграции и трансформации разных форм азота в результате жизнедеятельности микроорганизмов и протекания физико-химических процессов. Приведены реакции, происходящие при круговороте азота в почве, и указано влияние различных условий и факторов на баланс между формами, в которых находится азот.

**Ключевые слова:** почва, азот, аммонификация, нитрификация, денитрификация.

## NITROGEN CYCLING AND NITROGEN COMPOUNDS IN THE SOIL

Review article

Filippova L.S.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-4758-9479;

<sup>1</sup>Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russian Federation

\* Corresponding author (fil.gasdertyu5[at]gmail.com)

### Abstract

Nitrogen is one of the most abundant elements in nature, is a constituent of the main biological compounds and is one of the most important elements for plant development. Sources of nitrogen in its cycle are the atmosphere, organic residues and nitrogen-containing fertilizers. This work presents the main mineral and organic forms of nitrogen in the soil. The main processes of migration and transformation of different forms of nitrogen as a result of microorganisms and physicochemical processes are considered. The reactions occurring in the soil nitrogen cycle are given, and the influence of various conditions and factors on the balance between the forms of nitrogen in the soil is indicated.

**Keywords:** soil, nitrogen, ammonification, nitrification, nitrification, denitrification.

### Введение

Азот является одним из наиболее распространённых в природе химических элементов. В различных формах азот содержится в атмосфере, гидросфере, в осадочных породах и почве, в растительном и животном мире. При этом в результате между литосферой, гидросферой, атмосферой и живыми организмами постоянно происходит обмен азотом, как и другими химическими элементами. Азот относится к жизненно важным элементам, он содержится в белках, аминокислотах, нуклеиновых кислотах, хлорофилле, гемах и др. биологических соединениях. В связи с этим большое значение имеет изучение и контроль круговорота азота в природе, особенно в антропогенных экосистемах, т.к. его излишнее содержание приводит к химическому загрязнению почвы, эвтрофикации водоемов и загрязнению их продуктами разложения биологических объектов [1], [2].

В почвенном покрове азот является одним из важнейших элементов на стадии вегетации и активного формирования корневой системы и стебля растения. Кроме того, азот участвует в метаболизме растений и необходим для формирования в них нуклеиновых кислот и др. важных соединений. Все процессы жизнедеятельности растения, от синтеза хлорофилла до усвоения витаминов, интенсифицируются благодаря азоту. Недостаток азота снижает урожайность и может привести к гибели растений. При этом растения могут усваивать в основном только аммонийную и нитратную формы азота [1], [3].

Целью данной работы является рассмотрение основных процессов трансформации и миграции азота во время его круговорота в почве.

### Круговорот азота

Круговорот азота является одним из наиболее важных круговоротов веществ, происходящих в природе, и большая часть его цикла происходит с участием биосферы и напрямую связана с почвой.

Азот из атмосферы, где он является преобладающим элементом, поступает в клетки микроорганизмов, затем в почву в виде фиксированного азота, отсюда попадает в растения и далее движется по трофическим цепочкам, попадая в организмы животных. После гибели растений и животных азот в процессе разложения останков снова попадает в почву, откуда или снова поступает в другие растения, или переходит в атмосферу. Кроме того, существенный вклад в круговорот азота вносят процессы растворения и вымывания его из почвы, откуда он поступает в водные объекты, из которых может переходить в атмосферу или попадать в организмы гидробионтов. Важным источником поступления азота в почву является внесение минеральных и органических азотсодержащих удобрений.

Фиксированным называют азот, входящий в состав соединений, которые могут усваиваться растениями и животными. Меньшая часть азота фиксируется абиогенным путем в результате ионизации атмосферы космическим излучением или во время грозы, что приводит к реакции азота с кислородом или водородом воды с образованием оксидов азота и аммиака, которые с осадками попадают в почву. Большая часть азота фиксируется биогенным путем в процессе жизнедеятельности свободноживущих (несимбиотических) или клубеньковых бактерий и сине-зелеными водорослями в почве, а также некоторыми морскими микроорганизмами [4].

### **Содержание и формы азота в почве**

Аккумуляция азота в почвах является одним из признаков почвообразования. В то же время неоднородность природных и техногенных условий являются причиной разной степени накопления и различий в темпах трансформации азота в почвах. Общее количество азота в почвах зависит от количественного содержания органического вещества, в состав которого входит до 98% почвенного азота (остальные 2% входят в состав минеральной составляющей почвы) и глубины гумусового горизонта, в котором преимущественно и закрепляется азот, в почвенном профиле [3].

Элементарный азот в газообразной форме содержится в почвенном воздухе и в почвенном растворе. Минеральный азот содержится в виде газов  $N_2O$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  и  $NH_3$ , а также в виде ионных форм  $NH_4^+$ , нитрита  $NO_2^-$  и нитрата  $NO_3^-$  в почвенном растворе. Органический азот подразделяют на легкогидролизуемый (амиды, амины), трудногидролизуемый (амины, часть амидов, гумины, необменный аммоний) и негидролизуемый (азот гуминов, меланинов, битумов, необменный аммоний) [5]. При этом на долю легкогидролизуемого азота приходится 2-8%, а на долю трудногидролизуемого 69-77% [5], [6]. Органические соединения азота входят в состав неспецифических органических соединений и гумусовых кислот в составе гумуса [7].

### **Процессы миграции и трансформации азота в почве**

При этом в почве происходит постоянный цикл трансформации азота из одних форм в другие, в частности из минеральных в органические и обратно, в результате процессов синтеза и разложения. К преобладающим процессам относятся азотфиксация, аммонификация, нитрификация, денитрификация (биологическая и химическая) и иммобилизация (фиксация микроорганизмами и глинистыми минералами). Минерализация и иммобилизация определяют содержание подвижных форм питательных веществ и условия азотного питания растений.

Кроме того, азот является самым мобильным элементом в почве, поэтому наряду с улетучиванием происходит его инфильтрация в подпахотные слои почвы в результате вымывания и закрепление в кристаллической решетке минералов. Преобладание направления трансформации определяет степень подвижности азота в почве, его доступность для растений и объем потерь на улетучивание. В естественных условиях эти процессы уравнивают друг друга, формируя баланс азота и его форм в почвах.

Трансформация соединений азота в почве происходит главным образом при участии микроорганизмов, хотя некоторые процессы являются исключительно химическими и физико-химическими. Участие микроорганизмов заключается в протекании процессов трансформации в их клетках и активация этих процессов внеклеточными ферментами [6], [8].

Азотфиксация или диазотрофия представляет собой микробиологическое восстановление молекул атмосферного азота в процессе их ассимиляции с образованием биологического азота и азотсодержащих соединений, доступных для питания растений. Азотфиксирующие бактерии подразделяют на следующие разновидности [9], [10], [11]:

- несимбиотические, подразделяемые на свободноживущие в почве азотфиксирующие бактерии, среди которых наиболее распространены азотобактер и клубеньковые бактерии, и ассоциативные, обитающие в прикорневой зоне (ризосферные микроорганизмы), на поверхности корней и листьев (эпифитные микроорганизмы) или внутри тканей, обычно в межклеточном пространстве (эндосферные или эндофитные микроорганизмы, не оказывающие негативного влияния), растений;

- симбиотические, которые могут обитать в тканях растений, вызывая появление особых разрастаний в виде клубеньков или узелков на корнях и листьях (клубеньковые бактерии), а также находиться в составе симбиотических ассоциаций с грибами, образуя лишайники (цианобактерии или сине-зеленые водоросли), и другими почвенными микроорганизмами.

При этом свободноживущие диазотрофы ассимилируют меньше азота, чем симбиотические, среди которых наибольшей продуктивностью отличаются клубеньковые бактерии, находящиеся в симбиозе с многолетними бобовыми культурами. В то же время по известным данным площади посева бобовых культур сравнительно невелики, поэтому в общий объем азотфиксации значительный вклад вносят ассоциативные микроорганизмы, число которых в почве может быть повышено за счет применения биопрепаратов с их активными штаммами [11].

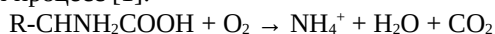
Азотфиксация представляет собой последовательность ферментативных реакций с образованием аммиака и последующим превращением аммиака в аминокислоты и белки. Ключевым ферментом при азотфиксации является нитрогеназа, вырабатывающийся только у прокариотов, к которым и относятся бактерии. В состав ферментной системы для диазотрофии также входят молибден и железо, поэтому их присутствие повышает интенсивность ассимиляции азота бактериями [9].

Недавние исследования показали, что скорость минерализации соединений азота бактериями в первую очередь зависит не от лабильности соединения, а определяется степенью его доступности для внеклеточных ферментов, которая снижается при адсорбции соединений на поверхности минералов или в результате окклюзирования в микроагрегатах почвы [12]. В то же время для растворенного в почвенном растворе органического азота определяющими факторами будут являться молекулярная масса азотсодержащего соединения и соотношение количества углерода к количеству азота C : N в его составе [13]. Как правило, минерализация более активно происходит при C : N менее 25 : 1, при более высоких количествах углерода начинает преобладать процесс

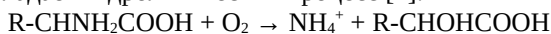
иммобилизации (питание микроорганизмов) – это связано с тем, что при достаточном и избыточном содержании углерода, но недостатке азота бактерии начинают поглощать азот из почвы, и наоборот при избытке азота бактерии быстро размножаются и активно минерализуют органические вещества.

Скорость минерализации (аммонификации и нитрификации) также определяется химическим составом почв, их температурой и влажностью. Существенное влияние оказывает и pH почв, вследствие чего в нейтральных и слабощелочных почвах 75-95 % минерального азота составляют нитраты. При этом стоит учитывать, что в вегетационный период растений в пределах их корневых систем происходят значительные изменения состава, кислотности, влажности, аэрации, численности и видового состава микроорганизмов [3].

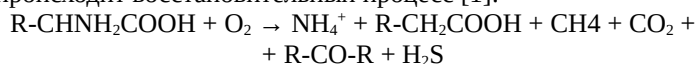
Одним из основных процессов микробиологической минерализации является аммонификация, происходящая при разложении органических соединений и сопровождающаяся выделением в окружающую среду аммиака и ионов аммония. В зависимости от степени аэрации почвы аммонификация может носить различный характер. В аэробных условиях наблюдается окислительный процесс [1]:



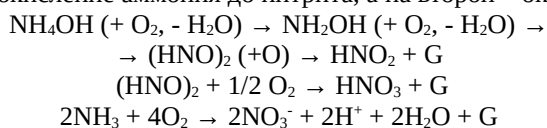
При дефиците кислорода преобладает гидролитический процесс [1]:



В анаэробных условиях происходит восстановительный процесс [1]:

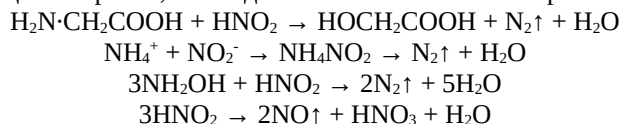


Образующийся в этих процессах аммоний окисляется нитрифицирующими бактериями до нитратов. На первой стадии этого процесса происходит окисление аммония до нитрита, а на второй – окисление нитрита до нитрата [1]:



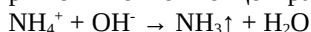
Максимальная интенсивность нитрификации наблюдается при 25-28 °С и pH = 7-8,5, в то время как при температурах ниже 8 °С и pH < 5 данный процесс прекращается. Следует учитывать, что процесс нитрификации является нежелательным, поскольку значительные потери азота происходят при денитрификации и вымывании нитратов, а также из-за того, что растения лучше усваивают NH<sup>+</sup>, чем NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Кроме того, нитраты могут легко накапливаться в растениях и делать сельскохозяйственную продукцию опасной для человека и животных [1], [3].

Денитрификация происходит под действием анаэробных микроорганизмов-денитрификаторов, которые полностью окисляют органические вещества до азота, диоксида углерода и воды [4]. При этом на начальной стадии бактерии разлагают нитраты и только потом происходит разложение нитритов. Возможны и процессы химической или ферментативной денитрификации нитритов, наблюдаемые в кислых почвах с pH < 5,5 [1]:



Химическая денитрификация протекает интенсивней при внесении больших доз аммиачных удобрений из-за того, что аммиак ингибирует процессы окисления нитритов до нитратов. Процесс денитрификации также является нежелательным, т.к. приводит к потере азота в газообразной форме, что особенно интенсивно происходит при затяжных дождях, создающих анаэробные условия в почве. Внесение азотных удобрений также приводит к интенсификации процессов денитрификации и увеличению объемов поступления оксидов азота в атмосферу [14].

Газообразные потери азота происходят и при повышенной концентрации аммония в почвах с pH > 7 [1]:



### Заключение

Учитывая важность для живой природы и сельского хозяйства присутствия азота в определенных формах и концентрациях, актуальным является изучение и контроль круговорота азота в почве, особенно в антропогенных агроэкосистемах.

Учитывая условия, при которых интенсифицируются те или иные процессы трансформации азота, можно добиться его преобладания в тех формах, которые способствуют питанию растений и повышению урожайности, а также избежать загрязнения почвы избыточным азотом или потерь азота в результате вымывания или улетучивания.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Кидин В.В. Агрохимия: учебник / В.В. Кидин, С.П. Торшин. — Москва: Проспект, 2015. — 1033 с.

2. Филиппова Л.С. Загрязнение почвы и биологические методы ее очистки / Л.С. Филиппова, А.С. Акимова // Международный научно-исследовательский журнал. — 2022. — № 11. — URL: <https://research-journal.org/archive/11-125-2022-november/10.23670/IRJ.2022.125.73> (дата обращения: 18.05.23). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.125.73.
3. Руделев Е.В. Трансформация азота почвы и удобрений / Е.В. Руделев, Д.А. Кореньков // Агрохимия. — 1989. — № 4. — С. 113-123.
4. Косолапова А.В. Учение о биосфере. Часть II. Биогеохимические циклы: учебное пособие / А.В. Косолапова. — Воронеж: ВГПУ, 2007. — 48 с.
5. Самофалова И.А. Химический состав почв и почвообразующих пород: учебное пособие / И.А. Самофалова. — Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2009. — 132 с.
6. Завалин А.А. Азот в агроecosистеме на черноземных почвах / А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. — Москва: РАН, 2018. — 180 с.
7. Орлов Д.С. Химия почв / Д.С. Орлов, Л.К. Садовникова, Н.И. Суханова. — Москва: Высшая школа, 2005. — 558 с.
8. Благодатская Е.В. Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды / Е.В. Благодатская, М.В. Семенов, А.В. Якушев. — Москва: Товарищество научных изданий КМК, 2016. — 243 с.
9. Завалин А.А. Экология азотфиксации / А.А. Завалин, О.А. Соколов, Н.Я. Шмырева. — Москва: РАН, 2019. — 252 с.
10. Тильба В.А. Использование биологического азота как средства биологизации системы земледелия / В.А. Тильба, О.Г. Шабалдас // Вестник АПК Ставрополя. — 2015. — S2. — С. 96-100.
11. Завалин А.А. Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур / А.А. Завалин, А.А. Алферов, Л.С. Чернова // Агрохимия. — 2019. — № 8. — С. 83-96. — DOI: 10.1134/S0002188119080143.
12. Bingham A.H. Organic nitrogen storage in mineral soil: Implications for policy and management / A.H. Bingham, M.F. Cotrufo // Science of The Total Environment. — 2016. — Vol. 551-552. — P. 116-126. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.020.
13. Liu S. A critical review of the central role of microbial regulation in the nitrogen biogeochemical process: New insights for controlling groundwater nitrogen contamination / S. Liu, T. Zheng, Y. Li, X. Zheng // Journal of Environmental Management. — 2023. — Vol. 328. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116959.
14. Осипов А.И. Биологический круговорот азота атмосферы / А.И. Осипов // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. — 2016. — № 42. — С. 97-103.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kidin V.V. Agrohimiya: uchebnyk [Agrochemistry: Textbook] / V.V. Kidin, S.P. Torshin. — Moscow: Prospekt, 2015. — 1033 p. [in Russian]
2. Filippova L.S. Zagryaznenie pochvy i biologicheskie metody ee ochistki [Soil pollution and biological methods of its purification] / L.S. Filippova, A.S. Akimova // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal [International Research Journal]. — 2022. — № 11. — URL: <https://research-journal.org/archive/11-125-2022-november/10.23670/IRJ.2022.125.73> (accessed: 18.05.23). — DOI: 10.23670/IRJ.2022.125.73. [in Russian]
3. Rudelev E.V. Transformatsiya azota pochvy i udobrenij [Transformation of soil nitrogen and fertilizers] / E.V. Rudelev, D.A. Koren'kov // Agrohimiya [Agrochemistry]. — 1989. — № 4. — P. 113-123. [in Russian]
4. Kosolapova A.V. Uchenie o biosfere. Chast' II. Biogeoхимические tsikly: uchebnoe posobie [The doctrine of the biosphere. Part II. Biogeochemical cycles: Textbook] / A.V. Kosolapova. — Voronezh: VSPU, 2007. — 48 p. [in Russian]
5. Samofalova I.A. Himicheskiy sostav pochv i pochvoobrazujuschih porod: uchebnoe posobie [Chemical composition of soils and soil-forming rocks: Textbook] / I.A. Samofalova. — Perm: Publishing house of Perm State Agricultural Academy, 2009. — 132 p. [in Russian]
6. Zavalin A.A. Azot v agrosisteme na chernozemnyh pochvah [Nitrogen in the agricultural system on chernozem soils] / A.A. Zavalin, O.A. Sokolov, N.Ja. Shmyreva. — Moscow: RAS, 2018. — 180 p. [in Russian]
7. Orlov D.S. Himiya pochv [Soil chemistry] / D.S. Orlov, L.K. Sadovnikova, N.I. Suhanova. — Moscow: Higher school, 2005. — 558 p. [in Russian]
8. Blagodatskaja E.V. Aktivnost' i biomassa pochvennyh mikroorganizmov v izmenjajuschisja uslovijah okruzhajuschej sredy [Activity and biomass of soil microorganisms in changing environmental conditions] / E.V. Blagodatskaja, M.V. Semenov, A.V. Jakushev. — Moscow: Association of Scientific Publications KMK, 2016. — 243 p. [in Russian]
9. Zavalin A.A. Ekologija azotfiksatsii [Ecology of nitrogen fixation] / A.A. Zavalin, O.A. Sokolov, N.Ja. Shmyreva. — Moscow: RAS, 2019. — 252 p. [in Russian]
10. Til'ba V.A. Ispol'zovanie biologicheskogo azota kak sredstva biologizatsii sistemy zemledelija [The use of biological nitrogen as a means of biologizing the farming system] / V.A. Til'ba, O.G. Shabal'das // Vestnik APK Stavropol'ja [Bulletin of Agroindustrial Complex of Stavropol]. — 2015. — S2. — P. 96-100. [in Russian]
11. Zavalin A.A. Assotsiativnaja azotfiksatsija i praktika primenenija biopreparatov v posevah sel'skohozjajstvennyh kul'tur [Associative nitrogen fixation and the practice of using biological products in agricultural crops] / A.A. Zavalin, A.A. Alferov, L.S. Chernova // Agrohimiya [Agrochemistry]. — 2019. — № 8. — P. 83-96. — DOI: 10.1134/S0002188119080143. [in Russian]
12. Bingham A.H. Organic nitrogen storage in mineral soil: Implications for policy and management / A.H. Bingham, M.F. Cotrufo // Science of The Total Environment. — 2016. — Vol. 551-552. — P. 116-126. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.020.

13. Liu S. A critical review of the central role of microbial regulation in the nitrogen biogeochemical process: New insights for controlling groundwater nitrogen contamination / S. Liu, T. Zheng, Y. Li, X. Zheng // Journal of Environmental Management. — 2023. — Vol. 328. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.116959.
14. Osipov A.I. Biologicheskij krugovorot azota atmosfery [Biological circulation of atmospheric nitrogen] / A.I. Osipov // Izvestija Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Proceedings of the St. Petersburg State Agrarian University]. — 2016. — № 42. — P. 97-103. [in Russian]