

УДК 631.459

**АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ
МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФОСФОРИТОВ
ВЕРХНЕКАМСКИХ БЕДНЫХ**

Ашихмина Т. Я., доктор технических наук, профессор^{1,2}

E-mail: usr08619@vyatsu.ru

Кондакова Л. В., доктор биологических наук, профессор^{1,2}

E-mail: usr11521@vyatsu.ru

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Вятский государственный университет», г. Киров, Россия

²Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН,
г. Сыктывкар, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты лабораторных исследований нового вида продукции агрохимического назначения – «Фосфоритов Верхнекамских бедных» (ФВБ), производимых на основе глауконитсодержащих хвостов обогащения желваковых фосфоритов Вятско-Камского месторождения. Результаты исследований показали, что внесение молотых ФВБ в кислую дерново-подзолистую почву приводит к повышению содержания подвижных форм фосфора, снижению рН, уменьшению подвижности Ni, накоплению связанных форм азота (NO₃⁻). Обогащение почвы азотом может быть обусловлено положительным влиянием ФВБ на почвенные фототрофные микроорганизмы. Наибольший отклик на внесение ФВБ получен со стороны цианобактерий, чувствительных к содержанию фосфора и уровню кислотности почвы. Видовое разнообразие этих микроорганизмов в варианте с добавкой ФВБ в норме 0,5 г/кг увеличилась на 50 %.

Ключевые слова: агроэкология, натуральные удобрения, фосфориты Верхнекамские бедные, глаукониты, свойства почвы, альгоцианофлора

**AGROECOLOGICAL ASPECTS OF USING MINERAL FERTILIZERS
BASED ON POOR PHOSPHORITES OF VERKHNEKAMSK**

Ashikhmina T. Ya., doctor of biological sciences, professor^{1,2}

Kondakova L. V., doctor of biological sciences, professor^{1,2}

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education
«Vyatka State University», Kirov, Russia

²Institute of Biology of Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia

Annotation. The article presents the results of laboratory studies of a new type of agrochemical products – «Verkhnekamsk poor phosphorites» (VPP), produced on



the basis of glauconite-containing tailings of the enrichment of nodular phosphorites of Vyatka-Kama deposit. The results of the research have shown that the introduction of the ground VPP into the acidic sod-podzolic soil leads to an increase in the content of mobile forms of phosphorus, a decrease in pH, a decrease of Ni mobility and the accumulation of bound forms of nitrogen (NO_3^-). Soil enrichment with nitrogen may be due to the positive effect of VPP on soil phototrophic microorganisms. The best response to introducing the VPP has been obtained from the cyanobacteria sensitive to phosphorus content and soil acidity. The species diversity of these microorganisms in the variant with the addition of VPP in the norm of 0.5 g / kg increased by 50 %.

Keywords: agroecology, natural fertilizers, poor Verkhnekamsk phosphorites, glauconites, soil properties, algocyanoflora

Введение. В число приоритетных задач, решаемых агроэкологической наукой на современном этапе, входит разработка и внедрение эффективных аграрных систем, позволяющих обеспечить получение высококачественной и безопасной сельскохозяйственной продукции, а также минимизация отрицательного воздействия сельскохозяйственного производства на окружающую среду. Успешное решение соответствующих задач невозможно без снижения негативного воздействия на обрабатываемые почвы, приводящего к химическому загрязнению, утрате плодородия, подавлению супрессивности [3, 5, 6]. Существенный вклад в химическое загрязнение почв вносят широко используемые органические и минеральные удобрения [7, 8, 15], в частности удобрения, получаемые из фосфатного сырья с высоким содержанием тяжелых металлов (ТМ) [10]. Неблагоприятный химический состав, обуславливающий риск повышенного содержания токсичных элементов в удобрениях, характерен для фосфоритов, добываемых в большинстве стран, обладающих крупнейшими запасами соответствующего сырья (Марокко, Сенегал, Тунис, Алжир и др.) [10, 14]. Ограничения, вводимые многими странами на применение фосфорных удобрений с повышенным содержанием Cd, повысили интерес к производству фосфорных удобрений из сырья с низким содержанием соответствующего элемента. К такому сырью можно отнести фосфориты крупнейшего в Европе и



РФ Вятско-Камского месторождения (промышленный тип руды – конкреционный). Добычей, обогащением и переработкой руды в минеральные удобрения занималось предприятие ООО «Верхнекамский фосфоритный рудник», расположенное в поселке Рудничный. Массовая доля (%) фосфора (P_2O_5) – до 6-7; калия (K_2O) – до 3; S – 2. Содержание Cd – 0,16-0,25 мг/кг, т. е. не более 4-5 мг на 1 кг P_2O_5 . Химический и минералогический состав эфелей свидетельствует о значительной агрохимической ценности соответствующего материала, что подтверждается результатами экспериментальных исследований [2, 9]. В 2020 г. были разработаны технические условия ТУ 08.91.19-002-85629294-202 на новый вид продукции агрохимического назначения «Фосфориты Верхнекамские бедные» (ФВБ), производимые путем экскавации эфелей. Основное назначение ФВБ – улучшения свойств почвы, изготовление органоминеральных удобрений и почвогрунтовых смесей. Переработка ХОФ в товарные продукты представляет большой интерес как в плане вывода на рынок нового натурального фосфорного удобрения, так и в плане повышения эффективности использования добываемого фосфатного сырья. Исследование и научное обоснование перспектив использования соответствующего продукта в агрохимии является актуальным и практически значимым.

Цель работы – выявить основные направления трансформации химического состава почвы и почвенной азотфиксирующей микробиоты под влиянием различных норм ФВБ.

Материалы и методы исследований. Для проведения исследований использовали ФВБ, соответствующие ТУ 08.91.19-002-85629294-202. ФВБ вносили в почву в молотом виде (МФВБ). Перед использованием МФВБ просеивали через сито с размером ячейки 0,18 мм. Согласно результатам химического анализа, массовая доля (%) P_2O_5 в МФВБ составляла $5,8 \pm 0,6$; K_2O – $3,5 \pm 0,5$; S (общая) – $1,8 \pm 0,2$; CaO – $12,0 \pm 2,2$; Fe_2O_3 – $14,0 \pm 1,8$. Содержание ТМ и мышьяка (мг/кг): Cu – 180 ± 4 ; Zn – 110 ± 6 ; Cd – $0,18 \pm 0,02$;



Pb – $1,9 \pm 0,2$; As – $0,55 \pm 0,03$. Элементный состав МФВБ определяли по методике НСАМ 499-ЭАС/МС «Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным и масс-спектральным методами анализа». Другие методы исследования представлены в таблице 1.

Для изучения влияния МФВБ на содержание в почве основных элементов питания и подвижных (биодоступных) форм ТМ использовали пробы почвы, отобранные на территории г. Кирова вблизи крупного промышленного предприятия и автомобильной магистрали. Глубина отбора проб – 0-20 см. Гранулометрический состав – средний суглинок (определен мокрым методом по Н. А. Качинскому), содержание органического вещества – 3,4 % (определено по ГОСТ 26213-91 методом И. В. Тюрина в модификации ЦИНАО). Отобранные образцы почвы высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали, вносили МФВБ (2 г/кг), перемешивали, помещали в пластиковые контейнеры и добавляли дистиллированную воду (до влажности 70 ± 5 % от полной влагоемкости). Контейнеры размещали в лабораторном помещении. Освещение – естественное, температура – $21 \pm 2^\circ\text{C}$, время наблюдений – 14 суток. Контролем служили образцы почвы без добавок МФВБ.

Для оценки различных норм ФВБМ на почвенную альгоцианофлору (фототрофные микроорганизмы) применяли субстрат (агрозем) с содержанием P_2O_5 – 122 ± 15 % мг/кг; K_2O – 118 ± 10 мг/кг; гумуса $5,1 \pm 0,6$ %; pH_{KCl} – $6,6 \pm 0,2$; сумма поглощенных оснований – $22,3 \pm 2,2$ ммоль/100 г. В субстрат вносили разные нормы МФВБ согласно вариантам эксперимента. Инкубацию культур проводили при дневном освещении и в люминостате. Определение видового состава микроводорослей выполняли методами прямого микроскопирования изучаемых образцов, постановкой водных и чашечных культур со «стеклами обрастания». Прямым микроскопированием определяли виды, которые массово развивались на поверхности субстрата.

Варианты эксперимента:



- 1) субстрат без добавок (контроль);
- 2) субстрат + МФВБ (1,0 г/кг);
- 3) субстрат + МФВБ (0,5 г/кг);
- 4) субстрат + МФВБ (0,2 г/кг).

Исследования проводили в лабораторных условиях в трехкратной повторности. Статистическую обработку выполняли стандартными методами на базе встроенного пакета программ Excel, STATISTICA 10.

Результаты исследований. Результаты эксперимента показали, что внесение МФВБ оказывает положительное влияние на важнейшие агрохимические характеристики почвы (таблица 1).

Таблица 1 – Химический состав почвы

Показатель	Значение показателя		Методы анализа
	контроль	эксперимент	
pH _{KCl}	4,5±0,1	5,0±0,1*	ионометрический по ГОСТ 26483-85
P ₂ O ₅ (подв.), мг/кг	186±18	250±30	спектрофотометрический по ГОСТ Р 54650-2011
K ₂ O(подв.), мг/кг	120±8	121±10	
NO ₃ ⁻ , мг/кг	39,0±4,2	58,4±4,8	ионометрический по ГОСТ 26951-86
Cd, мг/кг	0,08±0,02	0,05±0,01	атомно-абсорбционный метод с помощью спектрометра ААС «Спектр-5-4»
Pb, мг/кг	4,88±1,22	3,65±0,72	
Cu, мг/кг	2,44±0,63	2,08±0,54	
Zn, мг/кг	17,8±4,2	18,8±4,6	
Ni, мг/кг	1,24±0,24	0,50±0,12	
Каталазная активность, мл O ₂ за 1 мин	1,4±0,1	2,4±0,5	по Ф. Х. Хазиеву

Примечание: * жирным шрифтом выделены статистически значимые различия между контролем и экспериментом ($p < 0,5$).

Согласно полученным результатам делаем вывод, что под влиянием МФВБ наблюдается статистически значимое повышение содержания подвижных форм фосфора, накопление связанных форм азота (нитратов), увеличение каталазной активности, снижение подвижности Ni и уменьшение обменной кислотности. Источником фосфора являются содержащиеся в МФВБ



фосфаты. Повышению рН способствуют известковые компоненты. Увеличение содержания нитратов в почве может быть обусловлено положительным влиянием вносимого агрохимиката на активность почвенных микрофототрофов, что подтверждается экспериментальными данными, приведенными в таблице 2. Полученные данные хорошо согласуются с результатами ранее выполненных исследований [4].

Таблица 2 – Влияние фосфоритов Верхнекамских бедных на отдельные группы почвенных микрофототрофов

Вариант	<i>Cyanobacteria</i>		<i>Xanthophyta</i>		<i>Chlorophyta</i>		<i>Eustigmatophyta</i>		<i>Euglenophyta</i>		<i>Bacillariophyta</i>		Всего
	1*	2**	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
1	8	29,6	3	11,2	7	25,9	1	3,7	1	3,7	7	25,9	27
2	9	37,5	2	8,3	6	20,8	1	4,2	1	4,0	6	24,0	23
3	12	36,4	3	9,1	9	27,3	1	3,0	1	3,0	7	21,2	33
4	8	33,3	2	8,3	8	32,0	0	0	1	4,0	6	24,0	24
Всего	14	36,8	4	10,5	10	24	2	5,2	1	2,6	7	18,5	38

Примечание:* 1 – число видов, выявленных в варианте;

** 2 – доля от общей численности выявленных в соответствующем варианте видов.

Анализ видового разнообразия по таксономическим группам показывает, что на реализацию видового потенциала почвенных микрофототрофов существенное влияние оказывает доза вносимых МФВБ. Наиболее отзывчивыми на МФВБ оказались цианобактерии, чувствительные к содержанию доступных форм фосфора и кислотности почвы. По сравнению с контролем число видов этих микроорганизмов в варианте 3 (норма МФВБ – 0,5 г/кг) выросло на 50 %. Увеличение видового разнообразия ЦБ способствует повышению плодородия почвы, поскольку фототрофные микроорганизмы,



являющиеся первичными продуцентами, вносят важный вклад в функционирование наземных экосистем. Благодаря способности к фиксации атмосферного азота и кислородному фотосинтезу соответствующие микроорганизмы принимают активное участие в биогеохимических циклах важнейших биогенных элементов – азота, углерода и фосфора [1, 11-13]. Вместе с тем следует иметь в виду, что зависимость между видовым разнообразием и нормой внесения МФВБ не является линейной. Высокие дозы МФВБ могут оказать негативное влияние на почвенную микробиоту. Соответствующий эффект отчетливо проявлялся в отношении представителей *Cyanobacteria* и *Chlorophyta*. Наименее чувствительными к МФВБ оказались *Euglenophyta* и *Bacillariophyta*. Выявленный факт требует дополнительных исследований.

Заключение. Комплекс выполненных лабораторных исследований свидетельствует о том, что фосфориты Верхнекамские бедные являются ценным сырьем для производства натуральных удобрений, оказывающих положительное влияние на содержание в почве доступных для растений фосфатов. Внесение в почву МФВБ способствует снижению кислотности, уменьшению подвижности Ni, накоплению связанных форм азота. Основную роль в обогащении почвы азотом играют отзывчивые на фосфор почвенные микрофототрофы. Вовлечение в промышленную переработку огромных запасов глауконитсодержащих хвостов обогащения фосфоритов может внести значимый вклад в развитие экономики региона.

Список источников

1. Бачура Ю. М., Ганжур Е. Н. Культивирование цианобактерий родов *Anabaena* и *Nostoc* на различных питательных средах // Бюллетень науки и практики. 2018. № 11. С. 31-38.



2. Влияние глауконитсодержащих хвостов обогащения фосфоритов на подвижность свинца в почвах / Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор. DOI 10.35885/1684-7318-2022-3-350-360 // Поволжский экологический журнал. 2022. № 3. С. 350-360.
3. Влияние навозных стоков на почвенные фототрофные микроорганизмы / Л. В. Кондакова, Н. В. Сырчина, Л. В. Пилип, И. А. Кондакова. DOI 10.25750/1995-4301-2023-2-190-197 // Теоретическая и прикладная экология. 2023. № 2. С. 190-197.
4. Кондакова Л. В., Сырчина Н. В., Ашихмина Т. Я. Влияние хвостов обогащения фосфоритов, используемых в качестве удобрения, на почвенные альго-цианобактериальные сообщества. DOI 10.25750/1995-4301-2021-4-174-180 // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 4. С. 174-180.
5. Маркина Е. О., Григорьев В. В., Сырчина Н. В. Влияние различных добавок на подвижность тяжелых металлов в почвах // Экология родного края: проблемы и пути решения : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров, 2016. С. 87-90.
6. Пилип Л. В., Сырчина Н. В., Кузнецов Д. А. Животноводческие комплексы как источники загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (Cu, Zn). DOI 10.15393/j1.art.2023.13182 // Принципы экологии. 2023. № 1 (47). С. 82-89.
7. Сырчина Н. В., Пилип Л. В., Ашихмина Т. Я. Химическая деградация земель под воздействием отходов животноводства. DOI 10.25750/1995-4301-2022-3-219-225 // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 3. С. 219-225.
8. Трансформация микробиоты отходов животноводства под влиянием химических реагентов для устранения запаха / Е. П. Колеватых, Л. В. Пилип, Н. В. Сырчина, В.А. Козвонин, Т. Я. Ашихмина. DOI 10.25750/1995-4301-2022-4-159-165 // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 159-165.



9. Хвосты обогащения фосфоритов Вятско-Камского месторождения как вторичные материальные ресурсы для производства натуральных удобрений / Н. В. Сырчина, Н. Н. Богатырева, Т. Я. Ашихмина, Г. Я. Кантор. DOI 10.25750/1995-4301-2021-2-107-114 // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 2. С. 107-114.
10. Cd content in phosphate fertilizer: which potential risk for the environment and human health? / N. A. Suciu, R. De Vivo, N. Rizzati, E. Capri // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2022. V. 30. P. 100392. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>
11. Mukherjee C., Chowdhury R., Ray K. Phosphorus recycling from an unexplored source by polyphosphate accumulating microalgae and cyanobacteria – A step to phosphorus security in agriculture // Frontiers in microbiology. 2015. V. 6. P. 1421.
12. Mutale-Joan C., Sbabou L., Hicham E. A. Microalgae and cyanobacteria: how exploiting these microbial resources can address the underlying challenges related to food sources and sustainable agriculture: a review // Journal of Plant Growth Regulation. 2023. V. 42, № 1. P. 1-20.
13. New environment for aerobic anoxygenic phototrophic bacteria: biological soil crusts / J. T. Csotonyi, J. Swiderski, E. Stackebrandt, V. A. Yurkov // Environmental Microbiology Reports. 2010. V. 2, № 5. P. 651-656.
14. Uptake of heavy metal in wheat from application of different phosphorus fertilizers / N. Siddque, S. Waheed, Q. Uz Zaman [and others] // Journal of Food Composition and Analysis. 2023. V. 115. P. 104958. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104958>.
15. Zhang Q., Wang C. Natural and human factors affect the distribution of soil heavy metal pollution: a review // Water, air, & soil pollution. 2020. V. 231. P. 1-13. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04728-2>.

