

**АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ,
ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ**
**AGROCHEMISTRY, AGRONOMIC SOIL SCIENCE,
PLANT PROTECTION AND QUARANTINE**

Научная статья

УДК: 631.416:631.816

EDN: YHYKIR

<https://doi.org/10.24412/2949-2211-2024-2-2-78-83>

МОБИЛИЗАЦИЯ ФОСФАТОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВНЕСЕНИИ УДОБРЕНИЙ

Кристина Юрьевна Разумова, Евгения Валерьевна Банецкая

Всероссийский научно-исследовательский институт сои, г. Благовещенск, Россия, rkyu@vniisoi.ru, bev@vniisoi.ru

Аннотация. В статье представлены результаты исследования, проведенного в длительном стационарном опыте ФГБНУ ФНЦ ВНИИ сои, заложенном в 1962–1964 гг. Были выбраны 5 вариантов, отличающихся по уровню обеспеченности почвы подвижным фосфором, сложившейся за 12 ротаций пятипольного соево-зернового севооборота. Цель исследования – изучение процесса микробиологической мобилизации фосфатов при внесении удобрений на фоне их длительного применения во взаимосвязи с урожайностью сои. Определена роль фосфатмобилизующих микроорганизмов в трансформации труднорастворимых соединений фосфора и обеспечении растений его доступными формами. В луговой чернозёмовидной почве отмечена высокая биодоступность фосфора в вариантах без применения удобрений и с использованием органоминеральной системы за счёт деятельности фосфатмобилизующих микроорганизмов, связанных с мобилизацией фосфатов Fe. Выявлено, что численность фосфатмобилизующих микроорганизмов, связанных с мобилизацией Al, в 38..46 раз ниже, чем количество микрофлоры, мобилизующей фосфаты Fe, что обосновано различной долей алюмофосфатов (21...26 %) и железофосфатов (51...54 %) в фракционном составе. Сделано предположение, что увеличение фосфатов, мобилизованных деятельностью микроорганизмов, служит источником формирования повышенной урожайности сои (2,28...2,52 т/га) даже без применения удобрений.

Ключевые слова: подвижный фосфор, фосфатаза, фосфатмобилизующие микроорганизмы, соя, длительное применение удобрений.

Для цитирования: Разумова К. Ю., Банецкая Е. В. Мобилизация фосфатов при длительном внесении удобрений // Агронаука. 2024. Том 2. № 2. С. 78–83. EDN: YHYKIR. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-2024-2-2-78-83>

Original article

MOBILIZATION OF PHOSPHATES DURING LONG-TERM FERTILIZATION

Kristina Y. Razumova, Evgenia V. Banetskaya

All-Russian Research Institute of Soybeans, Blagoveshchensk, Russia, rkyu@vniisoi.ru, bev@vniisoi.ru

Abstract. The article presents the results of a study conducted in the long-term stationary experiment of All-Russian Research Institute of Soybeans, founded in 1962–1964. 5 variants were selected, differing in the level of soil availability of mobile phosphorus, which developed over 12 rotations of the five-field soybean-grain crop rotation. The purpose of the study is to study the process of microbiological mobilization

© Разумова К. Ю., Банецкая Е. В., 2024

of phosphates during fertilization against the background of their long-term use in relation to soybean yield. The role of phosphate-mobilizing microorganisms in the transformation of insoluble phosphorus compounds and providing plants with its available forms has been determined. In meadow chernozem soil, high bioavailability of phosphorus was noted in variants without the use of fertilizers and using an organomineral system due to the activity of phosphate-mobilizing microorganisms associated with the mobilization of Fe phosphates. It was revealed that the number of phosphate-mobilizing microorganisms associated with the mobilization of Al is 38...46 times lower than the number of microflora mobilizing Fe phosphates, which is justified by the different proportion of aluminophosphates (21...26 %) and iron phosphates (51...54 %) in the fractional composition. It is assumed that an increase in phosphates mobilized by the activity of microorganisms serves as a source of formation of increased soybean yields (2.28...2.52 t/ha) even without the use of fertilizers.

Keywords: mobile phosphorus, phosphatase, phosphate-mobilizing microorganisms, soy, long-term use of fertilizers.

For citation: Razumova KY, Banetskaya EV. Mobilizatsiya fosfatov pri dlitel'nom vnesenii udobrenii [Mobilization of phosphates during long-term fertilization]. *Agronauka. Agrosience*. 2024;2:2:78–83. (in Russ.) EDN: YHYKIR. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-2024-2-2-78-83>

Введение

Фосфор является одним из важнейших макроэлементов, необходимых для роста растений. В условиях Амурской области, где почвы богаты калием [1], содержание фосфора в почве является практически лимитирующим фактором для сои, способной до 80 % обеспечивать себя азотом [2]. Несмотря на то, что значительную часть растворимых неорганических фосфатов вносят в почву в виде минеральных удобрений, они достаточно быстро иммобилизуются и становятся недоступными для растений [3]. В связи с этим продуктивность сои часто не коррелирует с наличием подвижного фосфора в почве, и внесение фосфорных удобрений не всегда приводит к желаемым результатам [4]. Извлечь доступный фосфор из общего почвенного фосфорного пула могут почвенные микроорганизмы путём солубилизации за счёт выделения кислых метаболитов и фосфатаз [5]. Фосфатазная активность почвы играет важную роль в качестве фактора, влияющего на доступность

фосфора для растений. Она отвечает за гидролиз фосфатов и обеспечивает их обмен и мобилизацию [6].

Цель исследования – изучение процесса микробиологической мобилизации фосфатов при внесении удобрений на фоне их длительного применения во взаимосвязи с урожайностью сои.

Условия, материалы и методы

Исследования проводили в длительном стационарном опыте с удобрениями, заложенном в 1962–1964 гг. Опыт включает в себя контроль (без удобрений) и 8 вариантов применения различных доз удобрений. Были выбраны 5 вариантов, отличающихся по уровню обеспеченности почвы подвижным фосфором, сложившейся за 12 ротаций пятипольного соево-зернового севооборота: овёс – соя – пшеница – соя – пшеница (таблица 1). В 2022 году проводили исследование в посевах сои сорта Сентябринка, идущей четвёртой культурой севооборота, в 2023 году – второй.

Таблица 1 – Схема опыта

Table 1 – Experiment scheme

Вариант	Среднегодовая доза удобрений на 1 га севооборотной площади	Внесено удобрений под сою в 2022 г., кг д. в./га	Внесено удобрений под сою в 2023 г., кг д. в./га
1	Контроль (без удобрений)	–	–
2	P ₃₀	–	P ₆₀
4	N ₂₄ P ₃₀	P ₆₀	N ₃₀ P ₆₀
6	N ₄₂ P ₄₈	–	N ₆₀ P ₉₀
9	N ₂₄ P ₃₀ + навоз 4,8 т	P ₆₀ + навоз 12 т	N ₃₀ P ₆₀

Почва опытного участка – луговая чернозёмовидная маломощная в комплексе со среднемощной. Отбор почвенных образцов проводили с глубины пахотного слоя (0...20 см) по фазам развития сои (классификация W. R. Fehr): полное цветение (R_2), начало образования бобов (R_3) и формирование бобов (R_4). Численность фосфатмобилизующих микроорганизмов (ФММ) определяли методом посева на глюкозоаспарагиновый агар Муромцева с внесением фосфатов Fe и Al методом осаждения, предложенным Герретсеном в модификации Муромцева [7]. Определение активности нейтральной фосфатазы проводили методом гидролиза фенолфталеин фосфата [8], степени подвижности фосфора – методом Н. П. Карпинско-

го и В. Б. Замятиной [9]. Учёт урожая сои выполняли методом сплошного обмолота комбайном с учётной площади делянки.

Результаты и обсуждение

В результате проведённых исследований выявлено, что содержание наиболее доступных для растений фосфат-ионов, экстрагируемых в $0,03\text{ N K}_2\text{SO}_4$, соответствовало уровню обеспеченности почвы фосфором, сложившейся в результате 60-летнего применения удобрений. При этом доза вносимых удобрений практически не оказывала влияния на этот показатель. Так, во 2 варианте опыта степень подвижности фосфора составила $0,086\text{ мг/л}$, как при внесении P_{60} в 2023 году, так и при отсутствии удобрений в 2022-м (рисунок 1).

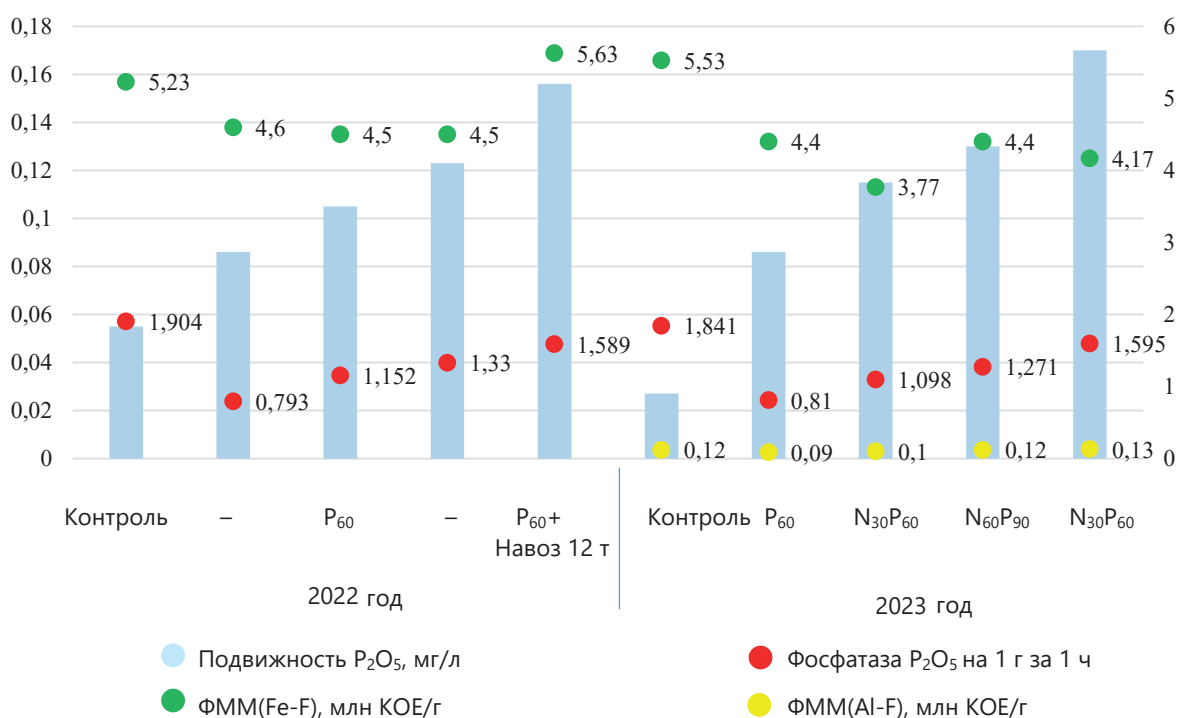


Рисунок 1 – Показатели фосфатного состояния луговой чернозёмовидной почвы при длительном внесении удобрений: шкала слева (столбцы) – степень подвижности фосфора, шкала справа (точки) – фосфатаза и численность фосфатмобилизующих микроорганизмов, трансформирующих фосфаты железа и алюминия

Figure 1 – Indicators of the phosphate state of meadow chernozem-like soil during long-term application of fertilizers: the scale on the left (columns) is the degree of mobility of phosphorus, the scale on the right (dots) is phosphatase and the number of phosphate-mobilizing microorganisms that transform iron and aluminum phosphates

Численность микроорганизмов, мобилизующих фосфаты Fe и активность фосфатазы показали, схожую тенденцию, однако контрольный вариант значительно отличал-

ся. При наименьшем количестве доступных фосфат-ионов ($0,027...0,055\text{ мг/л}$) развитие микроорганизмов и ферментативная активность были наибольшими, а при повыше-

нии его содержания от внесения удобрений, наоборот, снижались на 12...58 %. Это подтверждает концепцию других исследователей [10] о том, что почвенная микрофлора в условиях избытка доступного фосфора снижает выработку фосфатаз, а при его недостатке, напротив, усилено производит их для более эффективного превращения труднодоступных форм фосфора в легкодоступные минеральные формы. Однако при совместном внесении органических и минеральных удобрений (9 вариант в 2022 году) численность ФММ оставалась высокой даже на фоне большого количества доступного фосфора. По-видимому, внесение навоза активизирует работу по мобилизации органофосфатов, постепенно и более длительно переходящих в лабильные формы.

Исследования показали, что в луговой чернозёмовидной почве численность ФММ, связанных с мобилизацией Al, в 38...46 раз ниже, чем количество микрофлоры, мобилизующей фосфаты Fe. Это обосновано тем, что доля алюмофосфатов в фракционном составе достигает 21...26 %, тогда как железозфосфаты занимают 51...54 %. Немаловажным является и тот факт, что по сравнению со второй ротацией севооборота процент алюмофосфатов увеличился в 2...3 раза,

между фосфатами железа и алюминия произошла перегруппировка, связанная с изменяющимися почвенными условиями под действием химических, физико-химических и биологических процессов [11]. Исходя из этого, можно предположить, что в течение некоторого времени возможна перестройка пула фосфатмобилизующих микроорганизмов для трансформации увеличивающегося количества алюмофосфатов, и их вклад в обеспечение растений доступным фосфором станет существенно больше.

Урожайность сои в исследуемые годы не показала прямой зависимости от вносимых удобрений или наличия доступных форм фосфора (рисунок 2). Достаточно высокий уровень урожайности сформировался в контрольном варианте, в среднем 2,40 т/га, тогда как при внесении и последствии длительного применения удобрений он составил 2,51 т/га с варьированием от 2,23 до 2,67 т/га. Полученные данные урожайности сои и степени подвижности фосфора в почве указывают на важность способности ФММ снабжать растения доступными формами фосфора в процессе жизнедеятельности, что обеспечивает хороший уровень фосфорного питания даже без применения минеральных удобрений.

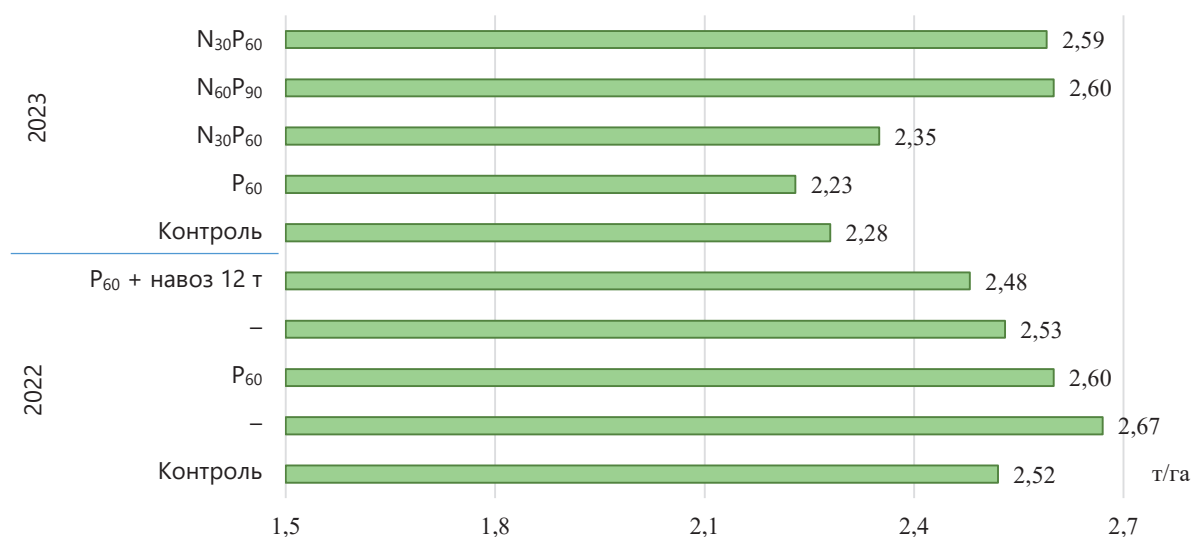


Рисунок 2 – Урожайность сои сорта Сентябринка при внесении удобрений на фоне их длительного применения, т/га
Figure 2 – Yield of soybean variety Sentyabrinka when applying fertilizers against the background of their long-term use, t/ha

Выводы

В луговой чернозёмовидной почве отмечена высокая биодоступность фосфора за счёт деятельности фосфатмобилизующих микроорганизмов. Наибольшая их биологическая активность, связанная с мобилизацией фосфатов железа, отмечена под посевами сои в вариантах без применения удобрений и с использованием органоминеральной системы. Увеличение мобилизованных та-

ким образом фосфатов послужило источником формирования повышенной урожайности сои (2,28...2,52 т/га) даже без внесения удобрений. Следовательно, ключевая роль в формировании высокой урожайности сои на неудобренном фоне принадлежит активной деятельности почвенной микрофлоры, мобилизующей труднорастворимые формы фосфора.

Список источников

1. Калийный режим чернозёмовидной почвы при разных системах удобрения в севообороте / В. Ф. Прокопчук, А. В. Науменко, О. А. Пилецкая, Е. В. Банецкая // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития: материалы всероссийской научно-практической конференции Благовещенск: Издательство Дальневосточного гос. аграрного университета. 2018. С. 17–20.
2. Синеговская В. Т. Посевы сои в Приамурье как фотосинтезирующие системы / Благовещенск: Государственное производственно-коммерческое издательство «Зея», 2005. 120 с.
3. Афанасьев Р. А., Мерзлая Г. Е. Динамика подвижных форм фосфора и калия в почвах длительных опытов // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2013. № 3. С. 30–33.
4. Синеговская В. Т., Наумченко Е. Т. Зависимость урожайности сои от эколого-агрохимических факторов // Российская сельскохозяйственная наука. 2019. № 3. С. 16–18. <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019316-18>
5. Phosphate-solubilising-microorganisms (PSM) for improved crop productivity: A critical assessment / N. S. Raymond, B. Gómez-Muñoz, F. J. T. van der Bom, O. Nybroe, L. S. Jensen, D. S. Müller-Stöver [et al.] // New Phytologist. 2021. № 229. P. 1268–1277. <https://doi.org/10.1111/nph.16924>
6. Пилецкая О. А., Прокопчук В. Ф. Фосфатный режим и фосфатазная активность чернозёмовидной почвы // Вестник КрасГАУ. 2014. № 8. С. 47–50.
7. Методы почвенной микробиологии и биохимии: учебное пособие. Под редакцией Д. Г. Звягинцева. Москва: Издательство МГУ, 1991. 304 с.
8. Малахов С. Г. Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв. Москва: Московское отделение гидрометеоздата, 1984. 32 с.
9. Агрохимические методы исследования почв. Ответственный редактор А. В. Соколов. Москва: «Наука», 1975. 656 с.
10. Влияние гуминовых препаратов на содержание подвижного фосфора и активность фосфатазы в черноземе обыкновенном под посевами озимой пшеницы / О. И. Наими, М. Н. Дубинина, В. А. Матюгин, В. А. Лыхман, А. В. Гринько // Земледелие. 2023. № 5. С. 32–36. <https://doi.org/10.24412/00443913-2023-5-32-36>
11. Наумченко Е. Т., Разумова К. Ю. Степень агрогенного воздействия на фосфатный режим луговой чернозёмовидной почвы // Плодородие. 2022. № 2. С. 40–43. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.125.10>

References

1. Prokopchuk VF, Naumenko AV, Piletskaya OA, Banetskaya EV. Kaliyniy rezhim chernozemovidnoi pochvy pri raznykh sistemakh udobreniya v sevooborote [Potassium regime of chernozem-like soil under different fertilization systems in crop rotation]. *Agropromyshlennyy kompleks: problemy i perspektivy razvitiya: materialy vserossiiskoi nauchno prakticheskoi konferentsii Blagoveshchensk: Izdatel'stvo Dal'nevostochnogo gos. agrarnogo universiteta. Agro-industrial complex: problems and development prospects: materials of the All-Russian scientific and practical conference Blagoveshchensk: Far Eastern State Publishing House. Agrarian University*. 2018;17–20. (in Russ.).
2. Sinegovskaya VT. *Posevy soi v Priamur'e kak fotosinteziruyushchie sistemy [Soybean crops in the Amur region as photosynthetic systems]*. Blagoveshchensk: State production and commercial publishing house "Zeya", 2005;120 p. (in Russ.).
3. Afanas'ev RA, Merzlaya GE. Dinamika podvizhnykh form fosfora i kaliya v pochvakh dlitel'nykh opytov [Dynamics of mobile forms of phosphorus and potassium in soils of long-term experiments]. *Doklady Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk. Reports of the Russian Academy of Agricultural Sciences*.

2013;3:30–33. (in Russ.).

4. Sinogovskaya VT, Naumchenko ET. Zavisimost' urozhainosti soi ot ekologo-agrokhimicheskikh faktorov [Dependence of soybean yield on environmental and agrochemical factors]. *Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka. Russian Agricultural Science*. 2019;3:16–18. (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S2500-26272019316-18>

5. Raymond NS, Gómez-Muñoz B, Van der Bom FJT, Nybroe O, Jensen LS, Müller-Stöver DS. [et al.] Phosphate-solubilising-microorganisms (PSM) for improved crop productivity: A critical assessment. *New Phytologist*. 2021;229:1268–1277. <https://doi.org/10.1111/nph.16924>

6. Piletskaya OA, Prokopchuk VF. Fosfatnyi rezhim i fosfataznaya aktivnost' chernozemovidnoi pochvy [Phosphate regime and phosphatase activity of chernozem-like soil]. *Vestnik KrasGAU. Bulletin of KrasGAU*. 2014;8:47–50. (in Russ.).

7. Zvyagintseva DG. (eds.). *Metody pochvennoi mikrobiologii i biokhimii: Uchebnoe posobie [Methods of soil microbiology and biochemistry: Textbook]*. Moscow: Izdatel'stvo MGU, 1991. 304 p. (in Russ.).

8. Malakhov SG. *Vremennye metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu zagryazneniya pochv [Temporary methodological recommendations for monitoring soil pollution]*. Moscow: Moskovskoe otdelenie gidrometeoizdata, 1984. 32 p. (in Russ.).

9. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv [agrochemical methods of soil research]*. Otvetstvennyi redaktor AV. Sokolov. Moscow: "Nauka", 1975. 656 p. (in Russ.).

10. Naimi OI, Dubinina MN, Matyugin VA, Lykhman VA, Grin'ko AV. Vliyanie guminovykh preparatov na sodержanie podvizhnogo fosfora i aktivnost' fosfatazy v chernozeme obyknovennom pod posevami ozimoi pshenitsy [The influence of humic preparations on the content of available phosphorus and phosphatase activity in ordinary chernozem under winter wheat crops]. *Zemledelie. Agriculture*. 2023;5:32–36. (in Russ.). https://doi.org/10.24412/0044_3913-2023-5-32-36

11. Naumchenko ET, Razumova KYu. Stepen' agrogenogo vozdeistviya na fosfatnyi rezhim lugovoi chernozemovidnoi pochvy [The degree of agrogenic influence on the phosphate regime of meadow chernozem-like soil]. *Plodorodie. Fertility*. 2022;2:40–43. (in Russ.). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2022.125.10>

Информация об авторах

К. Ю. Разумова – мл. науч. сотр.;

Е. В. Банецкая – канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.

Information about the authors

K.Y. Razumova – Junior Researcher;

E. V. Banetskaya – Cand. Agr. Sci., Researcher

**Статья поступила в редакцию 15.04.2024;
одобрена после рецензирования 06.05.2024;
принята к публикации 10.05.2024**

**The article was submitted 15.04.2024;
approved after reviewing 06.05.2024;
accepted for publication 10.05.2024**