

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2022, №4, Том 14 / 2022, No 4, Vol 14 <https://esj.today/issue-4-2022.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/10NZVN422.pdf>

Ссылка для цитирования этой статьи:

Недбаев, И. С. Обзор российского и мирового опыта решения экологических проблем производства, хранения, переработки и использования фосфогипса / И. С. Недбаев, Н. В. Цывкунова, Е. Ю. Елсукова // Вестник евразийской науки. — 2022. — Т. 14. — № 4. — URL: <https://esj.today/PDF/10NZVN422.pdf>

For citation:

Nedbaev I.S., Tsyvkunova N.V., Elsukova E.Yu. Review of Russian and world experience in solving environmental problems of production, storage, processing and use of phosphogypsum. *The Eurasian Scientific Journal*, 14(4): 10NZVN422. Available at: <https://esj.today/PDF/10NZVN422.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.).

Статья написана при поддержке гранта РФФИ № 20-35-90099. Настоящая статья является частью диссертационного исследования

УДК 504.5

Недбаев Иван Сергеевич

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия

Инженер-исследователь, аспирант

ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства», Санкт-Петербург, Россия

Младший научный сотрудник

E-mail: i.nedbaev@spb-niilh.ru; nedbaev.ivan@yandex.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=995421

Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/AAD-7721-2020>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207032777>

Цывкунова Наталия Владимировна

ФГБУН «Ботанический институт имени В.Л. Комарова Российской академии наук», Санкт-Петербург, Россия

Старший инженер

E-mail: tsyvkunova.nv@yandex.ru

Елсукова Екатерина Юрьевна

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия

Доцент

Кандидат географических наук

E-mail: e.elsukova@spbu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7678-4719>

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=115114

Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/D-9537-2017>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6602477898>

Обзор российского и мирового опыта решения экологических проблем производства, хранения, переработки и использования фосфогипса

Аннотация. Фосфогипс — это отход, образующийся при производстве фосфорной кислоты. С его производством, хранением, переработкой и использованием связан ряд экологических проблем. В настоящей статье проведён обзор российских и зарубежных публикаций, касающихся взаимодействия фосфогипса с окружающей средой. Было проанализировано более 70 источников литературы, чтобы выявить основные экологические проблемы, связанные с фосфогипсом, и их решения. Рассмотрена радиоактивная опасность хранилищ фосфогипса, проявляющаяся в накоплении природных радионуклидов. Систематизированы знания о влиянии отвалов фосфогипса на прилегающие наземные

экосистемы. В статье отмечены геохимические особенности воздействия, заключающиеся в накоплении в прилегающих ландшафтах фтора, стронция и ряда других тяжёлых металлов. Уделено внимание воздействию на водные экосистемы (в основном, эвтрофирование водоёмов). Рассмотрено четыре основных вида использования фосфогипса: в строительстве, при обустройстве дорог, в качестве химических удобрений и для извлечения редкоземельных элементов, а также некоторые другие сферы использования. В статье затронут вопрос рекультивации отвалов фосфогипса и приведены основные особенности формирования почвенно-растительного покрова на отвалах. Упомянуты факторы, которые приводят к минимизации накопления фосфогипса и его эффективной утилизации. В заключении сделан вывод о том, что при разработке решений о хранении, переработке или использовании фосфогипса рекомендуется учитывать геохимическое воздействие фосфогипса.

Ключевые слова: фосфогипс; добыча фосфоритов; рекультивация; эвтрофирование; редкоземельные металлы; стронций; фтор; фосфорная промышленность

Введение

Фосфогипс — это материал, получаемый при переработке фосфоритов и апатитов. Фосфогипс — белое, твердое вещество, состоящее в основном из сульфата кальция, а также рядом примесей, которые зависят от технологии обработки фосфоритного сырья и условий хранения. Мировые запасы фосфатов оцениваются в 69 млрд т. В Российской Федерации запасы фосфатов в фосфоритах оцениваются в 217 млн т и ещё 708 млн т в апатитах. В настоящее время в России существует четыре холдинга, занимающихся добычей и переработкой фосфатного сырья, и две отдельных компании¹. У гипса как у горной породы есть определенная специфика, связанная с химико-минералогическим составом, процессами химического и физического взаимодействия. Фосфогипс может вести себя как сплошная, дискретная трещиноватая или сыпучая порода. При взаимодействии с водой фосфогипс изменяет свое состояние и свойства [1].

Некоторые хранилища фосфогипса расположены в районе охраняемых зон и зон, важных с точки зрения охраны окружающей среды и здоровья населения. К примеру, Лопатинский фосфогипсовый отвал Воскресенского комбината (г. Воскресенск, Московская область) находится в защитной зоне Москвы-реки, вблизи сельскохозяйственных полей и недалеко от населённых пунктов. Высотой отвалы фосфогипса могут достигать до нескольких десятков метров [2].

Целью данного обзора была систематизация данных о российском и мировом опыте использования хранилищ фосфогипса. Отмечена высокая радиоактивность отвалов фосфогипса, которая может препятствовать дальнейшему использованию сырья. Уделено внимание загрязнению наземных и водных экосистем, расположенных в зоне влияния хранилищ фосфогипса. Рассмотрено четыре основных вида использования фосфогипса: в строительстве, при обустройстве дорог, для удобрения почвы и для извлечения редкоземельных элементов, а также некоторые другие сферы использования. В заключительной части обзора поднят вопрос о рекультивации отвалов фосфогипса и, в целом, о сокращении площади самих отвалов.

¹ Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов в Российской Федерации в 2019 году». М., 2020.

Радиоактивная опасность хранилищ фосфогипса

Главной опасностью использования материала хранилищ фосфогипса исследователи называют повышенную радиоактивность. Фосфатная порода содержит Са, Р и природные радионуклиды уранового (^{238}U) и ториевого (^{232}Th) рядов. В фосфатных породах из различных регионов мира содержание ^{238}U и ^{226}Ra варьирует в широких пределах: от 37 до 4900 Бк/кг для ^{238}U и от 100 до 10000 Бк/кг для ^{226}Ra . Постоянное внесение фосфорных удобрений в почву будет приводить к растущему накоплению фосфора и радионуклидов в почве. Это представляет собой большую опасность, так как они могут пройти через слои почвы и раствориться в грунтовой воде [3]. В Бразилии суммарная активность радионуклидов, накопленных в хранилищах фосфогипса, составляет 12,4 ТБк. Из них: 0,27 ТБк ^{238}U ; 0,35 ТБк ^{234}U ; 2,3 ТБк ^{230}Th ; 2,7 ТБк ^{226}Ra ; 3,3 ^{210}Pb ; 1,0 ТБк ^{232}Th ; 1,3 ТБк ^{228}Ra и 1,1 ТБк ^{228}Th . Расчёты были произведены на основе данных о количестве фосфогипса, производимого различными отраслями промышленности Бразилии [4]. Высокая коллективная доза, получаемая населением ЕС, связана в том числе и с высокой радиотоксичностью радионуклидов, сбрасываемых предприятиями фосфатной промышленности [5].

Радионуклиды из хранилищ фосфогипса могут попадать и в водные объекты. Из-за транспортировки, хранения и сброса фосфогипсовых отходов в прибрежной зоне Ливана наблюдается локальное загрязнение радионуклидами цепи распада урана [6]. Загрязнение фосфогипсом водотоков возможно при попадании фосфогипсовой пульпы при аварийных ситуациях на шламохранилищах из-за обильных осадков. В результате этого в донных осадках могут накапливаться тяжёлые металлы, аккумулярованные фосфогипсовыми отходами [7].

Одно из распространённых применений фосфогипса — это использование его в качестве удобрения для почв. Однако при обработке полей фосфогипсом в образцах выросшего на этих полях риса наблюдалась активность ^{226}Ra до 1,98 Бк/кг, при этом на полях, без обработки фосфогипсом, активность ^{226}Ra была ниже (минимальное значение 0,36 Бк/кг). Активность ^{226}Ra в почве, обработанной фосфогипсом, составляет от 50 до 479 Бк/кг, а в почве без такой обработки — от 37 до 54 Бк/кг. Фактор переноса ^{226}Ra из почвы, обработанной фосфогипсом, в рис варьировал от $6,5 \cdot 10^{-3}$ до $2,0 \cdot 10^{-2}$ [8]. При использовании фосфогипса в сельском хозяйстве в качестве удобрения следует учитывать биодоступное количество металлов и изотопов (например, U). Так было сделано в долине реки Гвадалквивир [9]. Для использования фосфогипса в сельском хозяйстве и строительстве необходима его очистка от радиоактивных веществ, которая основана на выщелачивании радионуклидов органическим экстрагентом (раствор ТОФО в керосине). Благодаря этому способу из фосфогипса может быть удалено около 71,1 % ^{226}Ra , 76,4 % ^{210}Pb , 62,4 % ^{238}U и 75,7 % ^{40}K . Наряду с концентрацией радионуклидов снижается суммарная концентрация РЗЭ [10].

Из-за повышенной радиоактивности фосфогипс имеет ограничения при применении в строительстве. В частности, его невозможно использовать в качестве сыпучего материала. Активность ^{226}Ra в фосфогипсе колеблется в пределах от 18 до 1406 Бк/кг, активность ^{232}Th — от 2 до 118 Бк/кг, а активность ^{40}K — от 0 до 569 Бк/кг [11].

Не найдено значимой корреляции между содержанием ^{238}U в фосфоритах и содержанием ^{238}U в фосфогипсе. Аналогичная ситуация наблюдается с торием. Однако содержание ^{226}Ra , ^{210}Pb и ^{210}Po в фосфогипсе имеет значимую корреляцию с содержанием этих изотопов в фосфоритах [12].

Влияние хранилищ фосфогипса на наземные экосистемы

Наличие хранилища фосфогипса меняет геохимическую обстановку в ландшафте [13]. Прилегающие к отвалу природно-территориальные комплексы (ПТК) вследствие переноса

загрязняющих веществ с флювиальными потоками, а также и отдалённые ПТК вследствие переноса аэрогенного характера, попадают под воздействие этого антропогенного объекта. Оно может проявляться в изменении физико-химических характеристик почвы и водных объектов, аккумуляции загрязняющих веществ в компонентах природной среды, изменении водного и теплового режима территории [14]. Влияние фосфогипса на почвенный покров сказывается, в основном, на состоянии поверхностного горизонта почв.

В качестве приоритетных загрязняющих химических элементов выделяют стронций и фтор, упоминая при этом, что существуют ещё две группы элементов, накапливающихся в прилегающих ландшафтах — природные радионуклиды и тяжёлые металлы [3; 15]. Основной причиной значительного содержания тяжелых металлов в выбросах химических заводов является наличие большого количества примесей многих элементов в фосфорном сырье (титана — свыше 1200 мг/кг, марганца — около 300 мг/кг, стронция — свыше 2550 мг/кг, свинца — свыше 12 мг/кг и т. д.); чем больше производство продукции, тем больше выбросов, включая и тяжёлые металлы. Существует зона непосредственного влияния предприятий по переработке фосфорсодержащего сырья, в пределах которой наблюдается увеличение валового содержания стронция (до 132 мг/кг) в среднем на 17 % и содержания подвижных форм элемента — на 54 % [7]. Содержание водорастворимых форм фтора в нем может достигать 25 мг/кг, при установленных ПДК для почв 2,8 мг/кг [16].

Количество фтора в фосфогипсе существенно колеблется в зависимости от исходного сырья и технологии его переработки. Максимальное содержание фтора в отечественном апатитовом концентрате около 3 %, несколько меньше в фосфатных концентратах из фосфоритов — 2,8 %. Данные показывают, что на 1 т P_2O_5 в некоторых рудах приходится 40–100 кг фтора, 20–40 кг стронция, 20–25 кг оксидов редкоземельных элементов. При переработке природных фосфоритов большая часть соединений фтора и стронция переходит в удобрения [17]. Фтор относится к веществам 1 класса опасности в почве. Негативное действие фтора на живые организмы проявляется во влиянии на процессы метаболизма: у растений снижается скорость поглощения кислорода, и наблюдаются расстройства в респираторной деятельности. Фториды ингибируют ряд ферментов, необходимых для полноценного существования живых систем [18]. Накопление фтора в пастбищной растительности территорий, подверженных влиянию хранилища фосфогипса (г. Невинномысск), служило причиной флюороза у диких и домашних животных [19].

Влияние хранилищ фосфогипса на водные экосистемы

Поступления фосфатов из фосфогипса могут увеличивать активность биоты в водоёме даже в условиях сильного антропогенного прессинга. Таким образом, в реках, имеющих высокий уровень загрязнения тяжёлыми металлами, может поддерживаться высокая продуктивность гидробионтов из-за обилия питательных веществ, поступивших из фосфогипса. Однако промышленность по производству фосфорных удобрений также может быть источником таких загрязняющих веществ, как As, Hg и U [20]. При высоком поступлении фосфогипса в водные объекты бактерии могут существовать в анаэробных условиях при нулевом показателе растворённого кислорода. Также в водных объектах начинают развиваться водоросли. Помимо этого, снижается кислотность [21].

Применение фосфогипса в строительстве

Производство строительных материалов и изделий является одной из перспективных отраслей переработки и утилизации отходов промышленности, в том числе фосфогипса. Перспективным направлением утилизации фосфогипса является возможность его применения

в качестве минерального наполнителя для битумоминеральных композиций. Отличительной особенностью битумоминеральных композиций является использование в составе наполнителя фосфогипса фракцией менее 0,16 мм [22].

Одним из наиболее перспективных направлений утилизации фосфогипса является стройиндустрия, где он может использоваться вместо природного гипса. Также фосфогипс целесообразно использовать при производстве гипсовых вяжущих и изделий на их основе, в цементной промышленности [23]. Из фосфогипса можно делать цементные смеси, что предлагают турецкие учёные в связи с высокой стоимостью цемента и наличием неиспользуемых хранилищ фосфогипса. В Турции образуется ежегодно 3 млн тонн фосфогипса [24]. Ещё в одном исследовании [25] указывается на то, что фосфогипс можно использовать в строительной индустрии как компонент строительных материалов. Однако существует проблема, что из-за обилия сульфатов фосфогипс даёт высокую трещиноватость и расширение цементных смесей. Данную проблему возможно решить путём отверждения паром. Увеличение содержания фосфогипса в цементном растворе для производства блоков приводит к увеличению сульфатостойкости блоков. Фосфогипс, прежде чем добавлять к строительным смесям, необходимо прокалить. Лучшие результаты достигаются при смешении фосфогипса, гашёной извести и золы [26]. Также цементные вяжущие могут быть получены путем смешивания летучей золы, фосфогипсового гипса, фторгипса, гашеной извести, кальцинированной глины, пуццолана и химического активатора. Цементные вяжущие идеально подходят для использования в кладочных растворах и для изготовления бетона [27].

Фосфогипс возможно использовать и при производстве кирпичей. Данные фосфогипсовые кирпичи могут выдерживать большую нагрузку и использоваться для сооружения несущих стен в строительстве домов. Значительное влияние на прочность кирпичей оказывает процесс перекристаллизации фосфогипса в процессе предварительной обработки паром [28]. Данные кирпичи и блоки обладают большой устойчивостью к сильным сульфатным средам. Гипс имеет более выраженное связующее действие, чем известь. Прочностные характеристики строительных материалов можно контролировать, меняя содержание фосфогипса [29].

Очищенный фосфогипс может быть использован для производства гипсовых штукатурок, используемых в качестве строительного материала. Очищенный фосфогипс может быть использован в качестве добавки вместо минерального гипса при производстве обычного портландцемента и портландшлакового цемента, что используется в индийской промышленности. Примеси фосфатов и фторидов удаляются в виде водорастворимой фосфорной кислоты, цитрата натрия, фтористоводородной кислоты, гидрофторосиликата, гидрофторалюмината и феррата [30]. Очищенный фосфогипс можно использовать в качестве замедлителя схватывания вместо натурального гипса для портландцемента. Самая высокая 28-дневная прочность на сжатие была обнаружена у образца с 3 % содержанием фосфогипса (по массе) [31]. В производстве портландцемента применение фосфогипса позволяет регулировать сроки схватывания цемента и способствует снижению температуры обжига клинкера. На основе фосфогипса созданы новые гипсокерамические материалы, получаемые при высоких температурах. Фосфогипс может использоваться в дорожном строительстве. Известны примеры использования фосфогипса для устройства оснований дорожного полотна. Успешно построены две автодороги в Балаковском районе Саратовской области (пос. Быков Отрог) [32].

Фосфогипс совместно с отходами после сноса зданий подверглись пристальному изучению в качестве твёрдых отходов, которые могут быть использованы вторично [33]. Были проведены обширные эксперименты для оценки свойств и воздействия на окружающую среду цементных смесей на основе фосфогипса и отходов разрушенных зданий. Из фосфогипса

можно получить качественные, экологически чистые строительные материалы при низких затратах. В патенте ² описано три способа получения однородной мелкодисперсной высокоактивной массы сыпучего материала при утилизации фосфогипса. Основные шаги: просушивают исходный фосфогипс, используя отходящие горячие газы обжиговых печей; нейтрализуют просушенный фосфогипс путем добавления нейтрализаторов; измельчают в молотковой дробилке; производят окончательную сушку нейтрализованного сырья посредством обжиговой печи; охлаждают окончательно просушенное сырье; подают охлажденное сырье на линии активации для последующего измельчения, механоактивации, химической и электрической активации.

Применение фосфогипса для оборудования дорожного полотна

В Китае из фосфогипса, золы и отходов сталльного производства предлагают делать покрытие для дорог. Данное использование отходов позволит, с одной стороны, уменьшить количество отходов, а с другой стороны, приобрести новый материал, ничем не уступающий по характеристикам аналогичным на китайском рынке. К тому же, новый материал с добавками фосфогипса обладает антирастрескивающимися свойствами [34]. Ещё одно исследование [35] показывает, что фосфогипс совместно с гашёной известью и золой может быть использован в качестве материала основания дороги. Использование фосфогипса в дорожном строительстве решает проблему утилизации этого отхода, является эффективным и экономически выгодным. Однако, согласно исследованию [36], токсичные компоненты, которые содержатся в фосфогипсе могут попадать в организм человека через дыхательные пути, глаза и загрязнённые руки и неблагоприятно влиять на его здоровье.

Применение фосфогипса в качестве удобрения для почв

Из фосфогипса можно делать минеральные удобрения. В патенте ³ представлены несколько способов получения комплексного азотно-фосфорно-сульфатного удобрения из фосфогипса. Для увеличения продуктивности почвы используют фосфогипсование. Причём затраты на фосфогипсование могут окупиться за 3–4 года, так как среднегодовая прибавка к продуктивности составляет от 1,33 до 1,68 т/га (в зависимости от дозы фосфогипсования — соответственно, 8–32 т га). В богарных условиях после проведения однократного и повторного фосфогипсования выделяется три зоны солесодержания: опреснения, транзита и аккумулялирования солей [37].

Фосфогипс совместно с осадками сточных вод и опилками может влиять на плодородие почв, так как данные вещества оказывают воздействие на физические и химические свойства почв, морфологические особенности развития растений озимой пшеницы, и существенно улучшают качество зерна. Применение этого субстрата увеличивает содержание клейковины в пшенице на 8,7 %. Применение субстрата из фосфогипса и сточных вод (без опилок) повышает содержание клейковины на 5,7 % [38]. Годом позже было проведено ещё одно исследование, установившее, что компост с присутствием осадков сточных вод и фосфогипса может быть использован для обогащения органическим веществом поверхностного слоя почвы. Однако

² Котенков А.А. Способ получения однородной мелкодисперсионной высокоактивной массы сыпучего материала при утилизации фосфогипса: Патент на изобретение RU 2522835 C1, 20.07.2014. Заявка № 2013109746/03 от 05.03.2013.

³ Чугунов А.А.; Макаров В.Д. Способ получения комплексного азотно-фосфорно-сульфатного удобрения из фосфогипса (варианты): Патент на изобретение RU 2478599 C1, 10.04.2013. Заявка № 2011135561/13 от 25.08.2011.

установление оптимальных соотношений компонентов смеси требует дальнейшего изучения. Процесс компостирования осадков наиболее активно проходил при участии фосфогипса, и экстракты компостов показали незначительную фитотоксичность, на основании чего сделано заключение, что эти варианты смесей вполне можно использовать для рекультивации почв [39]. Фосфогипс оказывает существенное влияние на развитие кукурузы, усиливает зону корнеобразования, снижает формирование подгона и усиливает образование генеративных органов. Фосфогипс заметно подкисляет почву в некоторых регионах (однако в других, наоборот, приводит к подщелачиванию) и корректирует трансформацию в почве органического вещества в сторону его экономного расходования. Также фосфогипс снижает плотность почвы и увеличивает влагоемкость [40].

Удобрять рисовые культуры, филиппинские учёные получали более высокие значения урожайности. Побочным эффектом такого удобрения рассматривалось уменьшение выделения почвой метана, что благотворно сказывается на царящую в научно-политических кругах концепцию глобального изменения климата в сторону потепления [41]. Фосфогипс при добавлении в компост может способствовать снижению выделения почвой парниковых газов почти на 20 % по сравнению с обычным компостом из биологических отходов. Однако при этом происходит увеличение выброса диоксида азота на 3 %. При обработке почвы только фосфогипсом может происходить снижение выделения метана до 85 % и выделения аммиака до 25 % [42]. Внесение фосфогипса в количестве 6 т на 1 га рекомендуют для сокращения выбросов метана при выращивании риса. Фосфогипс необходимо вносить совместно с удобрениями на основе мочевины и создавать в межсезонье дренаж за 7–10 дней до зарождения метёлки [43]. Но данные результаты справедливы только для тяжелосуглинистых почв. Для иных почв необходимы дополнительные исследования.

Фосфогипс при внесении в почву увеличивает общее содержание азота, калия и фосфора. Также фосфогипс увеличивает плотность компоста [44]. Чистый фосфогипс для внесения на сельскохозяйственные земли не всегда оказывает положительное воздействие на растущие культуры. Фосфогипс используется в качестве мелиоранта, однако, согласно исследованию [45], он оказывает негативное воздействие на почвенные субстраты. Это связано с изменением кислотности, содержания фторид- и фосфат-ионов, подвижных форм стронция и кальция. Добавление фосфогипса в количестве более 2 % от массы способно вызывать токсичность почвогрунта. В статье Макаровой Т.К. [46] исследована эффективность внесения фосфогипса в качестве химического мелиоранта при орошении. Длительное орошение приводит к ухудшению физических свойств почвы, так как катионы кальция частично заменяются на катионы натрия. Внесение фосфогипса с орошением уменьшает содержание обменного натрия, благодаря этому увеличивается пористость грунта и его воздухообеспеченность.

Фосфогипс в составе компоста сдерживает процессы разложения органического материала и усиливает мацерацию растительных остатков, что является важным условием для развития популяции дождевых червей и энхитреид. При внесении в почву компоста с использованием фосфогипса происходит увеличение представителей такого семейства, как Julidae (Кивсяки), что свидетельствует о высоком содержании кальция в субстрате. Внесение органоминерального компоста под посев сельскохозяйственных культур способствует оптимизации почвенной структуры (увеличение агрономически ценных агрегатов на 8 %), водоудерживающей способности (увеличение полевой влагоемкости на 10 %), агрохимических и физико-химических показателей (повышение содержания органического вещества на 8 %, общего кальция, серы, изменение pH) [47].

Фосфогипс может использоваться для переработки навозных стоков свиных комплексов и получения удобрения. Использование фосфогипса с рН 3,0–3,5 позволяет обеззаразить свиноводческие стоки с малыми трудовыми и экономическими затратами, обогатить кальцием, серой, фосфором, кремнием и другими микроэлементами. Способ осуществляется следующим образом: в жидкий свиной навоз добавляют фосфогипс с рН 3,0–3,5. Через 2–3 дня после потери резкого неприятного запаха вносят перегной при следующем соотношении, мас. %: фосфогипс — 7–8, перегной — 1–3, жидкий свиной навоз — остальное. Затем перемешивают до однородной массы и выдерживают субстрат в течение 1–2 месяцев для обеззараживания свиноводческих стоков⁴. Переработка фосфогипса конверсионным методом позволит получить продукты для сельского хозяйства, металлургии и стройиндустрии, такие как сульфат аммония и карбонат кальция (фосфомел). Сульфат аммония является ценным минеральным удобрением, а фосфомел может быть переработан в продукты с высокой добавленной стоимостью. эффективным способом переработки фосфогипса является жидкостная конверсия. Она отличается высокой степенью выхода сульфата аммония и карбоната кальция, а также более высоким качеством получаемых продуктов [48].

Применение фосфогипса для извлечения редкоземельных элементов

Отходы фосфогипса в России содержат в своем составе 1 млн м РЗМ. Редкоземельный концентрат, выделенный из отходов фосфогипса отличается повышенным содержанием среднетяжелой группы РЗЭ: иттрия, диспрозия, самария, европия, гадолиния, тербия [49]. В скором времени должны получить развитие процессы по извлечению из фосфогипса редкоземельных элементов, так как постепенно стоимость редкоземельных элементов возрастает, а данные элементы могут содержаться в фосфогипсе. Однако извлекать редкоземельные элементы необходимо на этапе производства фосфорной кислоты [50]. Из фосфогипса возможно извлечение РЗЭ. Однако, приемы, предложенные в способе извлечения РЗЭ из фосфогипса переработки апатита, не дает заявленных результатов при извлечении РЗЭ из фосфогипса переработки фосфорита. Различие в минералогическом составе фосфоритов и апатитов сказывается и на химическом и фазовом составе фосфогипса [51].

Ниже приведено пять методов извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса:

1. Комбинация механического измельчения, ультразвукового воздействия и процесса извлечения из пульпы с помощью ионизированной смолы [52].
2. Биохимический способ⁵.
3. Выщелачивание раствором серной кислоты⁶.
4. Фильтрация суспензии растворённого в азотной кислоте фосфомела⁷.

⁴ Белюченко И.С., Мельник О.А., Новопольцева Л.С., Ткаченко Л.Н. Способ переработки навозных стоков свиноводческих комплексов: Патент на изобретение RU 2477263 C1, 10.03.2013. Заявка № 2011128129/13 от 07.07.2011.

⁵ Башлыкова Т.В., Живаева А.Б., Аширбаева Е.А., Данильченко Л.М. Способ переработки фосфогипса с извлечением редкоземельных элементов и фосфора: Патент на изобретение RU 2457267 C2, 27.07.2012. Заявка № 2010143835/02 от 26.10.2010.

⁶ Фокин К.С., Нестерова Е.О. Способ извлечения редкоземельных металлов из фосфогипса: Патент на изобретение RU 2492255 C1, 10.09.2013. Заявка № 2012124525/02 от 14.06.2012.

⁷ Муллаходжаев Т.И., Олифсон А.Л. Способ извлечения редкоземельных элементов из фосфогипса: Патент на изобретение RU 2509726 C2, 20.03.2014. Заявка № 2012125137/05 от 18.06.2012.

5. Выщелачивание фосфогипса раствором серной кислоты с переводом фосфора и РЗЭ в раствор и получением осадка гипса⁸.

Применение фосфогипса в других сферах

Из фосфогипса можно получить нанокристаллический гидроксипатит и сульфат аммония [53]. Нанокристаллический гидроксипатит используется в медицине как наполнитель, замещающий части утерянной кости, как покрытие имплантатов и в некоторых других случаях. Сульфат аммония — азотное-серное минеральное удобрение для почв.

В исследовании [54] рассмотрено использование фосфогипса в качестве минеральной добавки для проведения биосульфидной обработки осадков сточных вод. Фосфогипс является источником сульфатов, необходимых для роста сульфатовосстанавливающих бактерий и кальция, необходимого для более эффективного извлечения тяжелых металлов. В процессе биосульфидной обработки органические хелатокомплексы с тяжелыми металлами разрушаются, и образуются устойчивые соединения сульфидов металлов, которые недоступны для растений.

В патенте⁹ рассмотрен способ утилизации побочных продуктов производства экстракционной фосфорной кислоты. Он включает обработку фосфогипса фторсиликатным раствором, последующую нейтрализацию смеси и разделение ее фильтрацией. В процессе комплексной переработки фосфогипса путем его конверсии раствором карбоната аммония возможно получение высокочистого углекислого кальция и азотно-сульфатного удобрения. Химически чистый углекислый кальций может быть использован в фармацевтической, парфюмерной, пищевой, медицинской и др. отраслях промышленности, азотно-сульфатные удобрения широко используются в сельском хозяйстве.

Возможно использовать фосфогипс для строительства ограждающих дамб гипсонакопителей. Намывной фосфогипс обладает достаточно высокой прочностью, превышающей прочность естественных песчано-глинистых грунтов, используемых обычно для строительства дамб гидротехнических объектов. По величине угла внутреннего трения фосфогипс не уступает крупнообломочным породам. По показателю сцепления в рыхлом и уплотненном состоянии фосфогипс близок к суглинкам плотного сложения тугопластичной и полутвердой консистенции. Это свидетельствует об удовлетворительных строительных качествах фосфогипса как материала ограждающих сооружений-накопителей жидких промышленных отходов [55].

Фосфогипс может использоваться для очистки нефтесодержащих вод и буровых шламов, как компонент компостов для удобрения почвы и снижения содержания подвижных форм тяжелых металлов, как иммобилизационный материал в биофильтрах при газоочистке. Гранулированная загрузка на основе фосфогипса по сравнению с другими известными абсорбентами имеет ряд преимуществ: невысокую стоимость, стимулирует развитие нужных групп микроорганизмов, создает благоприятные условия для формирования биопленки на поверхности носителя, расширяет поверхность контакта с газовой фазой, способна к регенерации, стойка к повышению кислотности среды (до pH = 4,5), выполняет протекторную

⁸ Локшин Э.П., Тареева О.А., Калинин В.Т. Способ переработки фосфогипса для производства концентрата редкоземельных элементов (РЗЭ) и гипса: Патент на изобретение RU 2458999 C1, 20.08.2012. Заявка № 2011117233/02 от 28.04.2011.

⁹ Норов А.М., Долгов В.В., Малявин А.С., Бризицкая Н.М., Букколини Н.В., Цикин М.Н., Грибков А.Б., Шибанов Е.Ю. Способ утилизации побочных продуктов, получаемых при производстве экстракционной фосфорной кислоты: Патент на изобретение RU 2462419 C1, 27.09.2012. Заявка № 2011119770/05 от 18.05.2011.

функцию, связывая токсичные компоненты (тяжелые металлы), повышает выход элементарной серы [56].

Рекультивация отвалов фосфогипса

Нормальному росту и развитию растений на отвалах фосфогипса препятствует отличный от зональных почв показатель рН, высокое содержание стронция, отсутствие естественного органического вещества, широкая вариабельность содержания обменного калия, чрезмерное количество подвижного фосфора. Наиболее перспективным из рекультивантов являются гумусовый горизонт почв территории, прилегающей к отвалу фосфогипса, и шлам из шламонакопителя, от симбиотических связей с микрофлорой которых во многом зависит рост, развитие и укоренение растений, формирования дернины как основного защитного поверхностного компонента на отвале фосфогипса [57].

Фосфогипс совместно с перегноем и почвой можно применять в качестве субстрата для залужения пыреем ползучим при рекультивации свалок ТБО. При смешивании органических удобрений и фосфогипса получается комплексное гранулометрическое удобрение, обеспечивающее прочность образуемых агрегатов и улучшающее азотный режим почвы. Данное комплексное соединение также благоприятствует развитию микрофлоры и отдельных групп микроорганизмов, участвующих в круговороте азота и фосфора [58].

Успешным примером рекультивации отвала фосфогипса можно считать формирование за 40 лет лесных экосистем с берёзой и осиной в древесном ярусе на склонах отвала фосфогипса Кингисеппского месторождения фосфоритов [59; 60].

Факторы утилизации фосфогипса

Для создания отвалов фосфогипса приходится постоянно отчуждать большие участки земель. Основными направлениями утилизации фосфогипса являются:

- получение гипсовых вяжущих;
- использование в технологии портландцемента;
- изготовление серной кислоты и извести;
- использование как материал для основания дорог в дорожном строительстве.

Также фосфогипс предлагается использовать в сельском и лесном хозяйстве для мелиорации солонцов в смеси с известью, для мелиорации кислых почв и в качестве удобрительных мелиорантов [61]. В Российской Федерации фосфогипс массово применяется для мелиорации аридных почв [62].

Сокращение использования химических удобрений — один из шагов, которые можно сделать для сокращения хранилищ фосфогипса. Однако данный шаг будет означать серьёзные перемены в ведении сельского хозяйства, что, на данный момент, возможно только для развитых стран [63].

Российские исследователи [64] вывели четыре фактора, влияющих на выбор утилизации и переработки фосфогипса:

- удаленность отвалов фосфогипса от потребителя, это особенно актуально для сельскохозяйственного направления использования или когда он используется в качестве сырья для производства строительных материалов;

- количество отрицательных примесей, зависящее как от исходного сырья, так и от базовой технологии его переработки — особенно важно при использовании в сельском хозяйстве и для производства товаров народного потребления;
- содержание ценных компонентов и конъюнктура рынка — от этого зависит целесообразность вовлечения отвала в глубокую переработку;
- наличие в непосредственной близости от места обработки спроса потребителей готовой продукции из аммонийного или натрий-фосфатного сырья.

Выводы

Хранилища фосфогипса выступают как самостоятельный искусственный компонент геосистем, меняющий динамику геохимических процессов ландшафтов размещения. Основное изменение заключается в увеличении содержания стронция, фтора, ряда тяжёлых металлов и природных радионуклидов в компонентах прилегающих ландшафтов.

При этом сфера применения фосфогипса достаточно широка. Его можно использовать в строительстве, при оборудовании дорожного полотна, для удобрения почв, для извлечения редкоземельных элементов и в ряде других отраслей. Одним из возможных решений является рекультивация отвалов фосфогипса.

При разработке решений о хранении, переработке или использовании фосфогипса рекомендуется учитывать геоэкологический аспект, связанный с минимизацией предполагаемой деятельности на окружающую природную среду. Учёт геохимического влияния хранилищ фосфогипса позволит уменьшить количество и масштабы экологических проблем, связанных с этим отходом фосфорной промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филатов А.В., Ивочкина М.А. Методические особенности инженерно-геологического изучения фосфогипсов, как техногенных грунтов // Антропогенная трансформация природной среды. — 2012. — № 1. — С. 77–81.
2. Zakharova T. Health cancer risk assessment for arsenic exposure in potentially contaminated areas by fertilizer plants: A possible regulatory approach applied to a case study in Moscow Region-Russia / Zakharova T., Tatàno F., Menshikov V. // Regulatory Toxicology and Pharmacology. — 2002. — № 36. — С. 22–33.
3. Камел Н.Х.М. Естественная радиоактивность и защита от радиации при использовании продуктов на основе отходов фосфогипса // Радиохимия. — 2012. — Том 54. — № 1. — С. 86–90.
4. Saueia C.H.R. Distribution of natural radionuclides in the production and use of phosphate fertilizers in Brazil / Saueia C.H.R., Mazzilli B.P. // Journal of Environmental Radioactivity. — 2006. — № 89. — С. 229–239.
5. Betti M. Results of the European Commission Marina II Study Part II — Effects of discharges of naturally occurring radioactive material / Betti M., Aldave De Las Heras L., Janssens A., Henrich E., Hunter G., Gerchikov M., Dutton M., Van Weers A.W., Nielsen S., Simmonds J., Bexon A., Sazykina T. // Journal of Environmental Radioactivity. — 2004. — № 74. — С. 255–277.

6. Samad O. Investigation of the radiological impact on the coastal environment surrounding a fertilizer plant / Samad O., Aoun M., Nsouli B., Khalaf G., Hamze M. // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2014. — № 133. — С. 69–74.
7. Петренко Д.В. Влияние отходов Белореченского химзавода на содержание стронция в окружающих ландшафтах / Петренко Д.В., Белюченко И.С. // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. — 2012. — № 1(8). — С. 4–79.
8. Papastefanou C. The application of phosphogypsum in agriculture and the radiological impact / Papastefanou C., Stoulos S., Ioannidou A., Manolopoulou M. // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2006. — № 89. — С. 188–198.
9. Pérez-López R. Changes in mobility of toxic elements during the production of phosphoric acid in the fertilizer industry of Huelva (SW Spain) and environmental impact of phosphogypsum wastes / Pérez-López R., Álvarez-Valero A.M., Nieto J.M. // *Journal of Hazardous Materials*. — 2007. — № 148. — С. 745–750.
10. Эль-Дидамони Х., Али М.М., Аввад Н.С., Атталла М.Ф., Фавзи М.М. Радиологические характеристики и переработка радиоактивно загрязненных отходов фосфогипса // *Радиохимия*. — 2013. — Том 55. — № 4. — С. 378–383.
11. Trevisi R. Natural radioactivity in building materials in the European Union: A database and an estimate of radiological significance / Trevisi R., Risica S., D'Alessandro M., Paradiso D., Nuccetelli C. // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2012. — № 105. — С. 11–20.
12. Mazzilli B. Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum / Mazzilli B., Palmiro V., Saueia C., Nisti M.B. // *Journal of Environmental Radioactivity*. — 2000. — № 49. — С. 113–122.
13. Papaslioti E-M. Stable isotope insights into the weathering processes of a phosphogypsum disposal area / Papaslioti E-M, Pérez-López R., Parviainen A., Macías F., Delgado Huertas A., Garrido C.J., Marchesi C., Nieto J. // *Water Research*. 2018. 140. 344–353. doi: 10.1016/j.watres.2018.04.060.
14. Pérez-López R. Pollutant flows from a phosphogypsum disposal area to an estuarine environment: An insight from geochemical signatures / Pérez-López R., Macías F., Ruiz Cánovas C., Miguel Sarmiento A., Pérez-Moreno S. // *Science of the Total Environment*. 2016. 553. 42–51. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.070.
15. Мельникова А.Д. Загрязнение почвенного покрова в импактной зоне предприятий по производству комплексных минеральных удобрений / А.Д. Мельникова, Д.М. Хомяков // *Экологически безопасное развитие сельских территорий и сохранение водных объектов: Сборник научных трудов международных семинаров, проведенных в рамках Российско-Финляндского проекта "Чистые реки — в здоровое Балтийское море" SE 717 в 2013–2015 годах, Санкт-Петербург, 15–17 декабря 2015 года / Под общей редакцией В.Б. Минина. — Санкт-Петербург: Негосударственное образовательное учреждение «Институт агробизнеса, экономики и права», 2016. — С. 73–75.*
16. Яковлев А.С., Каниськин М.А., Терехова В.А. Экологическая оценка почвогрунтов, подверженных воздействию фосфогипса // *Почвоведение*. — 2013. — № 6. — С. 737.

17. Кизинек С.В., Шеуджен А.Х., Аканова Н.И. Экологические и агроэкономические аспекты применения фосфогипса в сельском хозяйстве // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. — 2013. — Т. 2. — № 9(13). — С. 206–216.
18. Савченков М.Ф., Николаева Л.А. Загрязнение почвенного покрова фтористыми соединениями // Сибирский медицинский журнал, 2011. — Иркутск. — № 1. — С. 10–13.
19. Уразаев Н.А., Бакулин А.А., Никитин А.В. и др. Сельскохозяйственная экология — М.: Колос, 2000. — 304 с.
20. Elbaz-Poulichet F. Metal biogeochemistry in the Tinto-Odiel rivers (Southern Spain) and in the Gulf of Cadiz: A synthesis of the results of TOROS project / Elbaz-Poulichet F., Braungardt C., Achterberg E., Morley N., Cossa D., Beckers J.-M., Nomérange P., Cruzado A., Leblanc M. // Continental Shelf Research. — 2001. — № 21. — С. 1961–1973.
21. Иванова В.В. Влияние фосфогипса на некоторые свойства воды реки Кубань // Экологический Вестник Северного Кавказа. — 2011. — № 3(7). — С. 77–78.
22. Яшин С.О. Технология и свойства модифицированных фосфогипсом битумоминеральных композиций: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Северо-Кавказский Федеральный университет, Ростов-на-Дону, 2013 URL: <http://www.dissercat.com/content/tekhnologiya-i-svoistva-modifitsirovannykh-fosfogipsom-bitumomineralnykh-kompozitsii> (дата обращения: 10.03.2022).
23. Касимов А.М., Решта Е.Е. Комплексная переработка фосфогипса из отвалов и отходов текущего производства минеральных удобрений ОАО “Ровноазот,, // Metallургическая и горнорудная промышленность. — 2013. — № 4. — С. 123–127.
24. Degirmenci N. Application of phosphogypsum in soil stabilization / Degirmenci N., Okucu A., Turabi A. // Building and Environment. — 2007. — № 42. — С. 3393–3398.
25. Değirmenci N. Utilization of phosphogypsum as raw and calcined material in manufacturing of building products // Construction and Building Materials. — 2008. — № 22. — С. 1857–1862.
26. Kumar S. Fly ash-lime-phosphogypsum hollow blocks for walls and partitions // Building and Environment. — 2003. — № 38. — С. 291–295.
27. Singh M. Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes / Singh M., Garg M. // Cement and Concrete Research. — 1999. — № 29. — С. 309–314.
28. Yang J. Preparation of load-bearing building materials from autoclaved phosphogypsum / Yang J., Liu W., Zhang L., Xiao B. // Construction and Building Materials. — 2009. — № 23. — С. 687–693.
29. Kumar S. A perspective study on fly ash-lime-gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development // Construction and Building Materials. — 2002. — № 16. — С. 519–525.
30. Singh M. Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture // Cement and Concrete Research. — 2002. — № 32. — С. 1033–1038.

31. Akin Altun I. Utilization of weathered phosphogypsum as set retarder in Portland cement / Akin Altun I., Sert Y. // *Cement and Concrete Research*. — 2004. — № 34. — С. 677–680.
32. Ларионова Н.А. Использование фосфогипса в строительстве // Сергеевские чтения Юбилейная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения академика Е.М. Сергеева. Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Научный совет РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, ИГЭ РАН. 2014. — с. 48–53.
33. Chen Q. Recycling phosphogypsum and construction demolition waste for cemented paste backfill and its environmental impact / Chen Q., Zhang Q., Qi C., Fourie A., Xiao C. // *Journal of Cleaner Production*. — 2018. — № 186. — С. 418–429.
34. Shen W. Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material / Shen W., Zhou M., Ma W., Hu J., Cai Z. // *Journal of Hazardous Materials*. — 2009. — № 164. — С. 99–104.
35. Shen W. Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder / Shen W., Zhou M., Zhao Q. // *Construction and Building Materials*. — 2007. — № 21. — С. 1480–1485.
36. Мезева А.А. К вопросу безопасности использования отходов промышленности в строительстве автомобильных дорог // Материалы Международного Экологического Форума «Природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока — взгляд в будущее» (Россия, Кемерово, 19–21 ноября 2013 г.) в 2-х т. Т. 2. / Под ред. Т.В. Галаниной, М.И. Баумгартэна. — Кемерово, КузГТУ, 2013. — с. 63–66.
37. Воропаева З.И. Изменение свойств коркового солонца содового засоления при проведении однократной и повторной мелиорации фосфогипсом / Воропаева З.И., Троценко И.А., Парфенов А.И. // *Почвоведение*. — 2011. — № 3. — С. 346–357.
38. Бережная Н.П. Влияние осадков сточных вод и фосфогипса на свойства почвы и продуктивность озимой пшеницы / Бережная Н.П., Бережная В.П. // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. — 2012. — № 2(8). — С. 27–29.
39. Живихина К.М. Оценка смеси осадков сточных вод с фосфогипсом и опилками // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. — 2013. — № 2(9). — С. 89–90.
40. Славгородская М.А. Влияние фосфогипса на развитие и продуктивность кукурузы // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. — 2011. — № 3(7). — С. 79–80.
41. Wassmann R. Characterization of methane emissions from rice fields in Asia. III. Mitigation options and future research needs / Wassmann R., Lantin R.S., Neue H.U., Buendia L.V., Corton T.M., Lu Y. // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. — 2000. — № 58. — С. 23–36.
42. Yang F. Effects of phosphogypsum and superphosphate on compost maturity and gaseous emissions during kitchen waste composting / Yang F., Li G., Shi H., Wang Y. // *Waste Management*. — 2015. — № 36. — С. 70–76.
43. Corton T.M. Methane emission from irrigated and intensively managed rice fields in Central Luzon (Philippines) / Corton T.M., Bajita J.B., Grospe F.S., Pamplona R.R., Assis C.A., Wassmann R., Lantin R.S., Buendia L.V. // *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. — 2000. — № 58. — С. 37–53.

44. Gabhane J. Additives aided composting of green waste: Effects on organic matter degradation, compost maturity, and quality of the finished compost / Gabhane J., William S.P.M.P., Bidyadhar R., Bhilawe P., Anand D., Vaidya A.N., Wate S.R. // *Bioresource Technology*. — 2012. — № 114. — С. 382–388.
45. Oliveira E.L. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production / Oliveira E.L., Pavan M.A. // *Soil and Tillage Research*. — 1996. — № 38. — С. 47–57.
46. Макарова Т.К. Агротелиоративная эффективность использования химической мелиорации на орошаемых солонцовых почвах // Интеграция науки и производства — стратегия устойчивого развития АПК России в ВТО. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию Победы в Сталинградской битве. 30 января — 1 февраля 2013 г. г. Волгоград. Том 2. — Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2013. — 207–210.
47. Петух Ю.Ю. Влияние отходов промышленности и сельского хозяйства на состав почвенной мезофауны в посевах кукурузы // *Экологический Вестник Северного Кавказа*. — 2011. — № 4(7). — С. 34–37.
48. Сизяков В.М., Нутрихина С.В., Левин Б.В. Технология комплексной переработки фосфогипса конверсионным способом с получением сульфата аммония, фосфомела и новых продуктов // *Записка горного института*. — 2012. — Том 197. — С. 239–244.
49. Абрамов А.М., Галиев Р.С., Соболев Ю.Б. Организация производства РЗМ при комплексной переработке фосфогипса. Актуальные вопросы добычи, производства и применения редкоземельных элементов в России: материалы Всероссийской конференция по редкоземельным материалам «РЗМ-2013», 19–21 ноября 2013 г.: тезисы докладов / под ред. Б.М. Кербеля. — Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. — С. 60–64.
50. Binnemans K. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review / Binnemans K., Jones P.T., Blanpain B., Van Gerven T., Pontikes Y. // *Journal of Cleaner Production*. — 2015. — № 99. — С. 17–38.
51. Найманбаев М.А., Лохова Н.Г., Балтабекова Ж.А., Дукембаева А.Ж. Извлечение РЗЭ из фосфогипса от переработки фосфоритов Каратау // Актуальные вопросы добычи, производства и применения редкоземельных элементов в России: материалы Всероссийской конференция по редкоземельным материалам «РЗМ-2013», 19–21 ноября 2013 г.: тезисы докладов / под ред. Б.М. Кербеля. — Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. — С. 60–64.
52. Rychkov V.N. Recovery of rare earth elements from phosphogypsum / Rychkov V.N., Kirillov E.V., Kirillov S.V., Semenishchev V.S., Bunkov G.M., Botalov M.S., Smyshlyaev D.V., Malyshev A.S. // *Journal of Cleaner Production*. — 2018. — № 196. — С. 674–681.
53. Mousa S. Synthesis of nano-crystalline hydroxyapatite and ammonium sulfate from phosphogypsum waste / Mousa S., Hanna A. // *Materials Research Bulletin*. — 2015. — № 48. — С. 823–828.

54. Черныш Е.Ю., Пляцук Л.Д. Исследование эффективности биосульфидной обработки осадков городских сточных вод // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. [Вестник Сумского государственного университета. Серия Технические науки] — 2012. — № 4. — С. 168–179.
55. Кутепова Н.А., Кутепов Ю.И., Кудашов Е.С. Обоснование оптимальных физико-механических характеристик фосфогипса при его использовании для строительства ограждающих дамб гипсонакопителей // Меркшейдерия и недропользование. — 2014. — № 6(74). — С. 60–62.
56. Пляцук Л.Д., Черныш Е.Ю., Яхненко Е.Н. Фосфогипсовые отходы в технологиях защиты окружающей среды // Вісник Кременчуцького. — 2015. — С. 157–164.
57. Белобров В.П. Особенности биологической рекультивации отвала фосфогипса Балаковского филиала АО «Апатит» / Белобров В.П., Гребенников А.М., Куленкамп А.Ю., Ряшко А.И., Торочков Е.Л. // Экологический Вестник Северного Кавказа. — 2015. — № 1(11). — С. 20–25.
58. Федоренко К.А. Перспективные методы рекультивации свалок ТБО (на примере Белореченского муниципального образования) / Федоренко К.А., Елисеева Н.В. // Материалы международной конференции «Инженерная биология в современном мире». — 2011. — С. 189–192.
59. Кушнир Е.А. Оценка состояния лесных насаждений и почвенного покрова на участках рекультивации Кингисеппского месторождения фосфоритов / Е.А. Кушнир, И.С. Недбаев, Э.И. Трещевская // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. — 2021. — № 1. — С. 68–80. — DOI 10.21178/2079-6080.2021.1.68.
60. Недбаев И.С. Изучение последствий рекультивации: характеристики березовых сообществ на техногенных объектах Кингисеппского месторождения фосфоритов / И.С. Недбаев, Е.А. Кушнир, Е.Ю. Елсукова, Э. И. Трещевская // Научные основы устойчивого управления лесами : Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием, Москва, 27–30 октября 2020 года. — Москва: Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 2020. — С. 205–208.
61. Тарчигина И.Ф., Карабаев Г.В., Капранова М.П. Экологические проблемы в производстве фосфорной кислоты // Вестник Московского Государственного открытого университета. Москва. серия: техника и технология. — 2011. — № 3. — С. 60–63.
62. Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин и др. — М.: Недра, 1990. — 335 с.
63. Tayibi H. Environmental impact and management of phosphogypsum / Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. // Journal of Environmental Management. — 2009. — № 90. — С. 2377–2386.
64. Lutskiy D. Complex processing of phosphogypsum — A way of recycling dumps with reception of commodity production of wide application / Lutskiy D., Litvinova T., Ignatovich A., Fialkovskiy I. // Journal of Ecological Engineering. — 2018. — № 19. — С. 221–225.

Nedbaev Ivan Sergeevich

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
Saint-Petersburg Forestry Research Institute, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: i.nedbaev@spb-niilh.ru; nedbaev.ivan@yandex.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=995421
Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/AAD-7721-2020>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=57207032777>

Tsyvkunova Natalia Vladimirovna

Komarov Botanical Institute of the Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: tsyvkunova.nv@yandex.ru

Elsukova Ekaterina Yurievna

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia
E-mail: e.elsukova@spbu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7678-4719>
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=115114
Researcher ID: <https://www.researcherid.com/rid/D-9537-2017>
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6602477898>

Review of Russian and world experience in solving environmental problems of production, storage, processing and use of phosphogypsum

Abstract. Phosphogypsum is a waste product from the production of phosphoric acid. A number of environmental problems are associated with its production, storage, processing and use. This article contains reviews of Russian and foreign publications about interaction between phosphogypsum and environment. More than 70 literature sources were analyzed to identify the main environmental problems of phosphogypsum and their solutions. The radioactive danger of phosphogypsum storages, which manifests itself in the accumulation of natural radionuclides, is excluded. The knowledge about the impact of phosphogypsum dumps on the closure of terrestrial ecosystems is systematized. The article notes the geochemical features of the impact, which consist in the accumulation of fluorine, strontium and a number of other heavy metals in the surrounding landscape. Attention is paid to the treatment of aquatic ecosystems (mainly eutrophication of water bodies). There are four main uses of phosphogypsum: in construction, in road construction, as food and for the extraction of rare earth elements, as well as some other areas of use. The article touches upon the issue of reclamation of phosphogypsum dumps and the above series of solutions. The factors mentioned lead to minimizing the accumulation of phosphogypsum and its usefulness. The treaty concluded that when making decisions about the storage, collection or collection of phosphogypsum, it is recommended to take into account the geochemical impact of phosphogypsum.

Keywords: phosphogypsum; phosphorite mining; reclamation; eutrophication; rare earth metals; strontium; fluorine; phosphorus industry