

УДК 622.271.45:661.63

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ МАССИВОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ФОСФОГИПСА



Ю. И. КУТЕПОВ,
зав. лабораторией, проф.,
д-р техн. наук,
koutepovy@mail.ru



Н. А. КУТЕПОВА,
главный научный сотрудник,
д-р техн. наук



Г. Б. ПОСПЕЛОВ,
ведущий научный сотрудник,
канд. геол.-минерал. наук



А. Д. ВАСИЛЬЕВА,
научный сотрудник,
канд. техн. наук

Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Производство экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) и фосфорных минеральных удобрений сопровождается образованием побочного продукта – сульфата кальция с примесью P_2O_5 , который в технической литературе именуется фосфогипсом. Его мировой объем при используемых технологиях переработки сырья оценивается в ~200 млн т при годовом производстве ЭФК около 40 млн т. По составу и свойствам образовавшийся фосфогипс пригоден для применения в различных отраслях строительства и сельском хозяйстве. Однако как в мировой практике, так и в Российской Федерации данное гипсосодержащее сырье находит практическое применение в народном хозяйстве в незначительном количестве (до 9 %), а большая его часть размещается в отвалы, формируя на земной поверхности техногенные массивы, которые можно рассматривать как техногенные месторождения полезных ископаемых (МПИ).

Ужесточение требований охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов в районах добычи и переработки полезных ископаемых создает проблему дефицита земель под объекты складирования вторичного сырья и отходов производства. Частичное решение проблемы состоит в увеличении высоты и емкости

Показана актуальность проблемы размещения на поверхности земли фосфогипса – побочного продукта производства экстракционной фосфорной кислоты и минеральных удобрений. Рассмотрены условия образования двух модификаций фосфогипса – полугидрата и дигидрата сульфата кальция, отличающихся химико-минеральным составом, физико-химической активностью, склонностью к самоцементации. Приведены результаты изучения закономерностей формирования во времени физико-механических свойств фосфогипсов, полученных при переработке апатитового и фосфоритового сырья. Рассмотрены материалы инженерно-геологических исследований трех крупнейших объектов складирования фосфогипса в Московской и Саратовской областях. Установлена специфика инженерно-геологического строения и гидрогеологической структуры техногенных массивов отвалов фосфогипса, обусловленная закономерными литогенетическими преобразованиями фосфогипса под воздействием физико-химических процессов и гравитационного уплотнения.

Ключевые слова: полугидраты и дигидраты сульфата кальция, химико-минеральный состав, физико-механические свойства пород, отвалы фосфогипса, инженерно-геологическое строение
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.03

отвалов. Формирование высоких отвалов осложняется ухудшением геодинамической и экологической обстановки территорий их размещения за счет возрастания риска развития на откосах оползневых деформаций. Рассмотренные обстоятельства определяют выполнение комплекса инженерно-геологических исследований, направленных на получение закономерностей формирования строения, состава, состояния и свойств фосфогипса в техногенных массивах при отсыпке различных их видов – полугидратов и дигидратов сульфата кальция. Данная информация необходима для обоснования оптимальных параметров объектов складирования фосфогипса, обеспечивающих их максимальную вместимость и безопасность технологических процессов на этапах эксплуатации, последующей рекультивации и потенциально возможной в перспективе их разработки как техногенных МПИ.

Анализ изученности проблемы

Изучение отходов различных производств является актуальным научным направлением, в рамках которого сегодня выполняются исследования, ориентированные на модернизацию технологических процессов с целью минимизации объемов отходов [1–3], рационального их размещения на земной поверхности [4], снижения техногенной нагрузки [5], возможности использования в качестве вторичного сырья, в том числе для целей рекультивации [6–8]. При этом для решения проблемы утилизации отходов минерально-сырьевого

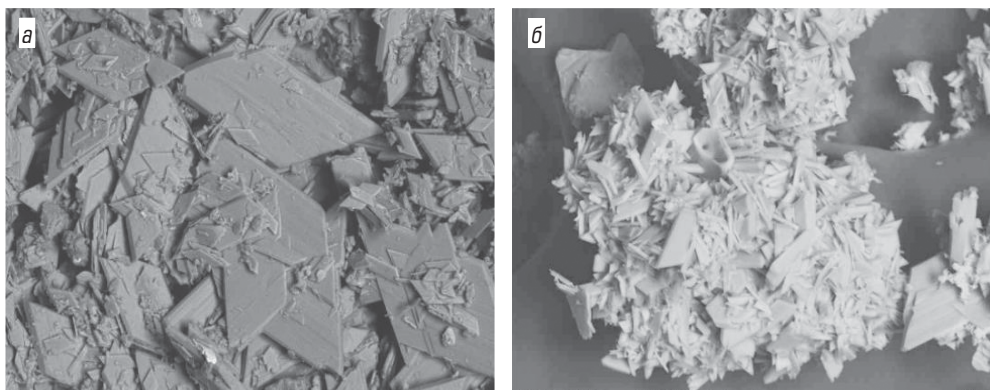


Рис. 1. Кристаллическая структура фосфогипса дигидрата (а) и полуидрата (б)

комплекса требуется системный подход [9], учитывающий как все многообразие видов отходов [10], так и проблемы длительной устойчивости при их размещении в районах активного горнодобывающего техногенеза [11].

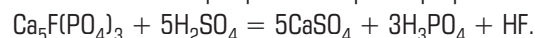
В этом актуальном направлении российскими и зарубежными учеными проведены обширные теоретические и экспериментальные исследования фосфогипса по вопросам его формирования [12–14], изучения состава и физико-химических свойств [15, 16], оценки влияния объектов его размещения на окружающую среду [17–19], анализа ограничений его использования [20–22], получения строительных материалов на основе фосфогипса [23–25], возможности использования в народном хозяйстве [26], в том числе при строительстве различных сооружений [27, 28] и контроле их состояния [29, 30].

Вопросы инженерно-геологического изучения фосфогипса в целях обоснования оптимальных параметров отвальных сооружений не нашли широкого освещения в технической литературе. Первые исследования по данному направлению опубликованы в работах М. Я. Лычко [31], вошедшие позднее в учебное пособие Е. Н. Огородниковой [32], в которых рассмотрены инженерно-геологические условия отвала № 1 в г. Воскресенске Московской области, находящегося в то время на начальном этапе своего формирования. В последние два десятилетия исследования фосфогипса выполняются в Санкт-Петербургском горном университете на различных объектах РФ, расположенных в Московской, Саратовской, Ленинградской, Вологодской областях. Подготовлены диссертационные работы [33–35] по инженерно-геологическому изучению объектов размещения фосфогипса как сухих отвалов, так и намывных гипсонакопителей. Результаты данных исследований, а также других работ, продолжающихся в университете при участии авторов, легли в основу данной статьи.

Образование фосфогипса при переработке фосфатных руд

При производстве ЭФК используют два основных вида руды магматического и осадочного происхождения, содержащих минералы класса фосфатов – апатиты и фосфориты. В мировой практике основной объем извлечения принадлежит

фосфоритам, доля которых составляет 90 % всего добываемого фосфатного сырья. В России благодаря наличию уникальных месторождений Хибинского массива в основном используются апатитовые руды, а фосфориты используют крайне редко. Современное производство фосфорной кислоты базируется на сернокислотном разложении фосфорсодержащего сырья в условиях различных температур и концентраций фосфорной кислоты с последующим выделением двух продуктов – основного и побочного. В упрощенном виде это превращение происходит по реакции (на примере разложения наиболее распространенного в России фосфатного сырья – фторапатита) [13]:



В результате реализации процессов разложения исходного сырья образуется суспензия гипса в растворе фосфорной и серной кислот, которая в дальнейшем разделяется путем фильтрования с использованием непрерывных вакуум-фильтров, а образующийся при этом осадок гипса (побочный продукт) очищается от примесей кислот за счет высокоэффективной многоступенчатой промывки водой. Этим, в частности, объясняется достаточно высокая свободная влажность фосфогипса, выходящего с технологической линии.

В зависимости от условий разложения фосфатного сырья (температуры и концентрации) фосфогипс может образовываться в разных модификациях, основными из которых являются полуидрат ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) и дигидрат ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) сульфата кальция. При этом полуидратный фосфогипс представляет собой неустойчивую модификацию гипса и сразу после своего образования вступает во взаимодействие с водой, содержащейся в отходе, постепенно трансформируясь в дигидратную форму. Визуально обе разновидности фосфогипса на выходе с технологической линии представляют собой порошкообразную массу оттенков белого и серого цвета, однако при многократном увеличении очевидны отличия по форме и размерам кристаллов (**рис. 1**) [33]. Кристаллы гипса в дигидрате в основном призматического и таблитчатого габитуса и достигают крупного размера (до 100–200 мкм). Кристаллическая масса полуидрата более дисперсная, представлена мелкими чешуйками и игольчатыми выделениями, образующими агрегаты размером не более 10–50 мкм.

Таблица 1. Физические характеристики фосфогипса

Разновидность фосфогипса	Естественная влажность $W_{вст}$, %	Насыпная плотность ρ , т/м ³	Плотность сухого грунта (скелета) $\rho_{д^0}$, т/м ³	Плотность частиц грунта $\rho_{с^0}$, т/м ³
ПА	25–30	1,30	0,83–1,27	2,51
ПК	25–30	1,27	0,83–1,27	2,50
ПЕ	25–30	1,27	0,83–1,27	2,53
ДА	35–40	1,26	0,83–1,27	2,37
ДК	35–40	1,26	0,83–1,27	2,36

Физико-механические свойства фосфогипса

Изучение закономерностей формирования механических свойств дигидрата (Д) и полугидрата (П) сульфата кальция проводилось на образцах фосфогипса, полученных при переработке исходного сырья с различных месторождений: Хибинских апатитов (А), Егорьевских (Е) и Каратауских (К) фосфоритов [33]. Физические характеристики образцов, взятых для изучения с технологической линии завода, представлены в **табл. 1**. По гранулометрическому составу все изученные разновидности классифицированы как супесь пылеватая, так как, несмотря на варьирование содержания крупных и мелкодисперсных фракций при использовании различных методов анализа (ареометрического, лазерной дифракции), преобладающая масса частиц имеет размеры от 0,01 до 0,05 мм.

Изучение прочностных свойств фосфогипса проводилось в различные промежутки времени с момента образования отходов. Результаты сдвиговых испытаний показали (**табл. 2**), что на начальном этапе (в день отбора) гипсовый материал в виде дигидрата или полугидрата сульфата кальция имеет близкие значения углов внутреннего трения ϕ и сцепления c . С течением времени наблюдаются различные тенденции в изменении прочностных свойств изучаемых разновидностей. Образцы дигидрата в течение 30 сут сохраняют свои прочностные характеристики при постоянной влажности, а при ее уменьшении отмечается их незначительное увеличение. Для полугидратных образцов, вследствие реализующихся химико-минеральных преобразований в дигидратную форму, сопровождающихся самоцементацией, характерно весьма существенное нарастание прочностных показателей в течение 30 сут. Формирование более выраженных цементационных связей в полугидрате подтверждается данными компрессионных испытаний, показавших, что структурная прочность на сжатие $P_{стр}$ полугидрата в два раза превышает аналогичный показатель для дигидрата при весьма близких значениях модуля деформации E , определяемого после разрушения структурных связей.

Характеристика объектов исследований

При складировании фосфогипса в инженерно-технические сооружения на предприятиях по производству фосфорной

Таблица 2. Результаты лабораторного изучения механических свойств фосфогипса

Фосфогипс	В день отбора		Через 30 сут		E , МПа	$P_{стр}$, кПа
	ϕ , град.	c , кПа	ϕ , град.	c , кПа		
ПА	11	20	32	35	29,22	30
ПК	14	22	32	36	25,85	30
ПЕ	13	18	34	35	32,46	30
ДА	15	18	15	20	25,62	15
ДК	13	30	13	34	27,38	15

кислоты обычно используют два классических способа – «сухое» и гидравлическое отвалообразование. Принципиально они отличаются друг от друга технологическими процессами производства, применяемыми механизированными средствами складирования и условиями накопления материала в техногенном массиве. В настоящей статье остановимся на особенностях формирования трех крупнейших в России отвалов фосфогипса, расположенных в г. Воскресенске Московской области и г. Балаково Саратовской области (**рис. 2**).

На Воскресенском полигоне № 1 в период с 1975 до 1990 г. размещали дигидрат сульфата кальция. На момент завершения эксплуатации высота отвала достигала 60 м, объем уложенного фосфогипса (вместимость отвала) – 15 млн м³ при площади основания 60 га. Современными геодезическими измерениями установлено, что за прошедшие три десятилетия высота сооружения существенно уменьшилась за счет консолидации фосфогипса и составляет не более 45 м.

Воскресенский полигон № 2 начали интенсивно эксплуатировать после закрытия первого и к настоящему времени его высота достигла 105 м, вместимость – 24,26 млн м³ при занимаемой площади 61,5 га. В разные годы в отвал поступали два вида фосфогипса с размещением на начальном этапе дигидрата (до высоты 30 м), а в последующем – полугидрата сульфата кальция. Сооружение планируется наращивать до высоты 120 м.

Балаковский отвал представляет собой многоярусный техногенный массив, сформированный на площади 159,6 га, функционирующий с 1975 г. по настоящее время. По состоянию на 2021 г. его максимальная высота достигла 76 м, вместимость превысила 55,12 млн м³. Рассматривается вопрос о возможности его наращивания до 100 м. Техногенный массив отвала до высоты 30 м сформирован из дигидрата, а выше – из смеси дигидрата и полугидрата сульфата кальция.

Результаты изучения строения техногенных массивов из фосфогипса

Анализ материалов инженерно-геологических исследований отмеченных объектов позволил выявить ряд общих особенностей строения техногенных массивов из фосфогипса,



Рис. 2. Внешний вид полигона № 2 в г. Воскресенске (а) и отвала в г. Балаково (б)

закономерно обусловленных основными факторами литогенетических преобразований дисперсных грунтов – составом складированного фосфогипса, реализацией физико-химических трансформаций и процессов гравитационного уплотнения. Сформированные в теле отвалов отложения из фосфогипса весьма неоднородны по физико-механическим свойствам, однако по ряду визуально определяемых признаков, таких как степень структурированности, рыхлость сложения, консистенция, а также по количественным показателям свойств, в разрезе насыпных массивов можно выделить три инженерно-геологических элемента (ИГЭ), залегающих в виде слоев, условно названных: «рыхлый» (1а), «плотный» (1б) и «пластичный» (1в). Обобщенная инженерно-геологическая характеристика выделенных элементов по трем объектам складирования фосфогипса приводится в табл. 3.

Верхняя часть техногенного массива сложена «рыхлым» фосфогипсом (ИГЭ 1а), наподобие «корки», характеризующейся жесткой структурой при относительно большой пористости. Образование жестких цементационных связей происходит как в полугидратном, так и дигидратном фосфогипсе, однако в первом случае процессы твердения, обусловленные физико-химической трансформацией полугидрата в двухводный гипс, приводят к формированию более прочной структуры. Цементация дигидрата, обладающего изначально повышенным содержанием свободной воды, происходит из-за его обезвоживания вследствие испарения и дренирования влаги, что по строительной терминологии характеризуется как «слеживание».

Слой «рыхлых» фосфогипсов на изученных отвалах прослеживается максимально до глубины 20 м, ниже выделяется

Таблица 3. Физико-механические свойства пород отвалов фосфогипса (нормативные показатели)

Фосфогипс	Интервал глубины в скважине, м	ρ , т/м ³	w , %	ϕ , град	c , кПа	E , МПа	k_f , м/сут
<i>Воскресенский отвал № 1 (1991 г.)</i>							
ИГЭ 1а	0–10	1,5	–	28	13	29*	0,5
ИГЭ 1б	10–33	1,7	–	29	50	78*	0,2
ИГЭ 1в	33–48	1,7	–	29	60	–	0,1
<i>Воскресенский отвал № 2 (2021 г.)</i>							
ИГЭ 1а	0–20	1,55	17	33	30	7**	0,5
ИГЭ 1б	20–71	1,7	22	30	47	10**	0,2
ИГЭ 1в	71–94	1,8	28	32	60	10**	0,1
<i>Балаковский отвал (2012 г.)</i>							
ИГЭ 1а	0–10	1,60	14	38	35	7**	0,5
ИГЭ 1б	10–23	1,68	10	37	50	10**	0,1
ИГЭ 1в	23–50	1,73	18	32	80	10**	0,01

* По данным прессиометрических испытаний.

** По результатам обработки многолетних геодезических измерений.

Условные обозначения: ρ – плотность грунта при естественной влажности; w – влажность; ϕ – угол внутреннего трения; c – сцепление; E – модуль общей деформации; k_f – коэффициент фильтрации.

слой «плотных» фосфогипсов (ИГЭ 1б), отличающихся более высокими показателями плотности и прочности благодаря реализации процессов гравитационного уплотнения. Интенсивное уплотнение фосфогипсов в ходе отвалообразования начинается при нагрузках, превышающих их структурную прочность, и протекает на начальном этапе в виде хрупкого разрушения сцементированных пород, образования трещиноватости, смещения блоков по трещинам с последующим их сближением и измельчением, что в целом предопределяет уменьшение объема порового пространства и повышение прочности фосфогипса. Важно отметить, что данные механические процессы протекают постоянно, даже после

прекращения эксплуатации сооружения, в результате чего фиксируются большие осадки поверхности отвала и отдельных ярусов. Например, по результатам геодезического мониторинга Балаковского отвала установлено, что поверхность отвального яруса первоначальной высотой около 50 м за 11 лет составила почти 10 м на отдельных участках.

Если тело отвала частично обводнено, то фосфогипсы, залегающие ниже уровня воды, отличаются от вышележащих отложений повышенной влажностью и «пластичностью», что при схематизации техногенного массива учитывается выделением самостоятельного инженерно-геологического элемента (ИГЭ 1в). Результаты полевых и лабораторных исследований показывают, что прочность фосфогипсов в теле отвалов увеличивается с глубиной, и это характерно как для сухой (ИГЭ 1б), так и для обводненной части (ИГЭ 1в) техногенного массива.

Формирование техногенного водоносного горизонта в теле отвала фосфогипса происходит за счет инфильтрации атмосферных осадков и технической воды, поступающей вместе с отходами производства. Разгрузка техногенного водоносного горизонта осуществляется либо в основание, либо через откос, в зависимости от проницаемости пород основания отвала. Степень обводненности насыпного тела отвала во многом зависит от состава складированных фосфогипсов. Дигидраты выходят с завода с большей влажностью, чем полугидраты, что предопределяет повышенную обводненность отвалов в целом или отдельных участков, сложенных преимущественно дигидратами. Полугидраты, помимо того, что в них изначально содержится меньшее количество свободной воды, чем в дигидратах, забирают имеющуюся в массиве воду для физико-химических трансформаций в дигидратную форму. Поэтому при складировании полугидрата в чистом виде или в смеси с дигидратом отсутствует возможность формирования техногенного водоносного горизонта с высоким уровнем обводнения отвальных массивов.

Так, на Балаковском отвале уровень водоносного горизонта в техногенном массиве фиксируется гидронаблюдательными скважинами на высоких отметках из-за повышенного содержания заскладированного дигидрата и низкой проницаемости естественного основания, представленного водупорными глинистыми отложениями. В результате тело отвала в большей части обводнено (до 50–70 % по мощности) [35]. На Воскресенском полигоне № 2 ситуация другая: тело отвала обводнено не более чем на 20 % по мощности [33], так как в отвал складировать в преобладающем количестве полугидрат, а в основании сооружения залегают хорошо проницаемые промышленные отходы.

Протекающие преобразования в техногенных массивах складирования фосфогипса должны отслеживаться автоматизированными системами мониторинга, данные которого, помимо обеспечения промышленной безопасности функционирования сооружений, также будут использоваться при разработке комплексных мероприятий последующей технической

рекультивации для снижения негативного воздействия от накопленных отходов, что становится все более актуальной задачей [36, 37].


Заключение

Наметившаяся в последние годы тенденция увеличения вместимости объектов складирования фосфогипса за счет наращивания их высоты до 100 м и более сопряжена с возрастанием риска развития оползневых деформаций. Геомеханическое обоснование оптимальных параметров отвалов фосфогипса, обеспечивающих их максимальную вместимость и безопасность технологических процессов, необходимо выполнять на базе инженерно-геологической информации с учетом знания закономерностей формирования состояния и свойств фосфогипса в техногенных массивах.

При современных технологиях производства ЭФК фосфогипс образуется в двух модификациях – в виде полугидрата и дигидрата сульфата кальция, отличающихся химико-минералогическим составом, что предопределяет различный характер развивающихся в дальнейшем процессов структурообразования и формирования механической прочности. Выполненными исследованиями установлено, что образцы дигидрата быстро набирают прочность и в дальнейшем сохраняют ее при неизменном физическом состоянии. Для образцов полугидрата характерно более длительное нарастание прочностных показателей вследствие реализующихся процессов гидратации и химико-минеральных преобразований, в результате которых полугидрат приобретает жесткую цементационную структуру и характеризуется более высокой прочностью, чем дигидрат.

На основании инженерно-геологических и гидрогеологических исследований на трех крупнейших отвалах высотой от 60 до 105 м, сформированных из различных модификаций фосфогипса, установлено, что в строении техногенных массивов каждого из этих объектов можно выделить три инженерно-геологических элемента (слоя), отложения которых отличаются по структуре, пористости, плотности и консистенции, степени водонасыщения и показателям механических свойств. Отложения каждого инженерно-геологического элемента охарактеризованы нормативными показателями физико-механических свойств, которые можно использовать для решения геомеханических задач. Мощности выделенных слоев переменные и определяются составом складированных фосфогипсов, высотой сооружения и уровнем техногенного водоносного горизонта; последний, в свою очередь, зависит от соотношения объемов вывозимого дигидратного и полугидратного фосфогипса и порядка их складирования в отвале.

Библиографический список

См. англ. блок. 

Features of engineering geology in different type phosphogypsum piling

Information about authors

Yu. I. Kutepov¹, Head of Laboratory, Professor, Doctor of Engineering Sciences, koutepovy@mail.ru

N. A. Kutepova¹, Chief Researcher, Doctor of Engineering Sciences

G. B. Pospekhov¹, Leading Researcher, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences

A. D. Vasilieva¹, Researcher, Candidate of Engineering Sciences

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The recent trend of increasing intake capacity of phosphogypsum storages by means of adding their height to 100 m and more involves a growing risk of landslide deformations. Geomechanical feasibility evaluation and parametric optimization of phosphogypsum dumps to ensure their maximum intake capacity and safety should use the geological and geotechnical information and learn the laws of phosphogypsum condition and properties in human-made masses.

The geological and hydrogeological investigations carried out at three largest dumps made of different type phosphogypsum piled to a height of 60 to 105 m enable distinguishing three geotechnical elements (layers) in the structure of each of these human made masses; these layers differ in structure, porosity, density, texture, water content and mechanical properties. The strata of each geotechnical element are characterized with the standard indicators of physical and mechanical properties, which can be used in solving problems of geomechanics. These layers have varied thicknesses dependent on the composition of phosphogypsum, the height of the dump and the level of a manmade aquifer; the latter depends, in its turn, on the volume ratio of dihydrate and hemihydrate phosphogypsum types and their piling order.

Keywords: calcium sulfate hemihydrate and dehydrate, chemical and mineralogical composition, physical and mechanical properties, phosphogypsum dumps, geotechnical structure.

References

1. Ponomareva M. A., Cheremisina O. V., Mashukova Yu. A., Lukyantseva E. S. Increasing the efficiency of rare earth metal recovery from technological solutions during processing of apatite raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252. pp. 917–926.
2. Chukaeva M. A., Matveeva V. A., Sverchkov I. P. Complex processing of high-carbon ash and slag waste. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 97–104.
3. Cheremisina O. V., Sergeev V. V., Fedorov A. T., Mikhcheva V. Yu. Intensification of leaching of rare earth metals from phosphogypsum. *Obogashchenie Rud*. 2021. No. 5. pp. 46–52. DOI: 10.17580/or.2021.05.08
4. Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Pospekhov G. B., Straupnik I. A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *GIAB*. 2022. No. 12. pp. 77–93.
5. Petrova T. A., Astapenko T. S., Kologrivko A. A., Esman N. M. Reducing the geo-environmental impact of halite waste storage. *GIAB*. 2022. No. 10-1. pp. 155–162.
6. Kutepov Yu. I., Kutepova N. A., Vasilieva A. D., Mukhina A. S. Engineering-geological and ecological concerns in operation and reclamation of high slope dumps at open-pit mines in Kuzbass. *GIAB*. 2021. No. 8. pp. 164–178.
7. Petrova T. A., Rudzish E. Types of soil improvers for reclamation of mining-disturbed lands. *GIAB*. 2021. No. 4. pp. 100–112.
8. Pashkevich M. A., Petrova T. A., Rudzish E. Lignin sludge application for forest land reclamation: feasibility assessment. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 106–112.
9. Litvinova T. E., Suchkov D. V. Comprehensive approach to the utilization of technogenic waste from the mineral resource complex. *GIAB*. 2022. No. 6-1. pp. 331–348.
10. Kondakova V. N., Pankratova K. V., Pomortseva A. A., Pospekhov G. B. Analysis of the Problem of Classification of Mining Wastes. *Engineering and Mining Geophysics : Proceedings of the 16th Conference and Exhibition*. Netherlands : European Association of Geoscientists and Engineers, 2020. Vol. 2020. DOI: 10.3997/2214-4609.202051139
11. Protosenya A. G., Kutepov Yu. Yu. Stability estimation of hydraulic fills in undermined areas. *GIAB*. 2019. No. 3. pp. 97–112.
12. Volkovich S. I. (Ed). Gypsum and phosphogypsum : Gypsum and phosphogypsum conversion publication. Moscow : Goskhimizdat, 1958. 304 p.
13. Kopylev B. A. Wet-process phosphoric acid technology. 2nd revised edition. Leningrad : Khimiya, 1981. 224 p.
14. Sirota I. S. Kinetics of phase transitions in calcium sulfate hydrates in wet-process phosphoric

- acid production : Theses of Dissertation ... of Candidate of Chemical Sciences. Moscow, 1992. 20 p.
15. Meshcheryakov Yu. G., Fedorov S. V. Industrial processing of phosphogypsum. Saint-Petersburg : Stroyizdat, 2007. 104 p.
16. Kutepova N. A., Kutepov Yu. I., Kudashov E. S., Daniliev S. M. Strength of phosphogypsum mixed with nepheline slime in construction of embankments of gypsum ponds. *GIAB*. 2020. No. 10. pp. 67–78.
17. Tayibi H., Choura M., López F. A., Alguacil F. J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90, Iss. 8. pp. 2377–2386.
18. Pérez-López R., Álvarez-Valero A. M., Nieto J. M. 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. *Journal of Hazardous Materials*. 2007. Vol. 148, Iss. 3. pp. 745–750.
19. Gennari R. F., Garcia I., Medina N. H., Silveira M. A. G. Phosphogypsum analysis: total content and extractable element concentrations. *2011 International Nuclear Atlantic Conference*. Belo Horizonte, 2011.
20. Potential Uses of Phosphogypsum and Associated Risks: Background Information Document. Washington : U.S. Environmental Protection Agency, 1992. 114 p.
21. Hilton J. Phosphogypsum (PG): Uses and Current Handling Practices Worldwide. *Proceedings of the 25th Annual Lakeland Regional Phosphate Conference*. Lakeland, 2010. 53 p.
22. Kouloheris A. P. Chemical Nature of Phosphogypsum as Produced by Various Wet Process Phosphoric Acid Processes. *Phosphogypsum: Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum. Utilization and/or Disposal of Phosphogypsum Potential Barriers to Utilization*. Lake Buena Vista, 1980. pp. 8–33.
23. Korovyakov V. F. Gypsum binders and application in construction. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal. Khimiya sovremennykh stroitelnykh materialov*. 2003. Vol. XLVII, No. 4. pp. 18–25.
24. Iglenkova M. G. Physicochemical laws of production of composite materials from phosphogypsum : Theses of Dissertation ... of Candidate of Chemical Sciences. Saratov, 2013. 20 p.
25. Mirsaev R. N., Babkov V. V., Yunusova S. S., Kuznetsov L. K., Nedoseko I. V. et al. Phosphogypsum waste of chemical industry in production of walling materials. Moscow : Khimiya, 2004. 176 p.
26. Ivanitskiy V. V., Klassen P. V., Novikov A. A. et al. Phosphogypsum and its use. Moscow : Khimiya, 1990. 222 p.
27. Kochetkov A. V., Yankovskiy L. V. Application of phosphogypsum for the construction of indistinguishable layers of road pavement. *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*. 2017. No. 4. pp. 91–102.
28. Guidelines on construction of subgrades using fresh phosphor-hemihydrate of calcium sulfate. Moscow : SoyuzDorNI, 1987. 28 p.
29. Danilev S. M., Danileva N. A. Perspective Electrical Exploration the Dams of Gypsum Accumulator in the Framework of Geotechnical Monitoring. *Engineering and Mining Geophysics 2019 : Proceedings of the 15th Conference and Exhibition*. Netherlands : European Association of Geoscientists and Engineers, 2019. Vol. 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901716
30. Danilev S., Danileva N. Characteristics Electromagnetic Waves of Gpr Data for Study of Hidden Cavities in the Engineering Objects. *Engineering and Mining Geophysics 2018 : Proceedings of the 14th Conference and Exhibition*. Netherlands : European Association of Geoscientists and Engineers, 2018. DOI: 10.3997/2214-4609.201800540
31. Lychko Yu. M. Geotechnical characteristics of some manmade soils. *Inzhenernaya geologiya*. 1983. No. 1. pp. 28–36.
32. Ogorodnikova E. N., Nikolaeva S. K. Manmade soils : Tutorial. Moscow : Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 2004. 250 p.
33. Ivochkina M. A. Geotechnical safety and stability of phosphogypsum dumps : Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Saint-Petersburg, 2013. 172 p.
34. Kudashov E. S. Geotechnical feasibility evaluation of stability of sluiced gypsum storages : Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Saint-Petersburg, 2015. 210 p.
35. Korobanova T. N. Geodynamic feasibility evaluation of stability of phosphogypsum dumps on clay beds : Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Saint-Petersburg, 2018. 178 p.
36. Pashkevich M. A., Alekseenko A. V., Nureev R. R. Environmental damage from the storage of sulfide ore tailings. *Journal of Mining Institute*. 2023. Vol. 260. pp.155–167. DOI: 10.31897/PMI.2023.32
37. Petrova T. A. et al. Rehabilitation of disturbed lands with industrial wastewater sludge. *Minerals*. 2022. Vol. 12(3). pp. 376.