

Научная статья

УДК 631.859

Код ВАК: 4.1.3

doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-48-57

**ОЦЕНКА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ
ОБЕСФТОРЕННОГО ФОСФОГИПСА В КАЧЕСТВЕ УДОБРЕНИЯ
В ПОСЛЕДЕЙСТВИИ****П.В. Агапова¹, М.В. Киселёв¹ ✉, И.А. Фрейдкин¹**¹ Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
г. Пушкин, г. Санкт-Петербург, Россия
✉ kiselev@spbgau.ru

Реферат. Важная отрасль переработки природных фторapatитов – производство экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК). Более 95% полученной ЭФК используется для производства минеральных фосфорных удобрений, в том числе фосфогипса. При проведении детоксикации фосфогипса получают обесфторенный фосфогипс (ОФ), который можно применять как фосфорное удобрение с длительным последствием. Целью данного исследования было оценить биологическую эффективность и токсичность обесфторенного фосфогипса в последствии на второй год после внесения при возделывании овса ярового (*Avena sativa*). Научные изыскания проводили путем закладки вегетационного опыта на базе ФГБОУ ВО СПбГАУ. По результатам исследований были сделаны следующие выводы: в последствии для вариантов с внесенным ОФ динамика линейного роста овса ярового сорта «Залп» была примерно одинакова. При этом варианты с ОФ уступали варианту с внесенной азотфоской как по показателям линейного роста, так и по показателям продуктивности. Тем не менее результаты вегетационного опыта показали для вариантов «Фон + ОФ (0,10 г д.в./кг почвы)» и «Фон + ОФ (0,15 г д.в./кг почвы)», где д. в. – P_2O_5 , прибавки урожайности по сравнению с фоном (для зерна при стандартной влажности) в абсолютном выражении (+ от 0,34 до 1,34 г/м²) и по относительной прибавке (+ от 4,4 до 17,5%), подтвердив эффективность применения его в земледелии. В вариантах с ОФ наблюдалось увеличение содержания подвижного фосфора в почве в прямой зависимости от дозы внесенного удобрения в сравнении с фоном (+ от 29,5 до 49,0 мг/100 г почвы), что является очень высоким его содержанием. Это свидетельствует о выраженном эффекте последствия. Таким образом, ОФ может быть использован в качестве многокомпонентного минерального удобрения при обязательном дополнительном исследовании влияния содержащихся в нём фтора, стронция и тяжелых металлов в системе «почва-растение».

Ключевые слова: фосфорные удобрения, детоксикация отходов производства, рециклинг отходов производства, фосфогипс, эффективность применения удобрений, последствие фосфорных удобрений

Цитирование. Агапова П.В., Киселёв М.В., Фрейдкин И.А. Оценка биологической эффективности обесфторенного фосфогипса в качестве удобрения в последствии // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2024. – № 1 (75). – С. 48–57, doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-48-57.

ASSESSMENT OF BIOLOGICAL EFFICIENCY OF APPLICATION OF DEFLUORINATED PHOSPHOGYPSUM AS RESIDUAL FERTILIZER

P.V. Agapova¹, M.V. Kiselev¹ ✉, I.A. Freidkin¹

¹ Sankt-Petersburg State Agrarian University,
Pushkin, St. Petersburg, Russian Federation

✉ kiselev@spbgau.ru

Abstract. An important branch of natural fluorapatite processing is the production of extraction phosphoric acid (EPA). More than 95% of the EPC produced is used for the production of mineral phosphate fertilisers, including phosphogypsum. During the detoxification of phosphogypsum, fluorinated phosphogypsum (OF) is obtained, which can be used as a phosphorus fertilizer with a long aftereffect. The aim of this study was to evaluate the biological efficacy and toxicity of defluorinated phosphogypsum in the second year after application in spring oat (*Avena sativa*) cultivation. Scientific research was carried out by laying a vegetation experiment on the basis of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University". According to the results of the studies, the following conclusions were made: in the aftereffect of the variants with applied OP, the dynamics of linear growth of spring oats of the variety "Zalp" was approximately the same. At the same time, variants with OF were inferior to the variant with applied Azofoska both in terms of linear growth and productivity. Nevertheless, the results of the vegetation experiment showed that for variants "Fon + OF (0.10 g d.w./kg soil)" and "Fon + OF (0.15 g d.w./kg soil)", where d. w. – P₂O₅, yield increases compared to background (for grain at standard moisture content) in absolute terms (+ from 0.34 to 1.34 g/m²) and in relative gain (+ 4.4 to 17.5%), confirming the effectiveness of its application in farming. In variants with OF, an increase in the content of mobile phosphorus in the soil was observed in direct dependence on the dose of fertiliser applied compared to the background (+ from 29.5 to 49.0 mg/100 g of soil), which is a very high content. This indicates a pronounced aftereffect. Thus, OF can be used as a multi-component mineral fertiliser with obligatory additional study of the influence of strontium and heavy metals contained in it in the system "soil-plant".

Keywords: phosphate fertilisers, industrial waste detoxification, industrial waste recycling, phosphogypsum, fertiliser application efficiency, phosphate fertiliser after-effects

Citation. Agapova P.V., Kiselev M.V., Freidkin I.A. (2024) 'Assessment of biological efficiency of application of defluorinated phosphogypsum as residual fertilizer', *Izvestiya of Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 75, no. 1, pp. 48-57 (In Russian), doi: 10.24412/2078-1318-2024-1-48-57.

Введение. Важная отрасль переработки природных фторапатитов – производство экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК). Более 95% полученной кислоты затем используется в производстве минеральных фосфорных удобрений [1], в том числе фосфогипса [2], получаемого путем механического дробления фторапатитовой породы и обработки ее серной кислотой [3, 4, 5, 6]. Фосфогипс после нейтрализации и детоксикации может применяться в сельском хозяйстве как фосфорное и серное удобрение с длительным последствием [7, 8, 9, 10, 11].

Нейтрализация фосфогипса подразумевает повышение водородного показателя со значения pH = 1,5-3,0 до pH = 5,0-7,0 с одновременным удалением и/или переводом в нерастворимые соединения токсичных компонентов (тяжелые металлы, стронций, фтор) [12, 13]. Наиболее эффективным и экономически выгодным является метод детоксикации с помощью высокоэффективного химического агента (ВКА), разработанного ООО «Никель» [14].

Полученный продукт называется обесфторенным фосфогипсом (ОФ) и обладает гораздо более благоприятными характеристиками для применения в сельском хозяйстве.

Фосфорные удобрения обладают наибольшим последствием, поэтому разработка новых фосфорных удобрений, в ходе которой решается вопрос рециклинга отходов, – это одно из наиболее перспективных направлений в агрохимии. Необходимо всестороннее изучение агрономической эффективности и последствия таких типов удобрения.

Основой для разработки данного вида удобрения послужили двухлетние теоретические и практические опыты по разработке его рецептуры [15]. Проведенные исследования в рамках более крупной НИР относятся к приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий [16] и приведены в «Прогнозе научно-технического развития РФ на период до 2030 г.» [17].

Цель исследования – оценка биологической эффективности и токсичности обесфторенного фосфогипса, а также определение его последствия на второй год после внесения в ходе вегетационного опыта, заложенного в 2021 г. и описанного ранее [18]. Исследования проводились с мая 2021 по сентябрь 2022 в лабораториях и вегетационном домике ФГБОУ ВО СПбГАУ на кафедре почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой. В качестве объекта исследования для изучения последствия ОФ взят овес яровой (*Avena sativa*) сорта «Залп».

Ставились следующие задачи:

1. Оценить последствие ОФ на яровом овсе сорта «Залп».
2. Определить количество подвижных форм фосфора в почве на второй год после внесения ОФ и их корреляцию с дозой удобрения.
3. Определить наиболее эффективную дозу последствия ОФ как удобрения при выращивании ярового овса сорта Залп в вегетационном опыте.

Материалы, методы и объекты исследования. Обесфторенный фосфогипс, применяемый в данном исследовании, был получен в ходе производства ЭФК из кольских фторапатитов.

Схема вегетационного опыта для оценки биологической эффективности использования фосфогипса после нейтрализации (ОФ) в качестве минерального удобрения:

1. Фон – N0,15 K0,15.
2. Вариант сравнения – Азофоска N0,15 P0,15 K0,15 (далее «Азофоска»).
3. Фон + ОФ (P0,10) (далее «фон + ОФ1»).
4. Фон + ОФ (P0,15) (далее «фон + ОФ2»).
5. Фон + ОФ (P0,20) (далее «фон + ОФ3»)

В качестве фонового удобрения использовали аммиачную селитру и сульфат калия.

Исходные данные для расчета доз нейтрализованного фосфогипса в схеме вегетационного опыта были получены из результатов исследований в ФБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений». В качестве основного показателя был выбран фосфор, так как этот макроэлемент находится в фосфогипсе в наибольшем количестве (0,826%). При этом учитывалась доля фосфора в водорастворимой (биогенной) форме. Брели и немного завышенные дозы в схеме опыта, ввиду того что лишь малая часть фосфора (0,0213%) находится в водорастворимой (доступной для растений форме). Более того, нейтрализованный фосфогипс вносился непосредственно перед опытом, поэтому механизм перевода фосфора из малорастворимых соединений в подвижную форму не мог начать

действовать. $P_{0,10}$ – 12,5 г ОФ на 1 кг почвы или 62,5 г на 5 кг сосуда; $P_{0,15}$ – 18,8 г ОФ на 1 кг почвы или 94 г на 5 кг сосуда; $P_{0,20}$ – 37,6 г ОФ на 1 кг почвы или 125 г на 5 кг сосуда.

Опыты проводились по общепринятым методикам Б.А. Доспехова [19], З.И. Журбицкого [20], Ф.А. Юдина [21]. Статистическая обработка данных производилась дисперсионным анализом по следующим показателям: высоте растений, массе зерна при фактической и стандартной влажности, продуктивности колоса, массе 1000 зерен, количеству зерен в метелке, количеству щуплых зерен, содержанию подвижных форм фосфора в почве.

Повторность в опытах трехкратная, количество параллельных вариантов $n = 3$. Размещение вариантов систематическое.

Для закладки вегетационного опыта бралась слабоокультуренная дерново-подзолистая почва, типичная для Ленинградской области, которая характеризовалась следующими показателями плодородия: среднесуглинистым гранулометрическим составом, средним содержанием гумуса 3,3% – ГОСТ 26213-21, средним содержанием подвижного фосфора 98,5 млн⁻¹ – ГОСТ Р 54650-2011, низким содержанием подвижного калия 51,5 млн⁻¹ – ГОСТ Р 54650-2011 и близкой к нейтральной реакции среды pH_{KCl} -5,7 – ГОСТ 26483-85. В опыте использовали сосуды Кирсанова. Количество почвы в сосуде – 5500 г.

Объектом исследования последствий ОФ являлся овес яровой (*Avena sativa*) сорта «Залп». Норма высева семян – 30 шт/сосуд на глубину 3 см в соответствии с рекомендациями. После всходов уравнивали посевы до 15 растений на сосуд.

Содержание подвижного фосфора в почве на второй год после внесения определяли по ГОСТ Р 54650 [22].

Результаты исследования. При изучении последствий ОФ (2022 г.) выращивали овес яровой сорта «Залп». Высоту растений овса ярового отслеживали в течение всей его вегетации и измеряли на 15, 25, 35, 50, 65, 80 и 90-й день после посева (табл. 1).

Таблица 1. Средняя высота растений в течение вегетации, см
Table 1. Average plant height during vegetation, cm

№	Вариант	Дней после посева						
		15	25	35	50	65	80	90
1	Фон	9,50	19,30	37,00	49,30	60,10	68,50	73,20
2	Азофоска	10,80	20,50	31,50	58,70	72,20	79,60	84,80
3	Фон + ОФ 1	8,90	18,90	27,20	49,10	59,90	67,10	72,00
4	Фон + ОФ 2	8,30	16,60	23,30	49,30	59,80	66,40	69,90
5	Фон + ОФ 3	8,10	16,00	22,30	47,50	59,30	65,90	69,40
	НСР ₀₅	0,55	0,98	1,69	3,04	3,73	4,85	5,17

По динамике роста овса ярового сорта «Залп» результаты по вариантам «Фон + ОФ1», «Фон + ОФ2», «Фон + ОФ3» не показывают устойчивого превышения над результатами по вариантам «Фон» и «Азофоска».

В ходе опыта в начале массовой восковой спелости овса ярового была определена структура урожая (табл. 2). Существенный прирост высоты растений по отношению к Фон и всем вариантам опыта дал только вариант с применением Азофоски.

Варианты с применением «Фон + ОФ3» характеризовались существенным снижением продуктивности колоса и массы 1000 зерен.

Наилучшую существенную прибавку с применением ОФ по продуктивности колоса и количества зерен в метелке показали варианты с применением Азофоски и ОФ в дозе 1.

Таблица 2. Структура урожайности ярового овса сорта «Залп»

Table 2. Yield structure of spring oat variety "Zalp"

№№	Вариант	Высота растения, см (среднее значение по показателям)	Количество стеблей с озерненным колосом (метелкой) на 1 м ² , шт.	Количество колосьев, пораженных болезнями и вредителями, %;	Продуктивность колоса (метелки), г	Масса 1000 зерен, г	Количество зерен в метелке, шт.	Количество щуплых зерен, %
1	Фон	73,20	15	-	0,510	20,40	25	5
2	Азофоска	84,80	15	-	0,670	21,50	31	4
3	Фон + ОФ 1	72,00	15	-	0,600	21,40	28	4
4	Фон + ОФ 2	69,90	15	-	0,530	20,50	26	5
5	Фон + ОФ 3	69,40	15	-	0,380	18,10	21	4
	НСР ₀₅	4,41	-	-	0,031	1,23	2	1

Схожие тенденция и результаты получены при изучении данных по урожайности, представленных в табл. 3. Наибольшая прибавка по отношению ко всем вариантам опыта – у варианта с азофоской по зерну стандартной влажности. Она составила 2,3 г/м², или 29,9%. Наилучшими из вариантов сравнения стали варианты с ОФ в дозе 1 (прибавка 1,3 г/м², или + 16,9%) и дозе 2 (прибавка 0,3 г/м², или + 3,9%).

Таблица 3. Урожайность ярового овса сорта «Залп» в пересчете на 1 м²

Table 3. Yield of spring oats of the variety "Zalp" in terms of 1 m²

№	Вариант	Масса зерна при фактической влажности 24,1%, г	Масса сухого зерна, г	Масса зерна при стандартной влажности (13,5%), г	Прибавка урожайности к фону по массе сухого зерна, %	Прибавка урожайности к фону по массе зерна при стандартной влажности
1	Фон	8,50	6,80	7,70	-	-
2	Азофоска	11,40	9,20	10,00	135,30	129,90
3	Фон + ОФ 1	10,10	8,10	9,00	119,10	116,90
4	Фон + ОФ 2	9,10	7,40	8,00	108,80	103,90
5	Фон + ОФ 3	6,60	5,30	5,70	77,90	74,00
	НСР ₀₅	0,55	0,44	0,48	5,97	5,79

Содержание подвижных форм элементов фосфора. Наличие доступного фосфора в почве влияет на процессы, которые протекают в растениях. С увеличением дозы внесения обесфторенного фосфогипса равномерно увеличивается содержание подвижного P_2O_5 от 29,5 до 49,0 мг/100 г почвы по сравнению с фоном (табл. 4).

Таблица 4. Содержание подвижных форм фосфора в почве, мг/100 г
 Table 4. Content of mobile forms of phosphorus in the soil, mg/100 g

№	Варианты опыта	P_2O_5 , мг/100 г почвы
1	Фон	52,50
2	Азофоска	64,00
3	Фон + ОФ 1	82,00
4	Фон + ОФ 2	89,50
5	Фон + ОФ 3	101,50
	НСР ₀₅	4,28

Наблюдается четкая обратная корреляция P_2O_5 с урожайностью (коэффициент корреляции -0,69). С повышением в вариантах доз ОФ понижается полученная урожайность, что связано, по-видимому, с чрезмерным содержанием подвижных форм фосфора в почве. В дальнейшем планируется закладка опытов с уменьшением количества дозы обесфторенного фосфогипса, позволяющих уточнить оптимальную дозу ОФ.

Выводы. При изучении последствий удобрения в вариантах с ОФ динамика линейного роста овса ярового была примерно одинакова. Кроме того, варианты с ОФ уступали варианту с внесенной Азофоской как по показателям линейного роста, так и по показателям продуктивности. Тем не менее в последствии при возделывании овса ярового и при использовании обесфторенного фосфогипса в качестве минерального удобрения для вариантов «Фон + ОФ1» и «Фон + ОФ2» прибавки урожайности по сравнению с фоном составили для зерна при стандартной влажности в абсолютном выражении от 0,3 до 1,3 г/м² и по относительной прибавке от 3,9% до 16,9%, подтвердив эффективность применения данного мелиоранта в земледелии.

С увеличением дозы внесения обесфторенного фосфогипса равномерно увеличивается и содержание подвижного P_2O_5 на 29,5–49,0 мг/100 г почвы по сравнению с фоном. Это свидетельствует о выраженном эффекте последствия.

В проведенном опыте выявлена четкая обратная корреляция P_2O_5 с урожайностью, коэффициент которой составляет -0,69. По нашему мнению, это связано с чрезмерным содержанием подвижных форм фосфора в почве.

Список литературы

1. Фосфогипс: хранение и направления использования как крупно-тоннажного вторичного сырья: материалы II Международной конференции, 18 мая 2010 г. / Сост. В. И. Суходолова. – М., 2010. – С. 115–119.
2. ИТС 2-2019 Производство аммиака, минеральных удобрений и неорганических кислот. – М.: Бюро НДТ, 2019. – С. 327–340.
3. Complex Processing of Phosphogypsum – a Way of Recycling Dumps with Reception of Commodity Production of Wide Application / D. Lutskiy, T. Litvinova, A. Ignatovich, I. Fialkovskiy // Journal of Ecological Engineering. – 2018. – Vol. 19. – № 2. – Pp. 221–225.
4. Ивочкина, М.А. Изучение техногенных отложений в отвалах фосфогипса при переработке исходного формирования свойств сырья различных месторождений // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 2. – С. 152–159.
5. Dynamics of contaminants in phosphogypsum of the fertilizer industry of Huelva (SW Spain): from phosphate rock ore to the environment / R. Pérez-López, J. M. Nieto, I. López-Coto, J. L. Aguado, J. P. Bolívar, M. Santisteban // Applied Geochemistry. – 2015. – Vol. 25. – Pp. 705–715.
6. Коробанова, Т.Н. Российский и зарубежный опыт утилизации фосфогипса / Т. Н. Коробанова // Наука вчера, сегодня, завтра: сб. ст. по матер. XL Междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2016. – № 11 (33). – С. 63–71.
7. ГОСТ Р 58820–2020 Фосфогипс для сельского хозяйства. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2020. – С. 3–5.
8. Effect of Phosphogypsum As a Waste Material in Soil Stabilization of Pavement Layers / S. M. Al-Zaidyeen, N. S. Arabi Al-Qadi // Jordan Journal of Civil Engineering. – 2015. – Vol. 9. – № 1. – Pp. 1–7.
9. Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications / K. Grabas, A. Pawelczyk, W. Strek, E. Szeleg // Waste and Biomass Valorization. – 2019. – Vol. 10. – Pp. 3143–3155.
10. Extraction of critical technology elements and radionuclides from phosphogypsum tailings / M. Haschke, B. Friedrich, S. Stopic, D. Panias, P. Schneider, C. Dittrich // Conference: Opportunities in Processing of Metal Resources. – Budapest, 2016. – Pp. 3114–3174.
11. Reduction of P₂O₅ and F from Phosphogypsum by CaO addition / S. Juliastuti, N. Hendrianie, Y. Pawitra, I. Putra // The 24th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2017). – Vol. 156. – Pp. 3237–3275.
12. Conversion of phosphogypsum to sodium sulfate and calcium carbonate in aqueous solution / Y. Ennaciri, M. Bettach, A. Cherrat, A. Zegzouti, J. Mater // Environmental Science. – 2016. – Vol. 7 – № 6. – Pp. 1925–1933.
13. Processing of Phosphogypsum – a Way of Recycling Dumps with Reception of Commodity Production of Wide Application Complex / D. Lutskiy, T. Litvinova, A. Ignatovich, I. Fialkovskiy // Journal of Ecological Engineering. – 2018. – Vol. 19 – № 2. – Pp. 221–225.
14. Комплексная оценка эффективности применения химического агента «ВКА» для детоксикации отходов производства фосфорной кислоты. Отчет о научно-исследовательской работе / А. В. Бородин. – СПб., 2021. – С. 3–27.
15. ТУ 29.59.59-015-13881083-2019 Высококонцентрированный агент (ВКА) для очистки и обезвреживания твердых и жидких продуктов природного и техногенного происхождения. Технические условия. – С.-Петербург. Никель, 2019. – С. 2–10.
16. Указ Президента Российской Федерации от 07.07.2011 № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» / СЗ РФ. – 2011. – № 28. – С. 4168.
17. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утвержден Правительством РФ 03.01.2014) / Правительство Российской

- Федерации. – URL: <http://government.ru/media/files/41d4b737638b91da2184.pdf>.
18. Агапова, П.В. Оценка биологической эффективности применения обесфторенного фосфогипса в качестве удобрения в прямом действии / П. В. Агапова, М. В. Киселев, И. А. Фрейдкин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 5(74). – С. 72–80. – DOI 10.24411/2078-1318-2023-5-72-80. – EDN TNNQEN.
 19. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Колос, 1985. – С. 217–265.
 20. Журбицкий, З.И. Теория и практика вегетационного метода. – М.: Наука, 1968. – С. 174–226.
 21. Юдин, Ф.А. Методика агрохимических исследований. – М.: Колос, 1972. – С. 123–174.
 22. ГОСТ Р 54650-2011 Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. – М.: Стандартинформ, 2019. – С. 2–8.

References

1. Fosfogips: khraneniye i napravleniya ispol'zovaniya kak krupno-tonnazhnogo vtorichnogo syr'ya: materialy Vtoroy Mezhdunarodnoy konferentsii, 18.05.2010 [Phosphogypsum: storage and uses as a large-tonnage secondary raw material: Proceedings of the Second International Conference, May 18, 2010], Compiled by V. I. Sukhodolova, Moscow, pp. 115–119. (In Russ.)
2. Proizvodstvo ammiaka, mineral'nykh udobreniy i neorganicheskikh kislot (2019) [Production of ammonia, mineral fertilizers and inorganic acids], ITS 2-2019, NDT Bureau, Moscow, pp. 327–340. (In Russ.)
3. Lutskiy, D., Litvinova, T., Ignatovich, A., Fialkovskiy, I. (2018) 'Complex Processing of Phosphogypsum – a Way of Recycling Dumps with Reception of Commodity Production of Wide Application', *Journal of Ecological Engineering*, 2018, vol. 19, № 2, pp. 221–225.
4. Ivochkina, M.A. Izucheniye tekhnogennykh otlozheniy v otvalakh fosfogipsa pri pererabotke iskhodnogo formirovaniya svoystv syr'ya razlichnykh mestorozhdeniy (2013) [The study of technogenic deposits in phosphogypsum dumps during the processing of the initial formation of the properties of raw materials from various deposits], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Don Engineering Gazette], 2013, № 2, pp. 152–159. (In Russ.)
5. Pérez-López, R., Nieto, J.M., López-Coto, I., Aguado, J.L., Bolívar, J.P., Santisteban, M. (2015) 'Dynamics of contaminants in phosphogypsum of the fertilizer industry of Huelva (SW Spain): from phosphate rock ore to the environment', *Applied Geochemistry*, Vol. 25., pp. 705–715.
6. Korobanova, T.N. (2016) Rossiyskiy i zarubezhnyy opyt utilizatsii fosfogipsa [Russian and foreign experience in the utilization of phosphogypsum], *Nauka vchera, segodnya, zavtra: sbornik statey po materialam XL mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Science yesterday, today, tomorrow: a collection of articles based on the materials of the XL international scientific and practical conference], SibAK, Novosibirsk, vol. 33, no. № 11, pp. 63–71. (In Russ.)
7. GOST R 58820-2020 "Phosphogypsum for agriculture. Specifications" (2020), Standartinform, Moscow, pp. 3–5. (In Russ.)
8. Al-Zaidyeen, S.M., Arabi Al-Qadi, N.S. (2015) 'Effect of Phosphogypsum As a Waste Material in Soil Stabilization of Pavement Layers', *Jordan Journal of Civil Engineering*, vol. 9, № 1, pp. 1–7.
9. Grabas, K., Pawelczyk, A., Strek, W., Szeleg, E. (2019), 'Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications', *Waste and Biomass Valorization*, vol. 10, pp. 3143–3155.

10. Haschke, M., Friedrich, B., Stopic, S., Panias, D., Schneider, P., Dittrich, C. (2016) 'Extraction of critical technology elements and radionuclides from phosphogypsum tailings', Conference: Opportunities in Processing of Metal Resources, Budapest, pp. 3114–3174.
11. Juliastuti, S., Hendrianie, N., Pawitra, Y., Putra, I. (2017) Reduction of P₂O₅ and F from Phosphogypsum by CaO addition, The 24th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2017), Vol 156, pp. 3237–3275.
12. Ennaciri, Y., Bettach, M., Cherrat, A., Zegzouti, A., Mater, J. (2016) 'Conversion of phosphogypsum to sodium sulfate and calcium carbonate in aqueous solution', *Environmental Science*, vol. 7, № 6, pp. 1925–1933.
13. Lutskiy, D., Litvinova, T., Ignatovich, A., Fialkovskiy, I. (2018) 'Processing of Phosphogypsum – a Way of Recycling Dumps with Reception of Commodity Production of Wide Application Complex', *Journal of Ecological Engineering*, vol. 19, № 2, pp. 221–225.
14. Borodin, A.V. (2021) Kompleksnaya otsenka effektivnosti primeneniya khimicheskogo agenta «VKA» dlya detoksikatsii otkhodov proizvodstva fosfornoj kisloty: Otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote [Comprehensive evaluation of the effectiveness of the use of the chemical agent "VKA" for detoxification of waste products from the production of phosphoric acid. Research report], Saint Petersburg, pp. 3–27. (In Russ.)
15. TU 29.59.59-015-13881083-2019 'Highly concentrated agent (HCA) for purification and neutralization of solid and liquid products of natural and technogenic origin. Specifications' (2019), LLC Nickel, St. Petersburg, pp. 2–10. (In Russ.)
16. Decree of the President of the Russian Federation of 07.07.2011 No. 899 "On Approval of Priority Directions for the Development of Science, Technology and Engineering in the Russian Federation and the List of Critical Technologies of the Russian Federation (2011), NWRF, № 28. – article 4168.
17. Forecast of scientific and technological development of the Russian Federation for the period up to 2030 (approved by the Government of the Russian Federation on 03.01.2014), Government of the Russian Federation [Official site], URL: <http://government.ru/media/files/41d4b737638b91da2184.pdf>.
18. Agapova, P.V. (2023) 'Assessment of the biological effectiveness of using defluorinated phosphogypsum as a fertilizer in direct action' / P.V. Agapova, M.V. Kiselev, I.A. Freidkin // *Izvestiya of the Saint-Petersburg State Agrarian University*, vol. 74, no. 5, pp. 72–80. – DOI 10.24411/2078-1318-2023-5-72-80. – EDN TNNQEN.
19. Dospekhov, B.A. (1985) Metodika polevogo opyta [Field experiment methodology], Ed. 4th, revised. and additional, Moscow, Kolos [ear], pp. 217–265. (In Russ.)
20. Zhurbitskiy, Z.I. (1968) Teoriya i praktika vegetatsionnogo metoda [Theory and practice of the vegetation method], Moscow, Nauka [The science], pp. 174–226. (In Russ.)
21. Yudin, F.A. (1972) Metodika agrokhimicheskikh issledovaniy [Methods of agrochemical research], Moscow, Kolos [ear], pp. 123–174. (In Russ.)
22. GOST R 54650-2011 Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by the method of Kirsanov in the modification of TsINA O (2019), Moscow, Standartinform, pp. 2–8. (In Russ.)

Сведения об авторах

Агапова Полина Владимировна, младший научный сотрудник испытательной лаборатории «ЭКООС», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург, Россия; polinaagapova@mail.ru.

Киселёв Максим Владимирович, кандидат сельскохозяйственных наук, руководитель испытательной лаборатории «ЭКООС», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0002-9831-044X>, SPIN-код: 6088-7951; kiselev@spbgau.ru.

Фрейдкин Иван Алексеевич, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник испытательной лаборатории «ЭКООС», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», Санкт-Петербург, Россия; <http://orcid.org/0000-0001-7492-4001>, SPIN-код: 7887-9368, fat3000@mail.ru.

Information about the authors

Polina V. Agapova, Junior Researcher of RL «ECOOS», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University"; polinaagapova@mail.ru.

Maxim V. Kiselev, Cand. Sci. (Agric.), Head of RL «ECOOS», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University", <http://orcid.org/0000-0002-9831-044X>, SPIN-code: 6088-7951, kiselev@spbgau.ru.

Ivan A. Freidkin, Cand. Sci. (Agric.), Leading Researcher of RL «ECOOS», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Saint-Petersburg State Agrarian University", <http://orcid.org/0000-0001-7492-4001>, SPIN-code: 7887-9368, fat3000@mail.ru.

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 20.11.2023; одобрена после рецензирования 09.02.2024; принята к публикации 26.02.2024.

The article was submitted 22.11.2023; approved after reviewing 09.02.2024; accepted for publication 26.02.2024.