

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИЗУЧЕНИЯ АНТРОПОГЕННЫХ ГРУНТОВ НА ПРИМЕРЕ ГИПСОСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

MODERN PROBLEMS STUDY OF ANTHROPOGENIC SOILS ON THE EXAMPLE OF GYPSUM-BEARING WASTES OF NEUTRALISATION OF SULPHURIC ACID

© 2024 г. Г. Б. Поспехов¹, В. А. Изотова²
© 2024 G. B. Posphehov¹, V. A. Izotova²

^{1,2}Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, 21-я линия В. О., д.2,
Санкт-Петербург, 199106, Россия

^{1,2}Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, bld.2, 21-st line, Saint-Petersburg, 199106, Russia

s185021@stud.spmi.ru

Аннотация. Изучение антропогенных грунтов и, в частности, гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты известняком, требует комплексного подхода, включающего как лабораторные исследования, так и прогнозирование эксплуатации гипсонакопителя. Это позволяет не только минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, но и извлечь пользу из вторичных ресурсов, что особенно актуально в условиях стремления к устойчивому развитию горнопромышленной отрасли.

Важным аспектом является проведение лабораторных исследований, которые помогают определить физико-механические свойства материала, необходимые для оценки и прогноза дальнейшего его использования.

В зависимости от условий образования грунтов, их свойства могут значительно отличаться. По этой причине важной задачей является классификация подобных грунтов и уточнение методики изучения их состава и физико-механических свойств.

Abstract. Study of anthropogenic soils and, in particular, gypsum-containing wastes of sulphuric acid neutralisation with limestone requires a comprehensive approach including both laboratory and laboratory studies.

The study of anthropogenic soils and, in particular, gypsum-containing waste from sulphuric acid neutralisation with limestone requires a comprehensive approach, including both laboratory research as well as prediction of gypsum accumulator exploitation. This allows not only minimise the negative impact on the environment, but also to benefit from secondary resources, which is especially important in the conditions of the sustainable development of the mining industry striving for sustainable development of the mining industry.

An important aspect are laboratory tests, which help to determine physical and mechanical properties of the material, which are necessary to evaluate and predict the the utilisation of the material.

Ключевые слова: гипс, процесс нейтрализации, серная кислота, промышленные отходы, техногенный грунт, гранулометрический состав, техногенез, инженерно-геологические особенности, тиксотропия, горная промышленность

Keywords: gypsum, neutralisation process, sulphuric acid, industrial waste, technogenic soil, granulometric composition, technogenesis, engineering-geological features, thixotropy; mining industry

Введение

Влияние инженерно-хозяйственной деятельности человека (техногенеза) на геологическую среду сегодня рассматривается как геологический процесс изменения существующих отложений или формирования абсолютно новых образований в истории Земли — антропогенный или техногенный

литогенез. Основоположник понятия «антропогенный литогенез» Ф. В. Котлов, делая долгосрочный прогноз в 1977 г., призывал в инженерной геологии «шире развернуть фронт научных исследований по проблеме антропогенного литогенеза» [13]. Спустя полвека его напутствие не потеряло актуальности, что косвенно подчеркивается продолжающейся

дискуссией относительно разработки общей генетической классификации техногенных грунтов для практических целей при производстве инженерно-геологических исследований [5, 10, 22].

Несмотря на существенное развитие теоретического базиса инженерной геологии, что убедительно продемонстрировано в работе В. Т. Трофимова [28], в том числе на примере истории диалектического развития понятия «грунт», в отношении техногенных грунтов еще многое предстоит уточнить. Например, в последней предложенной В. Т. Трофимовым формулировке автор определяет грунт как любые горные породы, почвы, осадки и антропогенные породоподобные геологические образования, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы, исследуемые в связи планируемой, осуществляемой или осуществлённой инженерной деятельностью человека [28]. При этом, возможно, в определении лучше было бы использовать «техногенные» вместо «антропогенные», как это было предложено в 1995 г. Р. С. Зянгиным и В. Т. Трофимовым при подготовке ГОСТ 25100-95. Это позволило бы сохранить преемственность терминологии с существующими классификациями техногенных грунтов, внутри которых выделяются антропогенные грунты, возникшие в результате деятельности человека и часто не имеющие аналогов среди природных образований. Также необходимо раскрыть, что значит «породоподобные», поскольку многие разновидности техногенных образований в начале своего формирования представляют собой весьма слабый осадок или материал, и должны пройти долгий путь до превращения в горную породу, обладающую определенными физико-механическими свойствами [20]. Выражение «техногенные минеральные образования» в определении понятия «грунт» в ГОСТ 25100-2020 лучше, но также не в полной мере охватывает содержание понятия «техногенные грунты» поскольку игнорирует органическое вещество. Поэтому предлагается грунт определять, как любые горные породы, почвы, осадки и *техногенные геологические образования*, рассматриваемые как многокомпонентные динамичные системы, исследуемые в связи планируемой, осуществляемой или осуществлённой инженерной деятельностью человека.

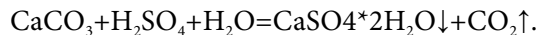
Материалы и методы

В настоящее время среди многообразия техногенных грунтов в инженерной геологии особый интерес для изучения процессов формирования и трансформации состава и свойств представляют антропогенные грунты, представляющие отходы горнодобывающей и перерабатывающей промыш-

ленности. В числе последних выделяются разнообразные гипсосодержащие отходы: фосфогипс, борогипс, цитрогипс, рапной гипс, фторогипс, витаминный гипс и гипсосодержащие отходы нейтрализации серной кислоты [11, 14, 32]. Несмотря на то что их минеральный состав практически полностью представлен гипсом, они все существенно отличаются по крупности кристаллов гипса, влажности шлама, способу формирования объектов складирования отходов и инженерно-геологическим условиям их размещения [6, 7, 8].

В связи с тем, что технология нейтрализации серной кислоты известняком получила распространение относительно недавно, гипсосодержащие отходы являются малоизученным объектом в инженерно-геологической практике. Основная часть этих отходов размещается в накопителях с помощью гидронамыва, при этом на земной поверхности формируются техногенные массивы площадью, достигающей сотни гектаров [9, 16]. В связи с этим достоверная оценка состава и свойств отходов для анализа устойчивости объектов их складирования с прогнозом их вместимости является важной задачей в инженерной геологии [17, 24, 27].

Сам процесс нейтрализации описывается уравнением [23, 25]:



При нейтрализации серной кислоты известняком образуется двухводный гипс ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) в виде кристаллогидрата. В осадке также обнаруживаются кальцит (CaCO_3) и небольшие количества доломита ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Реакция сопровождается выделением тепла, что приводит к нагреву гипсовой пульпы до температуры 40–45°C. В процессе реакции происходит снижение исходного объёма кислоты, так как часть воды связывается в структуре кристаллогидрата, а также выделяется углекислый газ [4, 12, 18]. Образующийся гипсосодержащий отход представляет собой водонасыщенный, текучий, тиксотропный материал серого цвета.

Обсуждение и анализ результатов

Результаты микроскопического анализа проб исследуемых гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты отражены на рисунках 1–4: изображения для пробы 1 и 2 при параллельных николях со шкалой 50 мкм и 0,1 мм. Для образцов характерны кристаллы таблитчатой, пластинчатой, столбчатой и игольчатой формы. Микрорисунки гипса столбчатой формы имеют следующие размеры: в ширину от 2,0 до 7,0 мкм, в длину от 3–5 мкм до 30 мкм. Присутствуют таблитчатые кри-

сталлы гипса, которые в ширину достигают 7–9 мкм и игольчатые кристаллы шириной до 2 мкм. Основной объем занимают ксеноморфные обломочные зерна от 2 до 8 мкм в диаметре.

Основные формы зерен гипсосодержащего отхода схематично изображены на рисунке 5. Гипс представлен в виде прозрачных бесцветных идиоморфных призматических и ромбовидных кристаллов, а также в виде ксеноморфных зерен (рис. 1, 2). Наблюдаются двойники «ласточкин хвост» и выколки по спайности.

При инженерно-геологических исследованиях дисперсных грунтов в первую очередь делают количественную оценку их структуры с помощью гранулометрического анализа размеров слагающих их частиц, а регламентирующим документом его определения является ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава». Используемые в нем методы седиментации, основанные на законе Стокса, корректны только для частиц шарообразной формы, а в слу-

чае с призматическими гипсовыми частицами их применение может привести к недостоверным результатам [1, 3, 27]. Кроме того, в ГОСТ 12536-2014 вопросы работы с засоленными грунтами в части подготовки грунта к испытаниям освещены недостаточно [33].

При определении гранулометрического состава ареометрическим, пипеточным методами и методом лазерной дифракции, как и при изучении физических свойств, необходимо определять влажность материала [15]. В ГОСТ 5180-2015 указано, что для загипсованных грунтов образцы необходимо сушить при температуре 802°C. При этом известно, что определение влажности в таких грунтах, следует проводить при температуре, не превышающей потерю кристаллизационной воды, а для гипса она составляет 60°C [17, 19, 26]. Также следует отметить, что гипсосодержащие отходы являются мономинеральными и не имеют в своем составе глинистых минералов, поэтому использовать показатели консистенции, а именно число пластичности и показатель текучести некорректно.

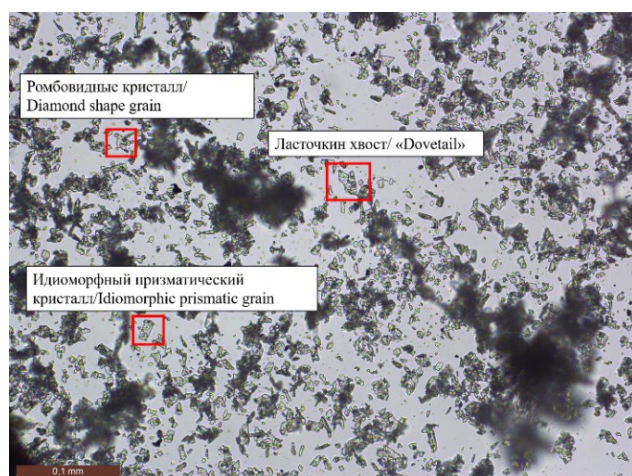


Рис. 1. Проба 1 при параллельных николях со шкалой 0,1 мм
[составлено автором]

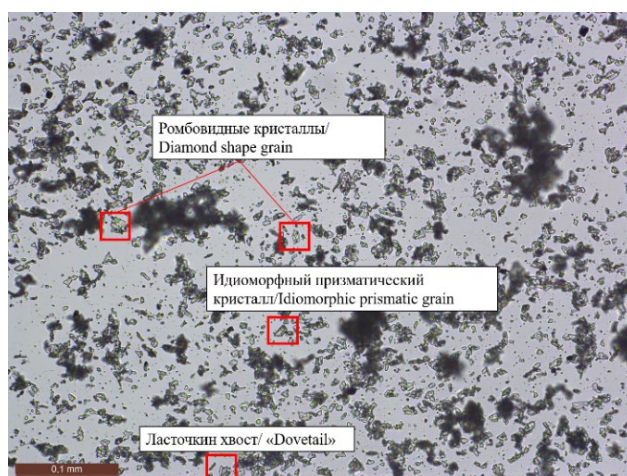


Рис. 2. Проба 2 при параллельных николях со шкалой 0,1 мм
[составлено автором]

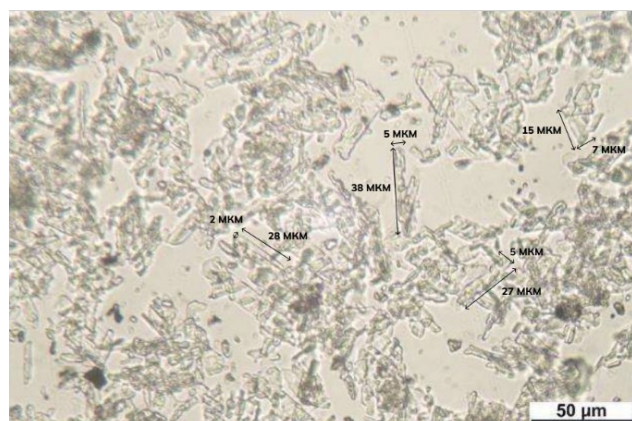


Рис. 3. Проба 1 при параллельных николях со шкалой 50 мкм
[составлено автором]

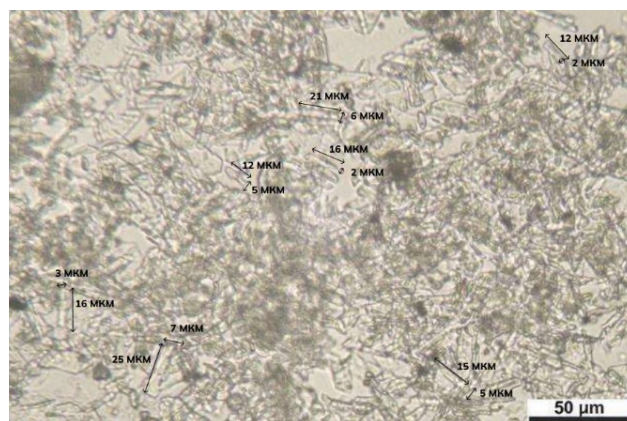


Рис. 4. Проба 2 при параллельных николях со шкалой 50 мкм
[составлено автором]

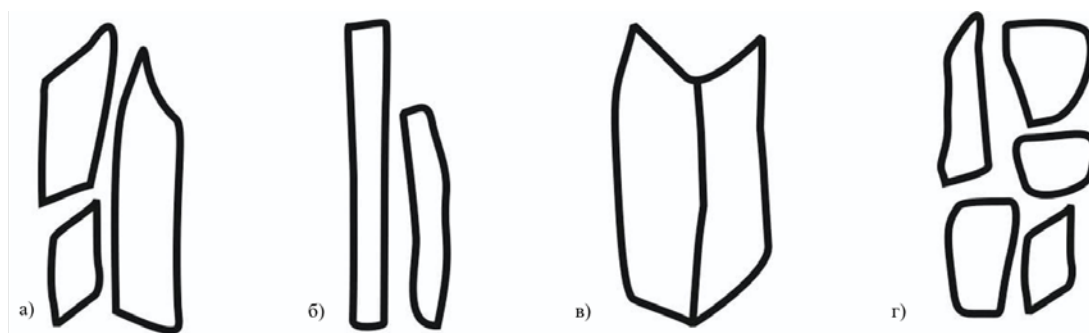


Рис. 5. Формы зерен гипсосодержащего отхода: а) идиоморфные призматические зерна, б) удлинённые игольчатые зерна, в) закономерное срастание зерен «ласточкин хвост», г) ксеноморфные зерна [составлено автором]

Необходимо учитывать, что формирование состава и свойств гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты будет происходить под влиянием внешних и внутренних взаимодействий в процессе наращивания высоты гипсонакопителей, то есть в физическом времени [29]. Например, фактический гранулометрический состав в массиве может определяться возможным фракционированием материала при выпуске пульпы, что может привести к формированию в гипсохранилище различных по крупности материала зон, которые будут отличаться прежде всего фильтрационными характеристиками, определяющими напряженно-деформируемое состояние массива в процессе наращивания высоты сооружения [30, 31, 34]. По этой причине при изучении подобных грунтов необходимо рассматривать их как динамическую систему в пространстве признаков и говорить о методах моделирования процессов изменения состава, структур и свойств грунтов при прогнозируемых внешних воздействиях, что является, согласно Г. К. Бондарик и Л. А. Яр, «основной задачей динамического грунтоведения» и связывает грунтоведение с экзогеодинамикой [2].

Заключение

Действующие методики изучения состава и физико-механических свойств грунтов разрабатывались применительно к грунтам природного происхождения и не учитывают многообразие техногенных грунтов, в том числе гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты, что определяет актуальность разработки новых подходов к их изучению, включая совершенствование и разработку новых методов исследований.

Учитывая молодой возраст объектов складирования намывных гипсосодержащих отходов нейтрализации серной кислоты и малую степень их постгенетических преобразований для обеспечения устойчивости гипсонакопителей необходимо изучать закономерности формирования состава и свойств антропогенных грунтов, моделируя их поведение при прогнозируемых внешних воздействиях, а также осуществлять контроль за состоянием формируемых техногенных массивов в реальном времени [21].

Работы по данной теме планируется продолжать и совершенствовать. Дальнейшие исследования будут отражены в будущих статьях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. И., Ватлина А. М., Махараткин П. Н. Обоснование и выбор расчетных параметров гидрофицированного комплекса оборудования для получения закладочных смесей из текущих хвостов обогащения // Записки Горного института. — 2023. — Т. 262. — С. 541–551. DOI: 10.31897/PMI.2022.68.
2. Бондарик Г. К., Яр Л. А. Инженерная геология. Вопросы теории и практики. Философские и методологические основы геологии. — М.: ИД КДУ, 2015. — 296 с.
3. Буданова Т. Е. Современные методы изучения гранулометрического состава грунтов // Инженерные изыскания. — 2013. — №8. — С. 66–71. EDN: RCDKDT.
4. Взоротов С. А. Особенности процесса нейтрализации технической серной кислоты природным известняком // Бутлеровские сообщения. — 2019. — Т. 58. — №4. — С. 110–118. EDN: ZTRUWD.
5. Вознесенский Е. А. Общая генетическая классификация техногенных грунтов // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. — 2019. — № 5. — С. 3–9. EDN: NWQUZB.
6. Годунов Е. Б. Современные проблемы и пути решения комплексной утилизации отработанной

- серной кислоты и химических источников тока марганцево-цинковой системы / Е. Б. Годунов, И. А. Кузнецова, В. М. Клевлеев // Вестник Технологического университета. — 2017. — Т. 20. — №16. — С. 31–33. EDN: ZIVWMV.
7. Жантасов К. Т., Зият А. Ж., Лавров Б. А. Минералогический и химический состав фосфогипса — отхода производства экстракционной фосфорной кислоты // The Scientific Heritage. — 2021. — № 78–1(78). — С. 24–29; DOI: 10.24412/9215-0365-2021-78-1-24-29. EDN: EVDBRA.
 8. Захарова А. А., Войтеховский Ю. Л. Статистический прогноз параметров обогащения руд по наблюдениям в шлифах // Обогащение руд. — 2024. — №2. — С. 27–31. DOI: 10.17580/or.2024.02.05.
 9. Здобин Д. Ю., Семенова Л. К. О гранулометрическом анализе глинистых грунтов: лазерные и классические методы // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология. — 2011. — №6. — С. 560–567. EDN: OJWQDF.
 10. Каздым А. А. Техногенные грунты и техногенные отложения, техногенные ландшафты и культурный слой — современные проблемы классификации и систематики // Грунтоведение. — 2014. — № 1. — С. 54–70. — EDN: TBRHNP.
 11. Капустин Ф. Л., Афанасьева М. А., Митюшов Н. А., Беднягин С. В. Особенности состава и свойства продукта переработки фосфогипса // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы IV Международной интерактивной научно-практической конференции, Екатеринбург, 15–18 декабря 2014 года. — Екатеринбург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина. — 2015. — С. 401–404. EDN: UFOPAP.
 12. Комаров А. А., Короб Н. Г., Романовский В. И. Синтез дигидрата сульфата кальция из техногенного сырья // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. — 2021. — Выпуск 16. — С. 76–82.
 13. Котлов Ф. В. Антропогенные геологические процессы и явления на территории города / ПНИИС. — Москва: Наука, 1977. — 171 с.
 14. Котова О. Б., Ожогина Е. Г. Минералого-технологические методы оценки труднообогатимых полезных ископаемых // Материалы XVII Геологического съезда Республики Коми. — 2019. — Т. III. — С. 319–322.
 15. Красилов В. А., Эпштейн С. А., Коссович Е. Л., Козырев М. М., Ионин А. А. Разработка методики измерений гранулометрического состава угольной пыли методом лазерной дифракции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022 — № 2. — С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_2_0_5.
 16. Кутепов Ю. И., Кутепова Н. А., Поспехов Г. Б., Васильева А. Д. Инженерно-геологические особенности формирования техногенных массивов из различных видов фосфогипса // Горный журнал. — 2023. — № 5. — С. 69–74. DOI: 10.17580/gzh.2023.09.11. EDN: HTCRXK.
 17. Ларионов А. К. Влажность грунтов и современные методы ее определения. — М: Госгеолтехиздат, 1962.
 18. Леонтьев Л. И. Экологические проблемы «норильского никеля» и возможные пути их решения / Л. И. Леонтьев, А. В. Тарасов // Экология и промышленность России. — 2017. — Т. 21. — №2. — С. 15–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-2-15-19. EDN: XWRYPX.
 19. Литвинова Т. Е., Олейник И. Л. Кинетика растворения фосфатов редкоземельных металлов растворами карбонатов щелочных металлов // Записки Горного института. — 2021. — Т. 251. — С. 712–722. DOI: 10.31897/PMI.2021.5.10.
 20. Максимова В. В., Красавцева Е. А., Савченко Е. Э., Икконен П. В., Елизарова И. Р., Маслобоев В. А., Макаров Д. В. Исследование состава и свойств хвостов обогащения лопаритовых руд текущего производства // Записки Горного института. — 2022. — Т. 256. — С. 642–650. DOI: 10.31897/PMI.2022.88.
 21. Огородникова Е. Н., Николаева С. К., Ван Ч. Намывные грунты и управление их свойствами. — М.: РУДН, 2014. — 368 с. EDN: UJAGZJ.
 22. Огородникова, Е. Н. Классификации техногенных грунтов / Е. Н. Огородникова, С. К. Николаева // Сергеевские чтения: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Москва, 21 марта 2014 года— М.: РУДН, 2014. — Вып. 16. — С. 194–198. EDN: UDQKFZ.
 23. Павлов О. И. Получение гипса путём десульфурации дымовых газов // Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее: сборник научных статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 18–20 октября 2023 года. — Красноярск: Инженерно-строительный институт ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». — 2023. — С. 418–422. EDN: EKRXUE.
 24. Пашкевич М. А., Алексеенко А. В., Нуреев Р. Р. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обо-

- гащения полезных ископаемых // Записки Горного института. — 2023. — Т. 260. — С. 155–167. <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.32>.
25. Прокудина Е. В., Тропников Д. Л., Каратаев А. В., Шукшина О. В. Нейтрализация технической серной кислоты природным известняком на ОАО «Святогор» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2016. — №8. — С. 340–345. EDN: WJGFVL.
 26. Сучков Д. В., Литвинова Т. Е. Фосфогипс как техногенное сырье для получения товарных продуктов с заданными свойствами // Современные тенденции развития химической технологии, промышленной экологии и экологической безопасности: материалы III Всероссийской научно-практической конференции с участием молодых ученых, Санкт-Петербург, 07–08 апреля 2022 года. — СПб: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2022. — С. 69–72. EDN: GPTNER.
 27. Трофимов В. Т. К вопросу об определении гранулометрического состава грунтов с использованием лазерных анализаторов // Инженерные изыскания. — 2014. — №5–6. — С. 29–35. EDN: QNKHSO.
 28. Трофимов В. Т. Развитие теоретического базиса инженерной геологии и ее научных направлений. — М.: Изд-во МГУ, 2024.
 29. Трушко В. Л., Розанов А. О., Сайтгалеев М. М., Петров Д. Н., Ильинов М. Д., Карманский Д. А., Селихов А. А. Критерии акустической эмиссии для анализа процесса разрушения горных пород и оценки формирования трещинных коллекторов на больших глубинах // Записки Горного института. — 2024. — Т. 269. — С. 848–858. EDN: EGOJFL.
 30. Устинова Ю. В., Сивков С. П., Барина О. П., Санжаровский А. Ю. Влияние различных добавок на морфологию кристаллов двуводного гипса // Вестник МГСУ. — 2012. — № 4. — С. 140–144. EDN: PABGQL.
 31. Федоренко Е. В. Интерпретация результатов испытаний при определении прочностных характеристик грунтов. История и состояние вопроса // Грунтоведение. — 2023. — №1. — С. 34–46. DOI: 10.53278/2306-9139-2023-1-20-34-46.
 32. Хакимов Г. Э., Фазлитдинова А. Г. Получение синтетических гипсовых вяжущих материалов из продуктов нейтрализации концентрированной серной кислоты // Студент и научно-технический прогресс: сборник трудов XLVII научной конференции молодых ученых, Челябинск, 03–28 апреля 2023 года. — Челябинск: ЧГУ, 2023. — С. 184–187. EDN: AFENZM.
 33. Шинкарев А. А. Сравнение методов седиментометрии и лазерной дифракции в анализе гранулометрического состава глинистой фракции почв / А. А. Шинкарев А. Г. Корнилова, Ф. А. Трофимова [и др.] // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Естественные науки. — 2010. — Т. 152. — №2. — С. 251–260. EDN: MTIVRR.
 34. Юдина А. В., Фомин Д. С. От понятия элементарной почвенной частицы к гранулометрическому и микроагрегатному анализам (обзор) // Почвоведение. — 2018. — № 11. — С. 1340–1362. DOI: 10.1134/S0032180X18110096. EDN: PILSPH.