



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 166–174

*Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 166–174

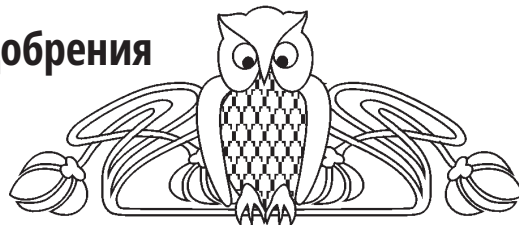
<https://ichbe.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-166-174>, EDN: ARYPSH

Научная статья

УДК 502.17:[631.619+631.895]

## Комплексные органоминеральные удобрения и мелиоранты – экологичный подход к утилизации фосфогипса



С. А. Пиденко<sup>1</sup>✉, Л. Г. Ловцова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

<sup>2</sup>Вавиловский университет, Россия, 410012, г. Саратов, пр. им. Петра Столыпина, зд. 4, стр. 3

Пиденко Сергей Анатольевич, кандидат химических наук, доцент кафедры общей и неорганической химии Института химии, [sapidenko@mail.ru](mailto:sapidenko@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9087-4582>

Ловцова Лариса Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры микробиологии и биотехнологии, [larisalovtsova2018@mail.ru](mailto:larisalovtsova2018@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4206-9773>

**Аннотация.** Одним из современных подходов к решению экологических проблем накопления и депонирования в окружающей среде отходов производства и потребления является реализации моделей «зеленой экономики» и экономики «замкнутого цикла». Данный подход позволяет повысить коэффициент использования ресурсов и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. Перспективным в этой области является, в частности, изучение возможности совместной утилизации отходов различных производств, например сельскохозяйственных и промышленных отходов. Проведен анализ современного состояния работ в данном направлении, на примере анализа возможностей совместной утилизации фосфогипса и органических отходов. Предложен новый экологичный подход к утилизации крупнотоннажного вторичного материального ресурса фосфогипса совместно с органическими отходами. При этом фосфогипс выступает в качестве матрицы для производства комплексных органоминеральных удобрений и мелиорантов сложного состава, введение органического компонента удобрений производится в готовой и обезвреженной жидкой фазе. Исходным сырьем для органического компонента могут являться отходы сельскохозяйственного производства, коммунальные отходы, осадки сточных вод очистных сооружений. Показана эффективность комплексного органоминерального удобрения на основе фосфогипса (90%, мас.) и жидкого удобрения «Рабиол» с включением высокоселективного сорбента на основе молекулярно импринтированных полимеров к имазамоксу – устойчивому гербициду класса имидазолинонов.

**Ключевые слова:** фосфогипс, органоминеральные удобрения, молекулярно импринтированные сорбенты, рабиол, имазамокс

**Благодарности:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 22-16-00102, <https://rscf.ru/project/22-16-00102/>).

**Для цитирования:** Пиденко С. А., Ловцова Л. Г. Комплексные органоминеральные удобрения и мелиоранты – экологичный подход к утилизации фосфогипса // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2023. Т. 23, вып. 2. С. 166–174. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-166-174>, EDN: ARYPSH

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

### Complex organomineral fertilizers and meliorants – a new eco-friendly approach to phosphogypsum utilization

S. A. Pidenko<sup>1</sup>✉, L. G. Lovtsova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

<sup>2</sup>Vavilov University, 4, p. 3 Peter Stolypin Pr., Saratov 410012, Russia

Sergey A. Pidenko, [sapidenko@mail.ru](mailto:sapidenko@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-9087-4582>

Larisa G. Lovtsova, [larisalovtsova2018@mail.ru](mailto:larisalovtsova2018@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-4206-9773>

**Abstract.** One of the modern approaches to solving environmental problems of accumulation and deposition of production and consumption waste is the implementation of “green economy” and “closed cycle” economy models. This approach makes it possible to increase the resource utilization rate and reduce the negative impact on the environment. The study of the possibility of joint disposal of waste from various industries, for example agricultural and industrial waste, is promising in this area. The analysis of the current state of work in this direction is carried out, using the example of the possibilities of joint utilization of phosphogypsum and organic waste. A new eco-friendly approach to the utilization of a large-tonnage secondary material resource – phosphogypsum together with organic waste is proposed. Phosphogypsum acts as a matrix



for the production of complex organomineral fertilizers and meliorants of complex composition, the introduction of the organic component of fertilizers is carried out in the finished and neutralized liquid phase. Agricultural waste, municipal waste, sewage sludge can be the raw materials for the organic component. The effectiveness of the complex organomineral fertilizer and meliorant based on phosphogypsum (90% by weight) and the liquid fertilizer "Rabiol" with the inclusion of a highly selective sorbent based on molecular imprinted polymers to imazamox, a resistant herbicide of the imidazolinone class, is shown.

**Keywords:** phosphogypsum, organomineral fertilizers, molecular imprinted sorbents, rabiol, imazamox

**Acknowledgements.** This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 22-16-00102, <https://rscf.ru/project/22-16-00102/>).

**For citation:** Pidenko S. A., Lovtsova L. G. Complex organomineral fertilizers and meliorants – a new eco-friendly approach to phosphogypsum utilization. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2023, vol. 23, iss. 2, pp. 166–174 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-2-166-174>, EDN: ARYPSH

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Поиск путей решения экологической проблемы накопления и депонирования в окружающей среде все большего количества отходов производства и потребления является критически важной задачей для обеспечения устойчивого развития современной цивилизации. Одним из современных трендов решения данной проблемы является реализация моделей «зеленой экономики» и экономики «замкнутого цикла», которые позволяют повысить коэффициент использования исходных ресурсов и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду [1].

Перспективным направлением для решения этой задачи является изучение возможности совместной утилизации отходов различных производств, в частности сельскохозяйственных и промышленных отходов. Особого внимания заслуживают работы, в которых кроме утилизации отходов наблюдаются дополнительные положительные технологические эффекты [2]. Изучение процесса биологического выщелачивания халькоцита ( $Cu_2S$ ) в условиях моделирующих промышленное производство, показало возможность значительного улучшения параметров утилизации отходов пирита [3]. Исследование производства активированных угольных сорбентов из сельскохозяйственных отходов, включающего активацию угольного сырья водяным паром без использования химической обработки, с одновременным получением топливного биогаза для удаления соединений мышьяка изучено в [4]. Авторами показана возможность использования сельскохозяйственных отходов (рисовой шелухи, скорлупы фундука, грецкого ореха, арахиса) в качестве адсорбентов для солей кадмия, позволяющая существенно снизить концентрацию кадмия в воде (от 70 до 98%, мас.) [5].

Анализ изменений в стратегиях утилизации сельскохозяйственных отходов позволяет выделить основные точки зрения на методы их переработки в коммерчески привлекательные

продукты, с учетом их сложной природы и комплексного состава [6]. Сложившиеся направления комплексной утилизации и вторичного использования лигноцеллюлозных отходов для производства биотоплива, бумаги и биопластика описаны в [7]. Интерес представляет анализ ключевых факторов инновационных бизнес-моделей для системы экономики «замкнутого цикла» при комплексном использовании отходов сельскохозяйственного производства [8]. Авторами приведен комплексный анализ 39 примеров переработки побочных продуктов сельского хозяйства в коммерческие продукты, выделены ключевые факторы (технические, логистические, экономические, финансовые и маркетинговые, организационные, институциональные, правовые, экологические, социальные и культурные), определяющие успешность бизнес-моделей. Показано, что залогом коммерческого успеха комплексного использования сельскохозяйственных отходов являются инновационные технологии переработки, гибкая логистика, инвестиции в НИОКР, наличие площадей, субсидии и оптимальные регламенты обращения с отходами.

Очевидно, что при внедрении технологий комплексной утилизации любых отходов производства и потребления особого внимания заслуживают крупнотоннажные отходы, депонирование которых несет повышенные риски для экологии и выводит из оборота миллионы тонн потенциально востребованных вторичных материальных ресурсов. К числу таких отходов на территории Саратовской области относятся, в частности, фосфогипс (ФГ) производства БФ АО «Апатит» (г. Балаково), птичий помет и навоз крупного рогатого скота. Анализ работ, посвящённых вопросам утилизации фосфогипса, показал, что проблема его комплексной утилизации на сегодняшний день не имеет универсального решения.

Современные направления утилизации фосфогипса на основе анализа широкого круга работ (1067 статей с 1985 по 2020 г.) описаны в [9].



Согласно [10] в настоящее время можно выделить пять основных кластеров научных и технологических проблем, решаемых при использовании фосфогипса: 1) переработку фосфогипса в строительные материалы [11, 12]; 2) использование фосфогипса в сельском хозяйстве в качестве мелиоранта и компонента комплексных удобрений [13, 14]; 3) вопросы загрязнения фосфогипса радиоактивными, редкоземельными [15] и тяжелыми металлами; 4) проблемы мониторинга миграции компонентов фосфогипса в экосистеме; 5) воздействие ФГ на микроорганизмы, особенно в процессах биологической конверсии и почвенной биоремедиации.

#### *Фосфогипс как компонент органоминеральных удобрений*

Вопросы получения органоминеральных удобрений (ОМУ) с использованием фосфогипса рассмотрены в отечественной и зарубежной литературе, при этом совместное компостирование фосфогипса и сельскохозяйственных отходов рассматривается как путь не только утилизации отходов, но и повышения почвенного плодородия [16]. Изучение влияния состава сложного компоста на основе полуперепревшего навоза крупного рогатого скота и фосфогипса на его формирование показало, что более медленная минерализация органического углерода, активная консервация азота в аммонийной форме, накопление фосфатов и оптимальная реакция среды наблюдаются при увеличении доли фосфогипса в компостах до 20 мас., % [16].

Получение удобрений пролонгированного действия на основе фосфогипса и доказательства возможности их использования на различных типах почв, включая кислые, описаны в работе [17]. Известны примеры положительных результатов при исследовании мелиоративного действия нейтрализованного фосфогипса [18], а также совместного использования фосфатсодержащих удобрений вместе с активными органическими веществами – гуминовыми кислотами [19, 20]. Показано, что введение гуминовых кислот приводит к повышению доступности фосфора в почве, увеличению общего содержания фосфора в растениях на стадиях колошения и технической зрелости и, как результат, увеличению урожайности (~25%) [19]. Совместное применение фосфогипса и лигнинового шлама использовали для получения органоминеральной добавки пролонгированного действия [21].

Таким образом, анализ показывает большую перспективность использования фосфогипса как компонента ОМУ. В то же время известные подходы получения ОМУ предполагают

использование органической составляющей в качестве основного компонента. По нашему мнению, перспективным является разработка составов с большим содержанием минеральных составляющих, в частности фосфогипса (до 90%, мас. и более). В этом случае фосфогипс играет роль удобной и стабильной матрицы, на основе которой возможно производство целой гаммы комплексных ОМУ и мелиорантов с составом, адаптированным под конкретную задачу и почвенные условия. В частности, становится возможным производство комплексных ОМУ и мелиорантов с дополнительными селективными инактивирующими свойствами к устойчивым агрохимикатам.

В работе предложен вариант практической реализации подобного подхода и получения комплексного ОМУ на основе фосфогипса, органического удобрения «Рабиол» и оригинального селективного сорбента на основе молекулярно импринтированного полимера (МИП). В качестве модельной системы изучен синтез МИП специфичного к имазамоксу, представителю гербицидов класса имидазолинонов, представляющих значительную биологическую и экологическую опасность [22].

#### **Результаты и их обсуждение**

##### *Предпосылки к разработке комплексного органоминерального удобрения*

Для получения комплексного ОМУ в качестве основного исходного сырья использовали нейтрализованный фосфогипс (БФ АО «Апатит», Россия, ГОСТ Р 58820-2020) и жидкое органическое удобрение «Рабиол» (ТУ 201580-002-46825007-2022, ООО «Элементра», Россия). Исследована возможность расширения спектра действия ОМУ за счет включения в его состав селективных сорбентов на основе МИП. Предложенный состав комплексного ОМУ имеет ряд преимуществ.

Фосфогипс является доступным на территории Саратовской области вторичным материальным ресурсом производства фосфорных удобрений БФ АО «Апатит». В настоящее время на хранении на предприятии находится около 100 млн т этого потенциально востребованного сырья, объем его ежегодного поступления превышает 4 млн т. Использование фосфогипса, который является почвенным мелиорантом, в таких объемах возможно, в первую очередь, в сельскохозяйственном производстве.

Жидкое удобрение «Рабиол» представляет собой концентрированный экстракт вермикомпоста, полученного в результате переработки сель-



скохозяйственных отходов дождевыми червями. Отходы сельскохозяйственного производства (навоз, помет и продукты их компостирования и первичной биологической переработки – компосты и вермикомпосты) накапливаются в Саратовской области в количестве около 3 млн т в год, при этом классические технологии их обезвреживания занимают длительное время вследствие низкой эффективности естественных микробиологических процессов. «Рабиол» производится по технологии высокоэффективной поточной ультразвуковой экстракции в условиях, обеспечивающих микробиологическую безопасность получаемого продукта.

Включение в состав комплексного ОМУ селективных сорбентов на основе МИП, характеризующихся высокой стабильностью, позволяет снизить уровень загрязненности почвы стойкими химическими пестицидами.

*Синтез сорбента на основе молекулярно импринтированного полимера*

Синтез МИП с использованием имазамокса в качестве молекул шаблона проводили на поверхности коммерчески доступных микрочастиц Аэросил™ 200 (SiO<sub>2</sub>, Evonik GmbH, Германия). МИП синтезировали по известной методике [23], в качестве мономеров использовали тетраэтоксисилан – ТЭС и (3-аминопропил)-триэтоксисилан – АПТЭС (х.ч., 98%, Merck KGaA, Германия).

Имазамокс (215 мг) и АПТЭС (0,25 мл) растворяли в этаноле (5 мл) и перемешивали в течение 3 ч. Аэросил (100 мг) диспергировали в этаноле (15 мл) и последовательно добавляли ТЭС (0,45 мл), NH<sub>3</sub>·H<sub>2</sub>O (0,5 мл) и БД (2,5 мл) в течение 5 мин. Смесь полученных растворов перемешивали в течение 1 ч. В дальнейшем проводили удаление молекул шаблоны из образованных сайтов связывания с использованием в качестве элюентов смесей: этанол–БД (9:1) и этанол–ледяная уксусная кислота (9:1). Микрочастицы Аэросил, модифицированные МИП, диспергировали в БД, осаждали центрифугированием (6700 g, MiniSpin® plus, Eppendorf SE, Германия) и высушивали под вакуумом. Синтезированные МИП охарактеризованы по следующим характеристикам: сорбционная емкость ( $Q_{\max}$ ) – 14,2 мг/г и импринтинг фактор (ИФ) – 2,05.

*Комплексное органоминеральное удобрение: получение и свойства*

Получение ОМУ включало приготовление коллоидного раствора МИП (10 мг/мл) в жидком удобрении «Рабиол» и смешивание фосфогипса с полученным раствором (90:10%, мас., н.у., 200 об/мин). Полученная смесь представляла собой порошок темного цвета.

Основной задачей исследования было установление сохранения положительного воздействия отдельных компонентов комплексного ОМУ и выявление возможных синергетических эффектов совместного применения данных компонентов в составе комплексного ОМУ. Изучено воздействие комплексного ОМУ на величину зеленой массы суданской травы *Sorghum drummondii* и остаточное содержание имазамокса в почве. Эксперименты проводили в условиях модельных почвенных разрезов, соответствующих стадии развития солонцового комплекса, типичного для левобережья Саратовской области. Толщина гумусово-аккумулятивного горизонта составляла 4 см, гумусово-элювиального горизонта 25 см, pH 8,8. Площадь одного разреза 1 м<sup>2</sup>. Каждый эксперимент проводили три раза с усреднением полученных данных. Норма высева семян соответствует 1,5 млн всхожих семян на гектар. Норма внесения ОМУ соответствует внесению 4,2 т фосфогипса на гектар. Внесение ОМУ проводили за неделю до посева, с заделкой на глубину 7–8 см. Результаты воздействия ОМУ разных композиций на массу растений, представлены на рис. 1.

Установлено, что при использовании комплексного ОМУ состава фосфогипс-«Рабиол»-МИП средняя масса растений суданской травы увеличивается на 39±2.5%.

Оценено влияние комплексного ОМУ на содержание остаточного количества имазамокса в почве на примере искусственно загрязненных образцов. Имазамокс извлекали из образцов почвы по следующей методике [24]. Образцы почвы (100 г) экстрагировали три раза раствором CaCl<sub>2</sub> (0,02 М). Полученную суспензию центрифугировали (4000 g) в течение 10 мин. Отобранные надосадочные жидкости объединяли, добавляли HCl (0,5 М) до достижения pH 2.7 и удаления гуминовых кислот [25] и центрифугировали (1500 g) в течение 10 мин. Экстракцию имазамокса проводили CHCl<sub>3</sub>, полученный раствор высушивали под вакуумом. Определение имазамокса проводили методом ВЭЖХ-УФ (LC- 20AD Shimadzu, Япония в комплексе с УФ детектором SPD, λ = 254 nm). Удерживание проводили с помощью колонки Spherisorb ODS2 C18 Column (250 mm × 4.6 mm, 5 μm), термостатированной (30°C) во время проведения анализа, со скоростью потока 1.2 мл/мин и подвижной фазой ACN и H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> (0,1% в БД) в объёмном соотношении 30:70 соответственно. Результаты хроматографического определения имазамокса в образцах почвы представлены на рис. 2.



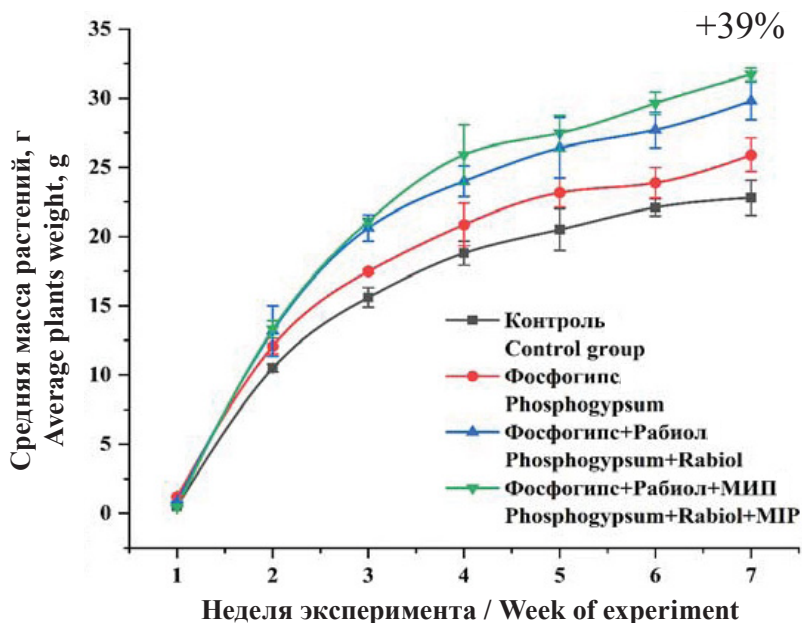


Рис. 1. Зависимость средней массы растений в течение 7 недель, без использования ОМУ (черный), с использованием чистого ФГ (красный), ОМУ состава ФГ-«Рабиол» (синий), ОМУ состава ФГ-«Рабиол»-МИП (зеленый) (цвет онлайн)

Fig. 1. Dependence of the average plants weight during 7 weeks, without organic mineral fertilizer (black), with pure phosphogypsum (red), with organic mineral fertilizer phosphogypsum-“Rabiol” (blue), and phosphogypsum-“Rabiol”-MIP (green) composition (color online)

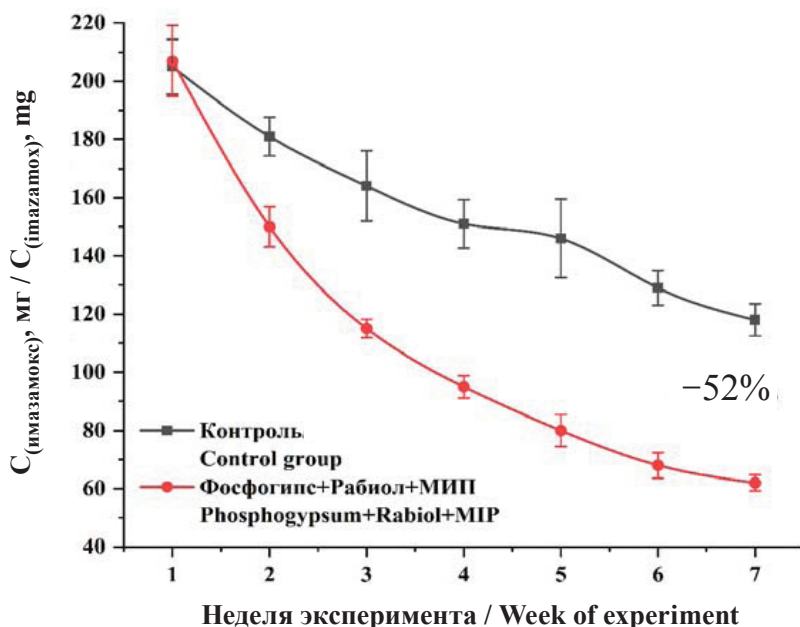


Рис. 2. Зависимость содержания имазамокса в экстрактах почвы в течение 7 недель, без ОМУ (черный) и с внесением ОМУ состава фосфогипс-«Рабиол»-МИП (красный) (цвет онлайн)

Fig. 2. The dependence of the imazamox content in soil extracts for 7 weeks, without (black) and with (red) organic mineral fertilizer composition of phosphogypsum-“Rabiol”-MIP (color online)



Установлено, что применение комплексного ОМУ состава фосфогипс-«Рабиол»-МИП позволяет снизить содержание имазамокса в почвах через 7 недель на  $50 \pm 0,8\%$  по сравнению с контрольными образцами.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что использование комплексного ОМУ на основе фосфогипса в целом соответствует результатам применения фосфогипса на подобных типах почв [26]. В то же время наблюдается увеличение средней массы одного растения, как при использовании комплексного ОМУ с органическим компонентом, так и при использовании органического компонента с внесенным дополнительно высокоселективным МИП сорбентом, что демонстрирует эффективность и целесообразность использования предлагаемого подхода для производства комплексных ОМУ и мелиорантов.

#### Заключение

Предлагаемый в работе новый подход к использованию фосфогипса в качестве матрицы для производства комплексных ОМУ и мелиорантов позволяет успешно решить совокупность экономических и технологических проблем организации массового применения фосфогипса в сельскохозяйственном производстве. Введение органического компонента в состав комплексных ОМУ и мелиорантов предполагается в готовой, полностью обезвреженной, жидкой фазе. Исходным сырьем для получения органического компонента могут являться как отходы сельскохозяйственного производства, так и коммунальные отходы, в частности осадки сточных вод очистных сооружений. Становится возможным промышленное производство комплексных ОМУ и мелиорантов на основе фосфогипса с содержанием фосфогипса от 80 мас. % и более, вследствие отсутствия необходимости использования значительных по размеру площадей для длительного совместного компостирования и крайне затратного многократного ворошения тяжелых высокоминерализованных ОМУ. Для снижения экономических затрат и расширения номенклатуры комплексных ОМУ и мелиорантов их производство возможно организовать как на стационарных, так и на передвижных установках. Производство комплексных ОМУ и мелиорантов с использованием предлагаемого подхода позволяет комплексно утилизировать промышленные, сельскохозяйственные и коммунальные отходы, что полностью соответствует концепции экономики «замкнутого цикла». Дополни-

тельные возможности включают в себя в частности: возможность значительного повышения биологической доступности остаточного трикальций-фосфата в составе фосфогипса, за счет введения в состав ОМУ препаратов фосфатмобилизирующих бактерий *Bacillus megaterium*, *Bacillus sp.* [27], *Lelliottia nimipressuralis* [28], а также возможность включения в состав комплексных ОМУ и мелиорантов микродобавок, например высокоселективных сорбентов, для селективной сорбции остаточных количеств устойчивых пестицидов, внесение которых в чистом виде технологически затруднительно вследствие крайне незначительных норм расхода на гектар.

#### Список литературы

1. Abad-Segura E., Batlles-de-la Fuente A., González-Zamar M. D., Belmonte-Ureña L. J. Implications for sustainability of the joint application of bioeconomy and circular economy: A worldwide trend study // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 7182. <https://doi.org/10.3390/su13137182>
2. Галицкая П. Ю., Зверева П. А., Селивановская С. Ю. Совместная утилизация отходов различных производств с получением полезных продуктов и биогаза // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2011. Т. 153, № 1. С. 152–160.
3. Feng S., Yin Y., Yin Z., Zhang H., Zhu D., Tong, Y., Yang H. Simultaneously enhance iron/sulfur metabolism in column bioleaching of chalcocite by pyrite and sulfur oxidizers based on joint utilization of waste resource // Environ. Res. 2021, Vol. 194. P. 110702. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110702>
4. Dieme M. M., Villot A., Gerente C., Andres Y., Diop S. N., Diawara, C. K. Sustainable conversion of agriculture wastes into activated carbons: Energy balance and arsenic removal from water // Environ. Technol. 2017. Vol. 38, № 3. P. 353–360. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1193225>
5. Sabir A., Altaf F., Batool R., Shafiq M., Khan R. U., Jacob K. I. Agricultural waste absorbents for heavy metal removal // Inamuddin Ahamed M., Lichtfouse E., Asiri A. (eds.). Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water. Environmental Chemistry for a Sustainable World. Vol. 49. Springer Cham., 2021. P. 195–228 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-47400-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47400-3_8)
6. Kumar V., Sharma N., Umesh M., Selvaraj M., Al-Shehri B. M., Chakraborty P., Duhan L., Sharma S., Pasrija R., Awasthi M. K., Lakkaboyana S. R., Andler R., Bhatnagar A., Maitra S. S. Emerging challenges for the agro-industrial food waste utilization: A review on food waste biorefinery // Bioresour. Technol. 2022. Vol. 49. P. 127790. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127790>



7. Koul B., Yakoob M., Shah M. P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability // *Environ. Res.* 2022. Vol. 206. P. 112285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
8. Donner M., Verniquet A., Broeze J., Kayser K., De Vries H. Critical success and risk factors for circular business models valorising agricultural waste and by-products // *Resour. Conserv. Recycl.* 2021. Vol. 165. P. 105236. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105236>
9. Wei Z., Deng, Z. Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis // *J. Environ. Radioact.* 2022. Vol. 242. P. 106778. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106778>
10. Chernysh Y., Yakhnenko O., Chubur V., Roubík H. Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects // *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, № 4. P. 1575. <https://doi.org/10.3390/app11041575>
11. Wu F., Ren Y., Qu G., Liu S., Chen B., Liu X., Zhao C., Li J. Utilization path of bulk industrial solid waste: A review on the multi-directional resource utilization path of phosphogypsum // *J. Environ. Manage.* 2022. Vol. 313. P. 114957. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114957>
12. Xiantao Q., Yihu C., Haowei G., Qisheng H., Zhihao L., Jing X., Hu B., Zhang Z., Rong L. Resource utilization and development of phosphogypsum-based materials in civil engineering // *J. Clean Prod.* 2023. Vol. 387. P. 135858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135858>
13. El Zrelli R., Rabaoui L., Daghbouj N., Abda H., Castet S., Josse C., van Beek P., Souhaut M., Michel S., Bejaoui M., Courjault-Radé P. Characterization of phosphate rock and phosphogypsum from Gabes phosphate fertilizer factories (SE Tunisia): High mining potential and implications for environmental protection // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2018. Vol. 25. P. 14690–14702. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1648-4>
14. Cao J., Wang Z., Ma X., Yang X., Zhang X., Pan H., Wu J., Xu M., Lin L., Zhang Y., Xiao Y., Luo H. Promoting coordinative development of phosphogypsum resources reuse through a novel integrated approach: A case study from Chin // *J. Clean Prod.* 2022. Vol. 374. P. 134078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134078>
15. Mukaba J. L., Eze C. P., Pereao O., Petrik L. F. Rare earths' recovery from phosphogypsum: An overview on direct and indirect leaching techniques // *Minerals.* 2021. Vol. 11, № 10. P. 1051. <https://doi.org/10.3390/min11101051>
16. Антоненко Д. А., Никифорова Ю. Ю., Мельник О. А. Особенности формирования сложного компоста на основе полуперепревшего навоза КРС и фосфогипса // *Экологический вестник Северного Кавказа.* 2019. Т. 15, № 4. С. 37–42.
17. Zhantasov K., Ziyat A., Sarypbekova N., Kirgizbayeva K., Iztleuov G., Zhantasov M., Sagitova G., Aryn A. Ecologically friendly, slow-release granular fertilizers with phosphogypsum // *Pol. J. Environ. Stud.* 2022. Vol. 31, № 3. P. 2935–2942. <https://doi.org/10.15244/pjoes/144099>
18. Akanova N. I., Vizirskaya M. M., Seregin M. B., Grebennikova T. V. The neutralized phosphogypsum as gypsum-containing meliorant Russian case-study // *Int. Agric. J.* 2019. № 2. P. 12–18. <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2019-10048>
19. Wang X. J., Wang Z. Q., Li S. G. The effect of humic acids on the availability of phosphorus fertilizers in alkaline soils // *Soil Use Manag.* 1995. Vol. 11, № 2. P. 99–102. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1995.tb00504.x>
20. Li H., Yang L., Cao J., Nie C., Liu H., Tian J., Chen W., Geng., Xie G. Water-preserving and salt-resistant slow-release fertilizers of polyacrylic acid-potassium humate coated ammonium dihydrogen phosphate // *Polymers.* 2021. Vol. 13, № 17. P. 2844. <https://doi.org/10.3390/polym13172844>
21. Matveeva V. A., Smirnov Y. D., Suchkov D. V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer // *Environ. Geochem. Health.* 2022. Vol. 44, № 5. P. 1605–1618. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00988-x>
22. Бычкова В. В., Сазонова И. А., Пуденко П. С., Пуденко С. А., Бурмистрова Н. А. Негативные эффекты применения гербицидов группы имидазолинонов: проблемы и решения // *Агрохимия.* 2023. № 2. С. 99–108.
23. Fu H., Xu W., Wang H., Liao S., Chen G. Preparation of magnetic molecularly imprinted polymers for the identification of zearalenone in grains // *Anal. Bioanal. Chem.* 2020. Vol. 412. P. 4725–4737. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02729-y>
24. Buerge I. J., Bächli A., Kasteel R., Portmann R., López-Cabeza R., Schwab L. F., Poiger T. Behavior of the chiral herbicide imazamox in soils: pH-dependent, enantioselective degradation, formation and degradation of several chiral metabolites // *Environ. Sci. Technol.* 2019. Vol. 53, № 10. P. 5725–5732. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07209>
25. Dischetti C., Scarponi L., Del Buono D. An analytical method for the determination of imazamox in soils and maize plants // *Fresenius Environ. Bull.* 2001. Vol. 10, № 2. P. 208–211.
26. Соседенко Т. Ю., Пичугина А. С., Васькин С. М. Фосфогипс в качестве удобрения // *Молодой ученый.* 2020. № 47. С. 433–435.
27. Жаппар Н. К., Шайхутдинов В. М., Мырзабаев Б. М., Зейнелов К. А., Шибеева А. К., Байрон Л. Ж. Выделение и изучение штаммов фосфатмобилизирующих микроорганизмов, перспективных для создания биоудобрения // *Вестник Карагандинского университета. Серия: Биология. Медицина. География.* 2020. Т. 99, № 3. С. 36–42.
28. Чайковская Л. А., Мельничук, Т. Н., Каменева И. А., Баранская М. И., Овсиенко О. Л. Фосфатмобилизирующий штамм почвенных бактерий *Lelliottia nitipressuralis* ССМ 32-3 и биопрепарат на его основе для оптимизации минерального питания растений, стимуляции их роста и повышения урожайности. Патент РФ. RU 2676926 С1, 11.01.2019. Заявка № 2018100472 от 09.01.2018.



## References

1. Abad-Segura E., Batlles-de-la Fuente A., González-Zamar M. D., Belmonte-Ureña L. J. Implications for sustainability of the joint application of bioeconomy and circular economy: A worldwide trend study. *Sustainability*, 2021, vol. 13, pp. 7182. <https://doi.org/10.3390/su13137182>
2. Galitskaya P. Yu., Zvereva P. A., Selivanovskaya S. Yu. Joint disposal of waste from various industries with the production of useful products and biogas. *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Estestvennyye nauki*, 2011, vol. 153, no. 1, pp. 152–160 (in Russian).
3. Feng S., Yin Y., Yin Z., Zhang H., Zhu D., Tong Y., Yang H. Simultaneously enhance iron/sulfur metabolism in column bioleaching of chalcocite by pyrite and sulfur oxidizers based on joint utilization of waste resource. *Environ. Res.*, 2021, vol. 194, pp. 110702. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110702>
4. Dieme M. M., Villot A., Gerente C., Andres Y., Diop S. N., Diawara C. K. Sustainable conversion of agriculture wastes into activated carbons: Energy balance and arsenic removal from water. *Environ. Technol.*, 2017, vol. 38, no. 3, pp. 353–360. <https://doi.org/10.1080/09593330.2016.1193225>
5. Sabir A., Altaf F., Batool R., Shafiq M., Khan R. U., Jacob K. I. Agricultural waste absorbents for heavy metal removal. In: Inamuddin Ahamed M., Lichtfouse E., Asiri A. (eds.). *Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water. Environmental Chemistry for a Sustainable World*, vol. 49. Springer, 2021, pp. 195–228 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-47400-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47400-3_8)
6. Kumar V., Sharma N., Umesh M., Selvaraj M., Al-Shehri B. M., Chakraborty P., Duhan L., Sharma S., Pasrija R., Awasthi M. K., Lakkaboyana S. R., Andler R., Bhatnagar A., Maitra S. S. Emerging challenges for the agro-industrial food waste utilization: A review on food waste biorefinery. *Bioresour. Technol.*, 2022, vol. 49, pp. 127790. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127790>
7. Koul B., Yakoob M., Shah M. P. Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *Environ. Res.*, 2022, vol. 206, pp. 112285. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
8. Donner M., Verniquet A., Broeze J., Kayser K., De Vries H. Critical success and risk factors for circular business models valorising agricultural waste and by-products. *Resour. Conserv. Recycl.*, 2021, vol. 165, pp. 105236. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105236>
9. Wei Z., Deng Z. Research hotspots and trends of comprehensive utilization of phosphogypsum: Bibliometric analysis. *J. Environ. Radioact.*, 2022, vol. 242, pp. 106778. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106778>
10. Chernysh Y., Yakhnenko O., Chubur V., Roubík H. Phosphogypsum recycling: a review of environmental issues, current trends, and prospects. *Appl. Sci.*, 2021, vol. 11, no. 4, pp. 1575. <https://doi.org/10.3390/app11041575>
11. Wu F., Ren Y., Qu G., Liu S., Chen B., Liu X., Zhao C., Li J. Utilization path of bulk industrial solid waste: A review on the multi-directional resource utilization path of phosphogypsum. *J. Environ. Manage.*, 2022, vol. 313, pp. 114957. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114957>
12. Xiantao Q., Yihu C., Haowei G., Qisheng H., Zhihao L., Jing X., Hu B., Zhang Z., Rong L. Resource utilization and development of phosphogypsum-based materials in civil engineering. *J. Clean Prod.*, 2023, vol. 387, pp. 135858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135858>
13. El Zrelli R., Rabaoui L., Daghbouj N., Abda H., Castet S., Josse C., van Beek P., Souhaut M., Michel S., Bejaoui M., Courjault-Radé P. Characterization of phosphate rock and phosphogypsum from Gabes phosphate fertilizer factories (SE Tunisia): High mining potential and implications for environmental protection. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2018, vol. 25, pp. 14690–14702. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1648-4>
14. Cao J., Wang Z., Ma X., Yang X., Zhang X., Pan H., Wu J., Xu M., Lin L., Zhang Y., Xiao Y., Luo H. Promoting coordinative development of phosphogypsum resources reuse through a novel integrated approach: A case study from Chin. *J. Clean Prod.*, 2022, vol. 374, pp. 134078. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134078>
15. Mukaba J. L., Eze C. P., Pereo O., Petrik L. F. Rare earths' recovery from phosphogypsum: An overview on direct and indirect leaching techniques. *Minerals*, 2021, vol. 11, no. 10, pp. 1051. <https://doi.org/10.3390/min11101051>
16. Antonenko D. A., Nikiforenko Yu. Yu., Melnik O. A. Features of the formation of complex compost based of semi-rotted cattle manure and phosphogypsum. *The North Caucasus Ecological Herald*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 37–42 (in Russian). <https://elibrary.ru/item.asp?id=41416138>
17. Zhantassov K., Ziyat A., Sarypbekova N., Kirgizbayeva K., Iztileuov G., Zhantassov M., Sagitova G., Aryn A. Ecologically friendly, slow-release granular fertilizers with phosphogypsum. *Pol. J. Environ. Stud.*, 2022, vol. 31, no. 3, pp. 2935–2942. <https://doi.org/10.15244/pjoes/144099>
18. Akanova N. I., Vizirskaya M. M., Seregin M. B., Grebennikova T. V. The neutralized phosphogypsum as gypsum-containing meliorant Russian case-study. *Int. Agric. J.*, 2019, no. 2, pp. 12–18. <https://doi.org/10.24411/2588-0209-2019-10048>
19. Wang X. J., Wang Z. Q., Li S. G. The effect of humic acids on the availability of phosphorus fertilizers in alkaline soils. *Soil Use Manag.*, 1995, vol. 11, no. 2, pp. 99–102. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1995.tb00504.x>
20. Li H., Yang L., Cao J., Nie C., Liu H., Tian J., Chen W., Geng, Xie G. Water-preserving and salt-resistant slow-release fertilizers of polyacrylic acid-potassium humate coated ammonium dihydrogen phosphate. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 17, pp. 2844. <https://doi.org/10.3390/polym13172844>





21. Matveeva V. A., Smirnov Y. D., Suchkov D. V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer. *Environ. Geochem. Health*, 2022, vol. 44, no. 5, pp. 1605–1618. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00988-x>
22. Bychkova V. V., Sazonova I. A., Pidenko P. S., Pidenko S. A., Burmistrova N. A. Negative effects of imidazolinone herbicides usage: Problems and decisions. *Agrohimia*, 2023, no. 2, pp. 99–108 (in Russian).
23. Fu H., Xu W., Wang H., Liao S., Chen G. Preparation of magnetic molecularly imprinted polymers for the identification of zearalenone in grains. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2020, vol. 412, pp. 4725–4737. <https://doi.org/10.1007/s00216-020-02729-y>
24. Buerge I. J., Bächli A., Kasteel R., Portmann R., López-Cabeza R., Schwab L. F., Poiger T. Behavior of the chiral herbicide imazamox in soils: pH-dependent, enantioselective degradation, formation and degradation of several chiral metabolites. *Environ. Sci. Technol.*, 2019, vol. 53, no. 10, pp. 5725–5732. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b07209>
25. Dischetti C., Scarponi L., Del Buono D. An analytical method for the determination of imazamox in soils and maize plants. *Fresenius Environ. Bull.*, 2001, vol. 10, no. 2, pp. 208–211.
26. Sosedenko T. Yu., Pichugina A. S., Vaskin S. M. Phosphogypsum as a fertilizer. *Young Scientist*, 2020, no. 47, pp. 433–435.
27. Zhappar N. K., Shaikhutdinov V. M., Myrzabayev B. M., Zeinelov K. A., Shibayeva A. K., Bairon L. Zh. Isolation and study of promising strains of phosphate mobilizing microorganisms for the creation of biofertilizer. *Bulletin of the Karaganda University. Biology. Medicine. Geography Series*, 2020, vol. 99, no. 3, pp. 36–42 (in Russian).
28. Chaikovskaia L. A., Mel' nichuk, T. N., Kameneva I. A., Baranskaia M. I., Ovsienko O. L. Phosphate-mobilizing strain of soil bacteria *Lelliottia nimipressuralis* CCM 32-3 and a biological preparation based on it to optimize the mineral nutrition of plants, stimulate their growth and increase yields. Patent RF. RU 2676926 C1, 11.01.2019. Zaiavka № 2018100472 from 09.01.2018.

Поступила в редакцию 21.02.23; одобрена после рецензирования 28.02.23; принята к публикации 03.03.23  
The article was submitted 21.02.23; approved after reviewing 28.02.23; accepted for publication 03.03.23