

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.134.38>

КРУГОВОРОТ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА В ПОЧВЕ

Обзор

Акимова А.С.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-3169-5944;

¹ Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (anastas.akimova2002[at]gmail.com)

Аннотация

Фосфор и его соединения являются жизненно важными веществами, необходимыми всем живым организмам, однако его избыток приводит к экологическим последствиям и патологиям у живых организмов. Его основными источниками поступления в глобальные циклы элементов являются процессы выветривания и эрозии горных пород, использование удобрений. В данной работе рассмотрен круговорот фосфора в почве, как составляющая глобального биогеохимического цикла круговорота фосфора в природе. Приведены основные минеральные и органические формы нахождения фосфора в почве. Представлен обзор информации о физико-химических процессах миграции и трансформации форм фосфора под действием бактерий, которым принадлежит ключевая роль при превращении одних форм фосфора в другие, и различных факторов, таких как состав почвы, pH, температура, влажность и режим аэрации.

Ключевые слова: почва, фосфор, трансформация фосфора, фосфатный режим, фосфатная буферность.

PHOSPHORUS CYCLE IN THE SOIL

Review article

Akimova A.S.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0003-3169-5944;

¹ Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russian Federation

* Corresponding author (anastas.akimova2002[at]gmail.com)

Abstract

Phosphorus and its compounds are vital substances required by all living organisms, but its excess leads to ecological consequences and pathologies in living organisms. Its main sources of input into global cycles of elements are the processes of weathering and erosion of rocks, use of fertilizers. This work examines the phosphorus cycle in soil as a component of the global biogeochemical cycle of phosphorus cycling in nature. The main mineral and organic forms of phosphorus in soil are given. A review of information on physicochemical processes of migration and transformation of phosphorus forms under the action of bacteria, which play a key role in the transformation of one form of phosphorus into another, and various factors such as soil composition, pH, temperature, humidity and aeration regime is presented.

Keywords: soil, phosphorus, phosphorus transformation, phosphate regime, phosphate buffering.

Введение

Фосфор относится к достаточно широко распространенным в природе химическим элементам. Из-за своей высокой химической активности в свободной форме не встречается в природе, а в виде различных соединений содержится в гидросфере и литосфере в виде фосфатов, преимущественно фосфата кальция, содержится в растениях и животных, а вот в атмосфере отсутствует полностью.

Фосфор является важным для живых организмов элементов, входя в состав костной ткани, белков, аденозинтрифосфата, ДНК и РНК. Работа мозга и сокращение мышечных тканей связаны с превращениями органических соединений фосфора в организме животных и человека. Для растений, особенно в вегетационный период и при молодом возрасте, фосфор играет по важности вторую роль после азота, участвуя во всех обменных процессах и регуляции дыхания растений, поддерживая процесс фотосинтеза [1], [2]. Кроме того, фосфор является важным элементом формирования корневой системы, бутонов и семян, ускоряет прорастание семян. Однако избыток фосфора является причиной загрязнения почвы, способствует эвтрофикации водоемов, может откладываться в тканях живых организмов и вызывать у них патологии [1], [3], [4].

В связи с этим важно проводить исследования и мониторинг за круговоротом фосфора в природе, особенно в агроэкосистемах. Необходимо учитывать особенности процессов трансформации форм фосфора в почвах различного состава и влияние различных факторов на процессы трансформации. Следует грамотно подбирать и рационально использовать удобрения и мелиоранты для корректировки фосфатного режима и равновесной концентрации фосфора в почве.

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

Круговорот фосфора

Круговорот фосфора является одним из биогеохимических циклов и включает в себя его миграцию через литосферу, гидросферу и биосферу в результате различных физико-химических процессов. Атмосфера практически не

участвует в круговороте фосфора в связи с тем, что фосфор и его соединения при обычных температуре и давлении остаются твердыми веществами. В наибольшем количестве фосфор в природе содержится в горных минералах, морских отложениях и гуано, важным источником фосфора является растительный опад [4], [5]. Из пород фосфор высвобождается в процессе их выветривания или при почвообразовании, вымывания или растворения, а морские отложения могут со временем выноситься на сушу в ходе тектонических процессов. В результате фосфор попадает в почву.

Круговорот фосфора в почве является частью глобального круговорота фосфора в природе и заключается в трансформации органических соединений фосфора, которые не усваиваются растениями, в неорганические фосфаты в результате деятельности фосфобактерий почвы. Фосфаты усваиваются растениями, которыми питаются животные, а после вместе с продуктами жизнедеятельности и в результате гниения растительных и животных останков органические соединения фосфора вновь попадают в почву.

Особенностями круговорота фосфора являются наименьшая замкнутость из-за выноса большого его количества в океан, в котором происходит его осаждение, и медленная скорость миграции фосфора через почву или океан. С развитием сельскохозяйственной деятельности масштабным источником поступления соединений фосфора в почву является применение фосфорсодержащих удобрений [1], [4], [6].

Содержание и формы фосфора в почве

Общее количество фосфора или валовый фосфор представляет собой общее содержание органических и минеральных соединений, которое в верхних горизонтах почвы в большинстве случаев выше, чем в нижних. Это связано с поступлением большей части фосфора через верхние слои и аккумулятивной функцией корневых систем растений и бактерий. В то же время концентрация фосфора повышается с увеличением степени дисперсности частиц, достигая максимума для частиц размером менее 1 мкм, составляющих так называемую илистую фракцию почвы [7].

При этом большая часть фосфора содержится в почве в минеральной форме в виде ортофосфатов, преимущественно минералов апатитовой группы: фторапатита $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]_3 \cdot \text{CaF}_2$ и гидроксилapatита $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$, плумбогумита $\text{PbAl}_3\text{N}(\text{OH})_6(\text{PO}_4)_2$, вавеллита $\text{Al}(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и вивианита $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ [8]. Эти соединения находятся в поглощенном комплексе почвы и являются основным источником фосфатного питания растений. При этом кальциевые соли фосфорной кислоты являются более растворимыми, а соли алюминия и железа менее растворимы и менее доступны растениям.

Большая часть органических соединений фосфора (до 50-80%) входит в состав гумуса, некоторая их часть содержится в плазме микроорганизмов [2]. Около 1% фосфора органической части почв сосредоточено в липидах, 2-3% – в нуклеиновых кислотах [8]. В результате разложения органических соединений фосфор в короткие сроки подвергается физико-химическому и биологическому поглощению, поэтому процессы вымывания фосфора практически отсутствуют. Однако сезонные процессы замораживания-оттаивания, а также засухи и наводнения разрушают структуру почвы и приводят к миграции фосфора вместе с поверхностным стоком [9], [10].

Процессы миграции и трансформации фосфора в почве

При поступлении фосфора в почву происходят процессы его биологической иммобилизации микроорганизмами, образования нерастворимых осадков фосфатов с двухвалентными металлами, оксидами и гидроксидами алюминия, железа, марганца и др., адсорбция фосфат-ионов на поверхности глинистых минералов, минеральных и органических коллоидов [1], [2], [4].

При этом в почве постоянно протекают процессы взаимопревращения органических и минеральных соединений фосфора, а большая часть соединений фосфора входит в состав комплексных органо-минеральных соединений.

Растения способны усваивать фосфор только из почвенного раствора, при этом для поддержания равновесия часть фосфора, адсорбированного в твердой фазе, переходит в почвенный раствор. На примере гидроксилapatита процесс растворения будет выглядеть следующим образом [1]:



К важным показателям, характеризующим процесс десорбции фосфора из твердой фазы является фосфатная буферность, т.е. способность почвы длительное время поддерживать определенную концентрацию фосфора в почвенном растворе для питания растений.

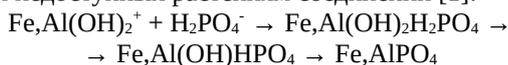
В то же время высокая способность почвы поглощать фосфор нежелательна для сельского хозяйства, т.к. адсорбированный фосфор становится недоступным для растений. Постоянно проходящие процессы мобилизации и иммобилизации фосфора формируют фосфатный фонд, являющийся резервом для питания растений. Равновесная концентрация фосфора является важнейшим показателем фосфатного режима почвы.

Легче в почвенный раствор переходят водорастворимые минеральные соединения, преимущественно гидрофосфаты и дигидрофосфаты, и соединения, растворимые в слабо-кислых средах, однако значительная часть почвенного фосфора входит в состав стабильных малорастворимых в почве соединений и практически недоступна для питания растений. К тому же минеральные фосфаты находятся в постоянном динамическом равновесии между различными формами и постоянно трансформируются из одной формы в другую с образованием метастабильных форм. Процесс трансформаций обычно идет в сторону образования менее растворимых соединений, например, при взаимодействии суперфосфата и карбоната кальция образуется слаборастворимый гидрофосфат [1]:

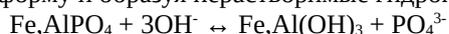


В то же время наблюдается тенденция, согласно которой при повышении содержания фосфора за счет удобрений в процессах трансформации образуется больше труднорастворимых и нерастворимых соединений, а при активном потреблении растениями фосфора сверх вносимых удобрений активизируются процессы трансформации с получением более растворимых и подвижных форм фосфора [11].

Влияние на эти процессы оказывает состав, pH, температура, режим аэрации и влажность почвы. Наибольшее влияние оказывает pH почвы, например, в кислых почвах гидроксиды железа и алюминия образуют с фосфат-ионами ряд слабо растворимых и практически недоступных растениям соединений [1]:

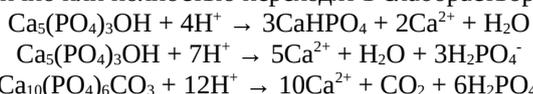


В то же время в щелочных почвах ионы OH^- вытесняют (замещают) ионы PO_4^- из аморфных фосфатов железа и алюминия, переводя их в растворимую форму и образуя нерастворимые гидроксиды [1]:

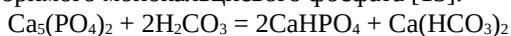


Это активизирует процессы мобилизации, может приводить к процессам выщелачивания и миграции фосфора, для предотвращения которых используют материалы для иммобилизации: глинистые минералы, биоуголь, полиакриламид, гуминовые вещества и др. [9], [12].

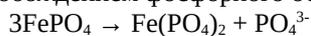
Кислотность почвы существенно влияет и на растворимость фосфатов кальция. Нерастворимые апатиты за счет присоединения ионов водорода частично или полностью переходят в слабо растворимые и растворимые фосфаты [1]:



Часть минеральных соединений фосфора могут растворяться под влиянием кислых продуктов метаболизма бактерий, например, диоксид углерода, выделяемый микроорганизмами при разложении органических веществ, способствует образованию водорастворимого монокальциевого фосфата [13]:



Режим аэрации оказывает значительное влияние на железосодержащие соединения фосфора, т.к. в анаэробных условиях Fe^{3+} восстанавливается до Fe^{2+} с освобождением фосфорного остатка [13]:



Заключение

Из представленного в работе материала следует, что в настоящее время в круговороте фосфора присутствуют две глобальных проблемы. Первой проблемой является вынос больших количеств фосфора в водные объекты, в т.ч. в мировой океан, где происходит осаждение. Это на долгое время выводит фосфор из биогеохимического цикла и уменьшает количество фосфора, участвующего в круговороте. Второй проблемой является в большинстве случаев нерациональное использование удобрений, приводящее к неравномерной фосфатизации суши и эвтрофикации водоемов при выносе в них избыточных количеств фосфора.

В настоящее время процессы трансформации и миграции фосфора при его круговороте в различных типах почв изучены достаточно широко и подробно. В последнее время дальнейшие исследования этих процессов проводятся для учета особенностей участия различных сельскохозяйственных растений в круговороте фосфора. Внимание также уделяется взаимосвязи круговоротов различных элементов в почве.

На основании накопленных и вновь получаемых знаний необходимо проводить грамотное и рациональное применение удобрений и иммобилизирующих фосфор материалов для снижения причин и последствий выявленных проблем. Учитывая и меняя параметры, оказывающие влияние на процессы трансформации соединений фосфора, можно повысить его содержание в доступных для питания растений формах для повышения урожайности и сохранения концентрации фосфора на оптимальном для сельскохозяйственной деятельности уровне.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

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.

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. Зайцева Г.А. Фосфор - как основной элемент в развитии растений полевого севооборота / Г.А. Зайцева, О.М. Яськова // Наука и Образование. — 2019. — № 4. — С. 158.
3. 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.
4. Ясинский Н.С. Закономерности формирования речного стока фосфора для целей гидрологического моделирования / Н.С. Ясинский, Ю.С. Даценко // Природообустройство. — 2018. — № 1. — С. 25-33.
5. Стадницкий Г.В. Экология: учебник для вузов / Г.В. Стадницкий. — Санкт-Петербург: Химиздат, 2001. — 288 с.
6. Давлятшин И.Д. Источники фосфора и оценка их вклада в подвижный фонд этого элемента в пахотных почвах в лесостепной зоне / И.Д. Давлятшин, А.А. Лукманов, М.И. Маметов // Достижения науки и техники АПК. — 2018. — № 32(4). — С. 21-24.
7. Карпова Д.В. Анализ состояния фосфора в агросерых почвах Владимирского ополья / Д.В. Карпова, Н.П. Чижикова, Н.А. Колобова, В.В. Кононенко // Агрохимический вестник. — 2016. — № 3. — С. 15-19.

8. Вайсман Я.И. Химия окружающей среды: учеб. пособие / Я.И. Вайсман, Т.В. Нурисламова, Л.В. Рудакова и др. — Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. — 325 с.
9. Zhao Y. Critical review on soil phosphorus migration and transformation under freezing-thawing cycles and typical regulatory measurements / Y. Zhao, Y. Li, F. Yang // *Science of The Total Environment*. — 2021. — Vol. 751. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141614.
10. Bi W. Research progress on the effects of droughts and floods on phosphorus in soil-plant ecosystems based on knowledge graph / W. Bi, D. Zhang, B. Weng et al. // *HydroResearch*. — 2023. — Vol. 6. — p. 29-35. — DOI: 10.1016/j.hydres.2023.01.001.
11. Афанасьев Р.А. Динамика подвижного фосфора в различных почвах / Р.А. Афанасьев, Г.Е. Мерзлая // *Плодородие*. — 2012. — № 3. — С. 16-18.
12. Peng Y. Interception of fertile soil phosphorus leaching with immobilization materials: Recent progresses, opportunities and challenges / Y. Peng, T. Zhang, B. Tang et al. // *Chemosphere*. — 2022. — Vol. 308. — Part 2. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136337.
13. Емцев В.Т. Сельскохозяйственная микробиология: учебник для вузов / В.Т. Емцев, Е.Н. Мишустин. — Москва: Юрайт, 2023. — 197 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Kidin V.V. *Agrohimija: uchebnik [Agrochemistry: Textbook]* / V.V. Kidin, S.P. Torshin. — Moscow: Prospekt, 2015. — 1033 p. [in Russian]
2. Zajtseva G.A. Fosfor - kak osnovnoj element v razvitii rastenij polevogo sevooborota [Phosphorus as the main element in the development and plants of field crop rotation] / G.A. Zajtseva, O.M. Rjaskova // *Science and Education*. — 2019. — № 4. — P. 158. [in Russian]
3. Filippova L.S. Zagrjaznenie pochvy i biologicheskie metody ee oчитki [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: doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.73. [in Russian]
4. Jasinskij N.S. Zakonomernosti formirovaniya rechnogo stoka fosfora dlja tselej gidrologičeskogo modelirovaniya [Regularities of the formation of phosphorus river runoff for the purposes of hydrological modeling] / N.S. Jasinskij, Ju.S. Datsenko // *Prirodoobustrojstvo [Environmental management]*. — 2018. — № 1. — P. 25-33. [in Russian]
5. Stadnitskij G.V. *Ekologija: uchebnik dlja vuzov [Ecology: textbook for universities]* / G.V. Stadnitskij. — Saint Petersburg: Himizdat, 2001. — 288 p. [in Russian]
6. Davljatshin I.D. Istochniki fosfora i otsenka ih vklada v podvizhnyj fond etogo elementa v pahotnyh pochvah v lesostepnoj zone [Sources of phosphorus and assessment of their contribution to the mobile fund of this element in arable soils in the forest-steppe zone] / I.D. Davljatshin, A.A. Lukmanov, M.I. Mametov // *Dostizhenija nauki i tehniki APK [Achievements of science and technology of agriculture]*. — 2018. — № 32(4). — P. 21-24. [in Russian]
7. Karpova D.V. Analiz sostojanija fosfora v agroseryh pochvah Vladimirskogo opol'ja [Analysis of the state of phosphorus in the agro-gray soils of the Vladimir Opole] / D.V. Karpova, N.P. Chizhikova, N.A. Kolobova, V.V. Kononenko // *Agrohimičeskij vestnik [Agrochemical Bulletin]*. — 2016. — № 3. — P. 15-19. [in Russian]
8. Vajsman Ja.I. *Himija okružhajuščej sredy: ucheb. posobie [Environmental Chemistry: Textbook]* / Ja.I. Vajsman, T.V. Nurislamova, L.V. Rudakova et al. — Perm: Publishing house of Perm State Technological University, 2010. — 325 p. [in Russian]
9. Zhao Y. Critical review on soil phosphorus migration and transformation under freezing-thawing cycles and typical regulatory measurements / Y. Zhao, Y. Li, F. Yang // *Science of The Total Environment*. — 2021. — Vol. 751. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141614.
10. Bi W. Research progress on the effects of droughts and floods on phosphorus in soil-plant ecosystems based on knowledge graph / W. Bi, D. Zhang, B. Weng et al. // *HydroResearch*. — 2023. — Vol. 6. — p. 29-35. — DOI: 10.1016/j.hydres.2023.01.001.
11. Afanas'ev R.A. Dinamika podvizhnogo fosfora v različnyh pochvah [Dynamics of mobile phosphorus in various soils] / R.A. Afanas'ev, G.E. Merzlaja // *Plodородие [Fertility]*. — 2012. — № 3. — P. 16-18. [in Russian]
12. Peng Y. Interception of fertile soil phosphorus leaching with immobilization materials: Recent progresses, opportunities and challenges / Y. Peng, T. Zhang, B. Tang et al. // *Chemosphere*. — 2022. — Vol. 308. — Part 2. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.136337.
13. Emtsev V.T. *Sel'skohozjajstvennaja mikrobiologija: uchebnik dlja vuzov [Agricultural microbiology: textbook for universities]* / V.T. Emtsev, E.N. Mishustin. — Moscow: Urait, 2023. — 197 p. [in Russian]