ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(2-1):99-113
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 622.234 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_99

РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДРЕНАЖНОГО СЛОЯ В ОСНОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ШТАБЕЛЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

М.А. Маринин[1], Г.Б. Поспехов[1], М.А. Карасев[1], В.И. Сушкова[1]

[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru

Аннотация: При проектировании штабелей кучного выщелачивания с применением окомкования песчано-глинистых руд необходимо прогнозировать возможные проблемы эксплуатации дренажной системы за счет кольматации в результате разрушения окатышей и механического повреждения слоя горнотранспортным оборудованием. В работе решается задача по обоснованию параметров дренажного слоя в основании динамического штабеля кучного выщелачивания. Представлены результаты комплекса лабораторных испытаний материалов дренажного слоя, включающие фильтрационные и деформационные тесты. Объектом исследования выступил материал отвалов Куранахского рудного поля, представленный продуктами дробления двух фракций – 20–70 мм и 0–120 мм с содержанием песчано-глинистых включений. Результаты исследования подтвердили техническую возможность использования материала крупностью 0–120 мм, содержащего песчано-глинистые включения, в качестве дренажного слоя. Методом численного моделирования на основе полученных экспериментальных данных определены оптимальные параметры его мощности, обеспечивающие необходимый фильтрационный режим работы системы и защиту дренажных труб от механических воздействий горнотранспортного оборудования. Полученные результаты могут быть использованы для проектирования новых и реконструкции действующих объектов кучного выщелачивания на месторождениях с аналогичными технологическими и горно-геологическими условиями.

Ключевые слова: добыча полезных ископаемых, кучное выщелачивание, дренажная система, дренажные трубы, геотехнические испытания, фильтрационные испытания, численное моделирование, несущая способность.

Для цитирования: *Маринин М. А., Поспехов Г. Б., Карасев М. А., Сушкова В. И.* Расчетное обоснование параметров дренажного слоя в основании динамического штабеля кучного выщелачивания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 2-1. – С. 99–113. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_99.

Computational justification of the parameters of the drainage layer at the base of the dynamic pile of heap leaching

M.A. Marinin[1], G.B. Pospehov[1], M.A. Karasev[1], V.I. Sushkova[1]

[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru

© М.А. Маринин, Г.Б. Поспехов, М.А. Карасев, В.И. Сушкова. 2026.

Abstract: The design of heap leaching pads for pelletized sandy-clayey ores requires forecasting operational challenges in the drainage system. These challenges arise from colmatation due to pellet degradation and mechanical damage to the drainage layer from mining equipment. This study aims to substantiate the design parameters of the drainage layer for a dynamic heap leaching (HL) pad. The paper presents results from a comprehensive suite of laboratory tests on drainage materials, including filtration and deformation analyses. The test material, sourced from the dumps of the Kuranakh ore field, consisted of crushed products in two size fractions: 20–70 mm and 0–120 mm, containing sandy-clay inclusions. The findings confirm the technical viability of utilizing the 0–120 mm fraction with sandy-clay inclusions as an effective drainage layer. Numerical modeling, based on the experimental data, was employed to determine the optimal layer thickness. This optimized parameter ensures the required filtration performance of the system and provides adequate protection for the drainage pipes against mechanical loads from mining equipment. The results are applicable for the design of new facilities and the reconstruction of existing heap leaching operations at deposits with analogous technological and geological conditions.

Key words: mineral extraction, heap leaching, drainage system, drainage pipes, geotechnical testing, filtration testing, numerical modeling, bearing capacity.

For citation: Marinin M. A., Pospehov G. B., Karasev M. A., Sushkova V. I. Computational justification of the parameters of the drainage layer at the base of the dynamic pile of heap leaching. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(2-1):99-113. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_21_0_99.

Введение

Современные тенденции к устойчивому развитию горнодобывающей промышленности требуют перехода к ресурсосберегающим технологиям, которые сочетают экономическую эффективность с экологической ответственностью [1—3].

Важное значение приобретает вовлечение в переработку низкосортных и забалансовых руд, что ранее считалось экономически нерентабельным [4—6]. Это особенно актуально для добычи благородных металлов, таких как золото и серебро, где даже незначительное повышение извлечения может привести к существенному экономическому эффекту [7—9].

Кучное выщелачивание (КВ) — один из эффективных методов извлечения металлов из бедных руд и отвалов. КВ составляет значительную долю в мировом производстве ценных металлов (21% — медь, 9% — золото) [10, 11] и считается передовой технологией, которая успешно адаптируется к разным ландшафтным, климатическим и операционным условиям [12—14].

Современные площадки КВ можно условно разделить на постоянно наращиваемые и повторно используемые (динамические) [15—17]. Метод постоянно наращиваемого штабеля наиболее распространен в горной практике, и зачастую затраты на строительство и эксплуатацию таких площадок ниже. Метод предусматривает строительство основания одноразового использования, а выщелоченная и обезвреженная руда остается на месте переработки [18, 19].

Динамический метод переработки также может иметь ряд преимуществ [20—23] и базируется на циклическом технологическом процессе, включающем последовательную укладку рудного материала, его орошение и последующую

уборку выщелоченного сырья с последующим повторением цикла для новой порции руды. Такой метод предусматривает строительство долговременного основания многоразового использования из твердых гидроизоляционных покрытий, способных выдерживать механическое давление складированного штабеля, погрузочно-разгрузочных механизмов и транспортных средств.

Основание штабеля КВ (подушка выщелачивания) формируется из фундамента, гидроизоляционного покрытия и дренажного слоя, который служит для эффективного сбора фильтрующихся растворов и защиты гидроизоляции от механических повреждений; поверх гидроизоляционного слоя укладывается дренажный материал (песок, гравий или дробленая руда), а для усиления фильтрации на плоских участках, уклонах менее 5° и вдоль главных стоков обычно монтируются гофрированные и перфорированные дренажные трубы [24, 25].

Известно [16, 26, 27], что недостаточная мощность дренажной подушки вызывает чрезмерное давление на дренажные трубы от веса вышележащей руды, приводящее к их деформации. Это снижает пропускную способность системы на 40—60%, увеличивает риск подтопления основания и, как следствие, вызывает выброс кислотных стоков за пределы кучи и загрязнение окружающей среды [28, 29]. Комбинация модифицированных уравнений Жиру (расчет нагрузки на трубы) и Мэннинга (оценка скорости потоков) позволяет рассчитать минимальную толщину дренажного слоя, предотвращающую деформации.

Цель данного исследования заключается в определении оптимальных параметров дренажного слоя основания динамического штабеля КВ на примере песчано-глинистых руд Куранахского рудного поля. Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи: провести оценку фильтрационных характеристик дробленной руды различных фракций с целью определения их пригодности для использования в качестве дренажного материала, а также установить оптимальную мощность дренажного слоя, обеспечивающую требуемый фильтрационный режим и защиту дренажных труб от механического воздействия горнотранспортного оборудования.

Объект исследования

Объектом исследования выступает дренажный слой основания динамического штабеля КВ, который включает материал из отвалов Куранахского рудного поля (представленный продуктами двух фракций — 20—70 мм и 0—120 мм с содержанием песчано-глинистых включений) и систему сбора технологических растворов на основе полиэтиленовых перфорированных труб диаметром 160 мм, а также песчано-глинистый рудный материал, формирующий тело штабеля КВ.

Предметом исследования являются комплексные деформационные и фильтрационные характеристики дренажного слоя, которые изучаются посредством моделирования нагрузок при строительстве и эксплуатации.

В практике эксплуатации площадок КВ в качестве дренажного материала традиционно применяется гравийный отсев с фракцией 20—70 мм, но его использование требует значительных затрат на дробление и грохочение больших объемов горной породы. В связи с этим в работе рассматривается альтернативный вариант использования материала «грубого» грохочения — отсева крупностью 0—120 мм. Несмотря на потенциально более низкие фильтрационные характеристики такого материала, обусловленные наличием песчано-глинистых включений, его применение

Таблица 1

Результаты раздельного ситового анализа проб материала при крупности –120+0 мм и –70+20 мм
The results of separate sieve analysis of material samples with a grain size of –120+0 mm and –70+20 mm

Проба –120+0			Проба –70+20		
класс крупности, мм	масса, кг	выход, %	класс крупности, мм	масса, кг	выход, %
–120+75	81,91	33,95	–70+63	7,6	3,69
–75+63	34,03	14,10	–63+53	11,15	5,41
–63+53	27,9	11,56	–53+45	43,35	21,04
–53+37,5	25,65	10,63	–45+37,5	47,35	22,98
–45+37,5	14,45	5,99	–37,5+22,4	75,4	36,59
–37,5+22,4	18,95	7,85	–22,4+16	13,4	6,50
–22,4+16	5,95	2,47	–16+0	7,8	3,79
–16+13	3,1	1,28			
–13+6	8,15	3,38			
–6+2	2,28	0,94			
–2+1	1,92	0,80			
–1+0,5	3,71	1,54			
–0,5+0,1	6,03	2,50			
–0,1+0	7,25	3,00			
Итого	241,28	100,00	Итого	206,05	100,00

может обеспечить существенную экономию за счет сокращения затрат на строительство подушки выщелачивания.

Гранулометрический состав исследуемых материалов приведен в табл. 1. Согласно таблице Б.10 ГОСТ 25100-2011, по гранулометрическому составу материал крупностью 20 — 70 мм относится к однородным грунтам, а материал крупностью 0 — 120 к неоднородным грунтам.

Тело штабеля КВ формируется из песчано-глинистых отложений с включениями обломков окварцованных метасо-

Таблица 2

Технические характеристики трубы Перфокор SN16 DN/OD 160[1]
Technical specifications of Perfocor pipe SN16 DN/OD 160[1]

Общие характеристики		Геометрические характеристики трубы				Геометрические характеристики гофр			
$\frac{(DN/OD)}{d_i}$	SN	d_{em}	d_i	e_4	e_5	e_c	e_3	t	l
160/139	16	160	139	1	0.1	10	1	12	9

Примечание: SN — кольцевая жесткость; d_{em} — средний наружный диаметр; d_i — внутренний диаметр; e_4 — толщина стенки; e_5 — толщина стенки внутреннего слоя; e_c — высота гофр; e_3 — толщина стенки гофр; t — шаг гофр; l — ширина выступа.

Таблица 3

Механические характеристики материала трубы Перфокор*
Mechanical characteristics of Perforcor pipe material

Наименование материала	E_0, МПа	E_t, МПа	v	σ_t, МПа
Полиэтилен	1050	200	0.43	21

Примечание: E_0 — мгновенный модуль деформации; E_t — длительный модуль деформации; v — коэффициент поперечной деформации; σ_t — длительное расчетное сопротивление материала.
* СТО 73011750-006-2010. Рекомендации по проектированию и строительству дренажных систем из полиэтиленовых труб «Перфокор» с двухслойной профилированной стенкой. – М., 2010.

матитов. Предварительное окомкование глинистого материала перед формированием рудного штабеля КВ улучшает его фильтрующие характеристики, однако при полном водонасыщении окомкованные песчано-глинистые руды подвержены разрушению, что приводит к возврату материала в исходное состояние и забиванию пор дренажного слоя, существенно снижая эффективность фильтрации растворов через штабель [30 – 32].

В качестве системы сбора растворов для последующего анализа и моделирования выбрана дренажная система на основе труб марки Перфокор SN16 DN/OD 160. Подробные технические характеристики данной системы представлены в табл. 2.

Механические характеристика материала трубы Перфокор сведены в табл. 3.

При строительстве и эксплуатации штабеля КВ используется горнотранспортное оборудование: гидравлический экскаватор с удельным давлением на грунт 1,52 кг/см^2 и автосамосвалы массой до 100 т с удельным давлением до 5,38 кг/см^2. Учитывая, что основное воздействие на основание оказывает автосамосвал, дальнейшие расчеты выполнены с учетом его параметров.

Максимальный нормативный вес, передаваемый на одно колесо автосамосвала, составляет 328,7 кН, что при учете габаритов колеса и площади его контакта с дренажным слоем создает нормативное давление 825 кПа. При расчете распределения напряжений в дренажном слое принято допущение о круглом пятне контакта, результаты которого представлены в табл. 4 и показывают характер распределения нагрузки по глубине дренажного слоя. В процессе эксплуатации дренажного слоя основания динамического штабеля КВ существует ряд потенциальных рисков, способных привести к существенному

Таблица 4

Изменение вертикальных напряжений по глубине при действии собственного веса дренажного слоя и нагрузки от самосвала
Change in vertical stresses with depth under the combined action of self-weight of the drainage layer and load from haul truck (dump truck)

Глубина от поверхности дренажного слоя, м	Изменение вертикальных напряжений (кПа) по глубине		
	от веса дренажного слоя и рудного штабеля	от нагрузки от колеса самосвала	полное
0,0	0	825	825
0,5	9	378	386
1	17	135	152
1,5	26	65	90
2	34	38	72
2,5	43	24	67
3	51	17	68
3,5	60	13	72
4	68	10	78
4,5	77	8	84
5	85	6	91

Рис. 1. Лабораторный стенд для испытаний под нагрузкой, рабочие габариты 45х45х45 см
Fig. 1. Laboratory stand for load testing, working dimensions 45x45x45 cm

ухудшению его фильтрационных характеристик.

К основным из них относятся:

• кольматация дренажного слоя за счет размокания окатышей [33];

• вероятность возникновения слабопроницаемых прослоев на границе дренажного слоя с материалом штабеля вследствие его разрушения [34, 35];

• механические повреждения от горнотранспортной техники с продавливанием и разрушением материалов дренажного слоя, а также вдавливание мелкодисперсной фракции в поровое пространство дренажного слоя [36];

• гранулометрическая неоднородность рудного материала, особенно при высоком содержании глинистых и пылеватых фракций (25 — 30%), которая при уплотнении может привести к формированию плотных, слабопроницаемых прослоев, изолирующих дренажный слой [37].

Рис. 2. Лабораторный стенд с дренажным материалом фракции 20 — 70 мм и окомкованной песчано-глинистой рудой фракции 0 — 20 мм
Fig. 2. Laboratory stand with drainage material of 20 — 70 mm fraction and lumpy sandy-clay ore of 0 — 20 mm fraction

Учитывая потенциальную угрозу для работоспособности дренажной системы, все вышеперечисленные факторы требуют детального исследования и оценки еще на этапе предпроектной подготовки и проектирования площадки КВ.

Методика проведения лабораторных стендовых испытаний и численного моделирования фильтрационных и деформационных характеристик окомкованных руд и дренажного слоя при механическом нагружении

Лабораторные исследования включают стендовые испытания для изучения фильтрационных свойств окомкованных руд и дренажного слоя [38]. Методика включает два последовательных этапа:

испытания без нагрузки и под нагрузкой, имитирующей давление рудного штабеля и горнотранспортного оборудования.

На первом этапе стенд (см рис. 1) заполняется сначала дренажным материалом, далее окомкованной песчано-глинистой рудой крупностью 0 — 20 мм. Проводится моделирование орошения с фактической интенсивностью и имитация полного затопления. В процессе фиксируются следующие параметры: скорость фильтрации дренажного слоя, степень заиливания растворов, масса осадка на выходе и в дренажном слое, а также степень его проникновения.

Испытания проводятся для двух фракций дренажного материала (20 — 70 мм и 0 — 120 мм), см. рис. 2.

Второй этап характеризуется ступенчатым нагружением материала от 0 до 12 тс, что соответствует давлению от штабеля руды (высота штабеля была ограничена 20 м) или горнотранспортного оборудования. На каждом этапе нагрузки измеряются параметры деформации материала и степень проникновения мелкодисперсных частиц в дренажный слой. Расчет нагрузки производится по формуле, учитывающей плотность руды (ρ, т/м^3), высоту штабеля ($h_{сл}$, м) и площадь контакта (F, м^2):

$$\delta = \rho \cdot h_{сл} \cdot F$$

Далее повторяются фильтрационные испытания с фиксацией изменений характеристик согласно ГОСТ 25584-2016 и Справочному руководству гидрогеолога [Максимов В. М., Бабушкин В. Д., Веригин Н. Н. и др. Справочное руководство гидрогеолога. 3-е изд., перераб. и доп. Т. 1 / Под ред. В.М. Максимова. — Л.: Недра, 1979. — 512 с.].

Прогноз несущей способности и устойчивости дренажной трубы выполнен методом конечных элементов в трехмерной постановке с учетом физической и геометрической нелинейности. Рассмотрен участок дренажной трубы, достаточной длины для описания ее сложной геометрической формы. Взаимодействие между грунтовым массивом и дренажной трубой моделируется через контактные условия с коэффициентом трения 0,3, обеспечивающие возможность проскальзывания.

Расчет включает постепенное увеличение вертикальной нагрузки до момента исчерпания несущей способности, определяемого по критерию неограниченного роста деформаций. Потеря устойчивости трубы моделируется в явном виде с использованием упругопластической модели среды, основанной на условии пластичности Мизеса.

Результаты и обсуждение

Результаты лабораторных исследований фильтрационных характеристик дробленного обломочного материала демонстрируют высокую водопроницаемость обеих фракций. При испытаниях в стенде без нагрузки для материала крупностью 20 — 70 мм и 0 — 120 мм получены сопоставимые значения коэффициента фильтрации в диапазоне 50 — 200 м/сут, что, согласно ГОСТ 25100-2020, соответствует категории очень сильноводопроницаемых скальных грунтов.

Анализ влияния механической нагрузки показал различия между фракциями. Для материала 20 — 70 мм коэффициент фильтрации остается стабильным (около 170 м/сут) и не зависит от воздействия транспортной нагрузки. В то же время материал фракции 0 — 120 мм демонстрирует снижение фильтрационной способности на 20 — 50% под нагрузкой, однако даже при максимальном уплотнении сохраняет коэффициент фильтрации не ниже 30 м/сут, что также соответствует категории очень сильноводопроницаемых грунтов.

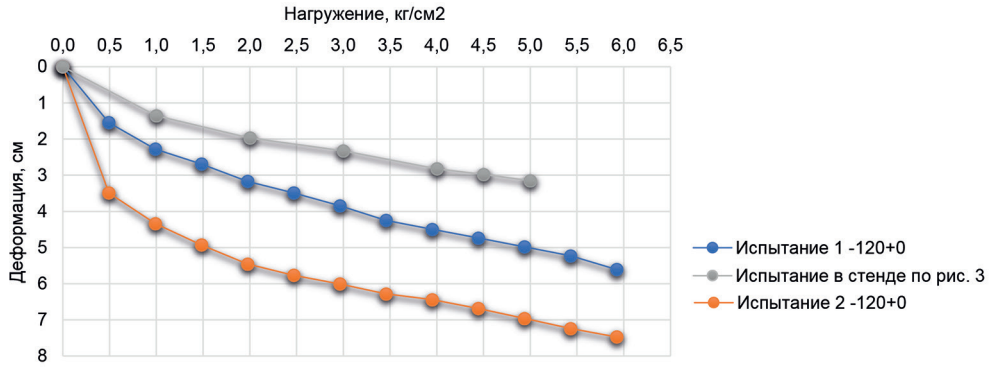

Рис. 3. Значения деформации материала под воздействием нагрузки
Fig. 3. Values of material deformation under load

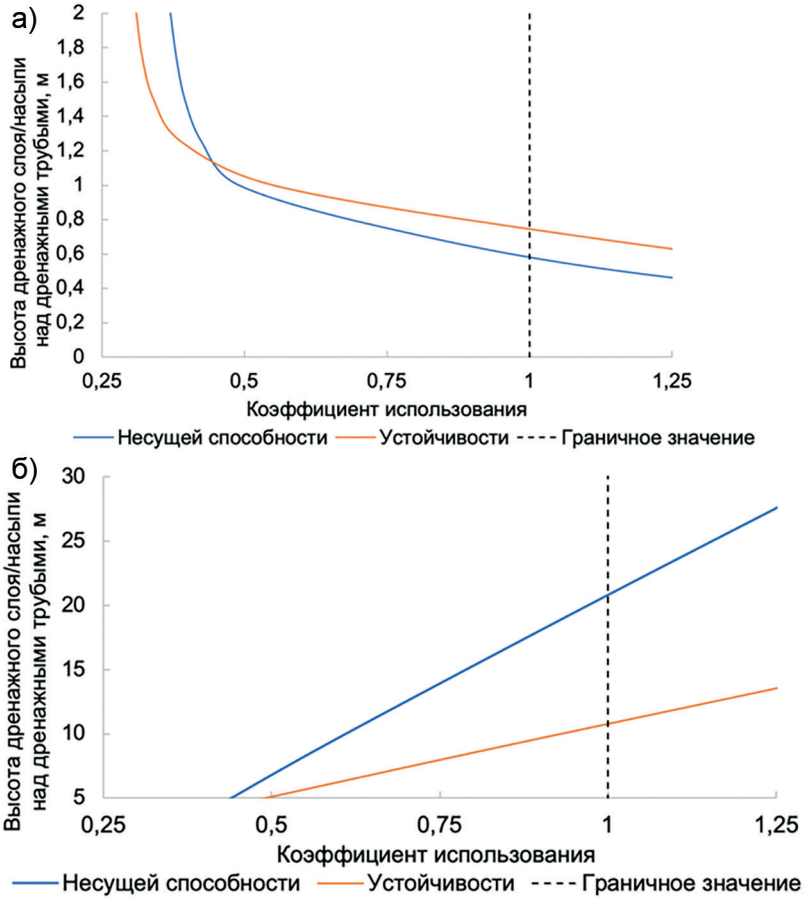

Рис. 4. Закономерности изменения коэффициента запаса по несущей способности и устойчивости: при действии нагрузки от самосвала (а); от собственного веса (б)
Fig. 4. Patterns of change in the reserve coefficient for load-bearing capacity and stability: under the action of a load from a dump truck (a); from its own weight (b)

Значения деформаций материала под воздействием нагрузки представлены на рис. 3.

Наибольшие значения деформации под воздействием нагрузки, имитирующей давление от колеса автосамосвала, наблюдаются для материала крупностью 0 — 120 мм.

Полученные результаты лабораторных испытаний подтверждают техническую возможность использования материала крупностью 0 — 120 мм, содержащего песчано-глинистые включения, в качестве дренажного слоя.

При этом следует учитывать возможное снижение фильтрационных характеристик под нагрузкой, которое может быть компенсировано применением дренажных труб.

Выполненные расчеты несущей способности и устойчивости дренажных труб определили допустимый диапазон их заложения: минимальная глубина составляет 0,75 м, а максимальная — 11 м. Графическое представление результатов данных расчетов представлено на рис. 4.

Примененная методика расчета предусматривает трехкратное увеличение предельно допустимой нагрузки относительно расчетной величины. Это позволяет установить коэффициент надежности несущей способности и устойчивости дренажной трубы, равный 3. В результате расчетная предельная высота динамического штабеля возрастает не менее 30 м. Результаты численного анализа несущей способности и устойчи-

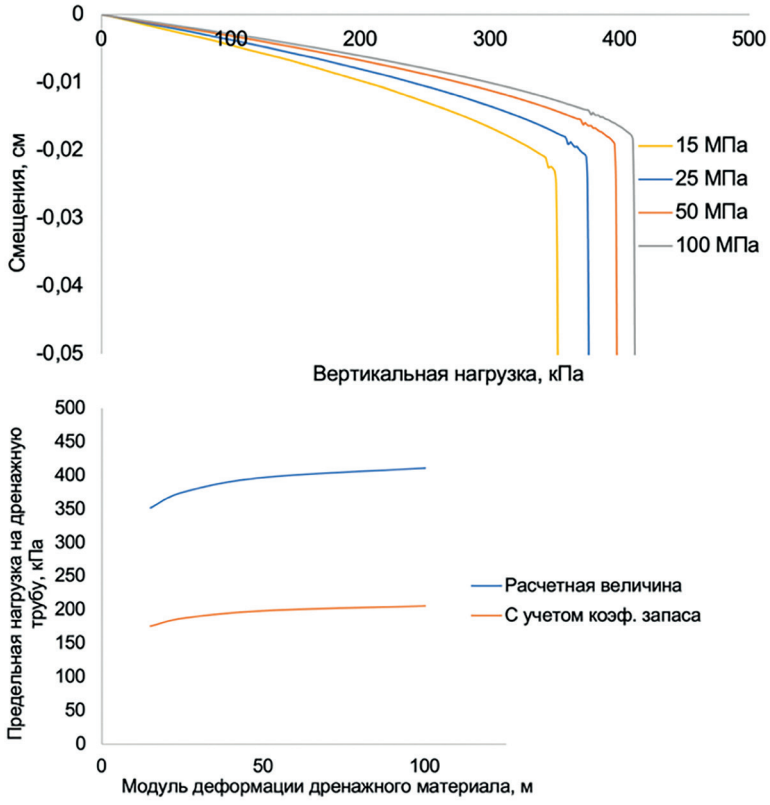

Рис. 5. Несущая способность дренажной трубы
Fig. 5. Load-bearing capacity of drainage pipes

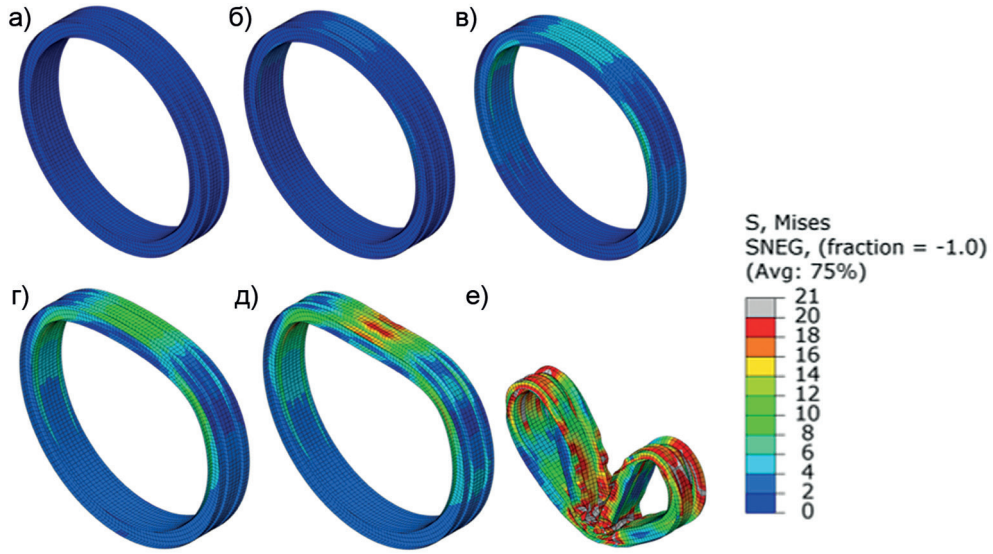

Рис. 6. Характер деформирования дренажной трубы и картина распределения напряжений по Мизесу (МПа) при приложении расчетной нагрузки (без учета коэффициента перегрузки, модуль деформации дренажного материала 15 МПа): начальное состояние (а); нагрузка 100 кПа (б); нагрузка 200 кПа (в); нагрузка 300 кПа (г); нагрузка 350 кПа (д); нагрузка 353 кПа (е) [составлено авторами]

Fig. 6. The nature of drainage pipe deformation and the distribution of stresses according to Mises when applying the design load (without taking into account the overload coefficient, drainage material deformation modulus 15 MPa): initial state (a); load 100 kPa (b); load 200 kPa (v); load 300 kPa (g); load 350 kPa (d); load 353 kPa (e)

вости дренажной трубы приведены на рис. 5 и 6 соответственно.

Таким образом, при воздействии нагрузки от горнотранспортного оборудования минимальная необходимая мощность дренажного слоя для обеспечения сохранности геометрической формы и поддержания несущей способности дренажной трубы Перфокор SN16 DN/OD 160 составляет 0,75 м (с учетом деформации для материала крупностью 0—120 мм — 1 м). Несущая способность и устойчивость дренажной трубы обеспечивается при высоте штабеля не менее 30 м.

Заключение

При проектировании штабелей кучного выщелачивания с применением окомкования песчано-глинистых руд необходимо прогнозировать возможные проблемы эксплуатации дренажной системы за счет кольматации в результате разрушения окатышей и механического повреждения слоя горнотранспортным оборудованием, приводящим к снижению проницаемости и деформации дренажного слоя.

Проведенные комплексные лабораторные испытания показали, что продукт дробления 20—70 мм, как и исходный материал 0—120 мм, обладают очень высокой водопроницаемостью, но под воздействием нагрузки более крупный материал демонстрирует существенное снижение коэффициента фильтрации. При этом результаты исследований подтвердили техническую возможность использования материала крупностью 0—120 мм, содержащего песчано-глинистые включения, в качестве дренажного слоя. Также использование материала фракции 0—120 мм, несмотря на потенциальное ухудшение

фильтрационных характеристик под нагрузкой, позволяет существенно снизить затраты на строительство дренажного основания за счет отказа от дополнительного грохочения.

С помощью численного моделирования для обеспечения необходимого фильтрационного режима и сохранности геометрической формы и поддержания несущей способности дренажной трубы установлено, что при использовании материала 20—70 мм минимальная глубина заложения составляет 0,75 м, а для 0—120 мм — 1,0 м. При этом сохраняется несущая способность труб при высоте штабеля не менее 30 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Литвиненко В. С.*, *Петров Е. И.*, *Василевская Д. В.*, *Яковенко А. В.*, *Наумов И. А.*, *Ратников М. А.* Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 95—111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

2. *Лигоцкий Д. Н.*, *Долгушин Н. А.* Анализ опыта применения безлюдных технологий при открытой разработке месторождений и перспективы их развития // Горный журнал. — 2025. — № 2. — С. 42—47. DOI: 10.17580/gzh.2025.02.06.

3. *Афанасьев П. И.*, *Белов А. А.* Оценка сейсмовзрывного воздействия на приконтурный массив по амплитудно-частотным характеристикам взрыва // Горная промышленность. — 2025. — № 3. — С. 138—145. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-3-138-145.

4. *Чантурия В. А.*, *Николаев А. И.*, *Александрова Т. Н.* Инновационные экологически безопасные процессы извлечения редких и редкоземельных элементов из комплексных руд сложного вещественного состава // Геология рудных месторождений. — 2023. — Т. 65. — № 5. — С. 402—415. DOI: 10.31857/S0016777023050040.

5. *Пашкевич М. А.*, *Евдокимова М. Е.* Тонкодисперсные отходы титанового производства как добавка для изготовления строительных материалов // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29. — № 2. — С. 19—23. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-2-19-23.

6. *Ширима Д.*, *Викедзи А.*, *Рассказова А. В.* Исследование лежалых отвалов бедной золотосодержащей руды горнодобывающего предприятия Golden Pride Project (GPP) в районе Нзега, Танзания // Горные науки и технологии. — 2024. — Т. 9. — № 1. — С. 5—11. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-07-130.

7. *Голик В. И.*, *Титова А. В.* Алгоритм извлечения металлов из растворов природного выщелачивания потерянных руд // Горная промышленность. — 2024. — № 6. — С. 116—119. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-116-119.

8. *Massel L. V.*, *Komendantova N.*, *Massel A. G.*, *Tsvetkova A. Y.*, *Zaikov K. S.*, *Marinina O. A.* Resilience of socio-ecological and energy systems: Intelligent information technologies for risk assessment of natural and technogenic threats // Journal of Infrastructure, Policy and Development. 2024, no. 8, pp. 4700—4700. DOI: 10.24294/jipd.v8i7.4700.

9. *Секисов А. Г.*, *Лавров А. Ю.* Теневая экономика в сфере золотодобычи и возможные направления ее «осветления» с применением инновационных технологий // Теневая экономика. — 2022. — Т. 6. — № 2. — С. 75—84. DOI: 10.18334/tek.6.2.114736.

10. *Wang L.*, *Yin S.*, *Wu A.* Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals // Journal of Cleaner Production. 2020, vol. 279, article 123705. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123705.

11. *Manning T.*, *Kappes D.* Heap leaching of gold and silver ores // Gold Ore Processing. 2016, pp. 413—428. DOI: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00025-6.

12. *Валиев Н. Г.*, *Голик В. И.* Опыт добычи золота кучным выщелачиванием в Казахстане // Цветные металлы. — 2024. — № 12. — С. 41—46. DOI: 10.17580/tsm.2024.12.04.

13. *Bar N.*, *Teleu N.* Geotechnical evaluation of heap leach pad design / Proceedings of the 14th Australia and New Zealand Conference on Geomechanics, Cairns, Australia. 2023.

14. *Якубовский М. М.*, *Павличенко М. В.*, *Логинов Е. В.* Опыт проведения работ технической рекультивации земель, нарушаемых в процессе разработки месторождения песчано-гравийного материала // Рациональное освоение недр. — 2022. — № 3(65). — С. 66—74. DOI: 10.26121/RON.2022.38.25.007.

15. *Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J.* Heap Leaching technology — current state, innovations, and future directions: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2016, vol. 377, pp. 73 — 119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

16. *Дементьев В. Е.*, *Дружинина Г. Е.*, *Гудков С. С.* Кучное выщелачивание золота и серебра. — Иркутск: Иргиредмет, 2004. — 352 с.

17. *Фазлуллин М. И.*, *Садыков Р. Х.*, *Дементьев В. Е.* Кучное выщелачивание благородных металлов. — М.: Изд-во Акад. горн. наук, 2001. — 646 с.

18. *Van Zyl D., Henderson M., Cobb B.* Economic aspects of pad construction costs on heap leach projects // International Journal of Mining and Geological Engineering. 1990, vol. 8, pp. 275 — 286. DOI: 10.1007/BF00920641.

19. *Каймонов М. В.*, *Матвеев А. И.*, *Хосоев Д. В.* Моделирование теплового режима рудного штабеля при кучном выщелачивании золота в холодном климате // Горная промышленность. — 2025. — № 1. — С. 102 — 108. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-102-108.

20. *Apelt T., Forrester K., Short M., Stefan L.* Determination of optimum heap height from column leach tests: 1. Model development and initial results // Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2017, vol. 126, no. 3, pp. 146 — 156. DOI: 10.1080/03719553.2016.1196520.

21. *Thenepalli T., Chilakala R., Habte L., Tuan L., Kim C. S.* A brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals // Sustainability. 2019, vol. 11, no. 12. article 3347. DOI: 10.390/SU1112334730.

22. *Abbasi B., Azarfar B., Ahmadvand S., Seal T., Ulrich B.* The effect of hydro-jex operation on the stability of heap leach pads: a case study of a heap leach operation in Central Mexico // Mining, Metallurgy & Exploration. 2020, vol. 37, pp. 1583 — 1592. DOI: 10.1007/s42461-020-00251-4.

23. *Smith M., Parra D., Asociados A.* Leach pad cost benchmarking / Proceedings of Heap Leach Solutions. Lima, Peru Published by InfoMine. 2014.

24. *Breitenbach A. J.* Heap leach pad liner systems in North America // Mining Engineering. 1994, vol. 46, no. 1, pp. 46 — 56.

25. *Majdi A., Amini M., Chermahini A. A.* An investigation on mechanism of acid drain in heap leaching // Journal of Hazardous Materials Structures. 2009, vol. 165, pp. 1098 — 1108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.104.

26. *Majdi A., Amini M., Nasab S. K.* Adequate drainage system design for heap leaching structures // Journal of Hazardous Materials. 2007, vol. 147, pp. 288 — 296. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.038.

27. *Niou S., Chaoui K., Azzouz S., Hamlaoui N., Alimi L.* A method for mechanical property assessment across butt fusion welded polyethylene pipes // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018, vol. 97, pp. 543 — 561. DOI: 10.1007/s00170-018-1908-y.

28. *Puhalsky J. V., Vorobyov N. I., Loskutov S. I., Chukaeva M. A., Sidorova V. R., Matveeva V. A.* Neural network cognitive analysis of accumulation of metals by marigold // Doklady Earth Sciences. 2024, vol. 515, no. 2, pp. 701 — 708. DOI: 10.1134/s1028334x23603759.

29. *Ковязин В., Богданова Е.* Современное состояние особо охраняемых природных территорий арктики Российской Федерации // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29. — № 4. — С. 59 — 65. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-4-59-65.

30. *Маринин М. А.*, *Поспехов Г. Б.*, *Сушкова В. И.*, *Поморцева А. А.*, *Мосейкин В. В.* Опыт полевых опытно-фильтрационных работ в штабеле кучного выщелачивания песчано-глинистых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2024. — № 8. — С. 51 — 62. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_51.

31. *Маринин М. А.*, *Карасев М. А.*, *Поспехов Г. Б.*, *Поморцева А. А.*, *Кондакова В. Н.*, *Сушкова В. И.* Комплексное изучение фильтрационных свойств окомкованных песчано-глинистых руд и режимов фильтрации в штабеле кучного выщелачивания // Записки Горного института. — 2023. — Т. 259. — С. 30 — 40. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.

32. *Александрова Т. Н.*, *Абурова В. А.*, *Николаева Н. В.*, *Струк Г. В.* Влияние энергетического воздействия на прочностные характеристики золотосодержащей руды // Обогащение руд. — 2025. — № 3. — С. 3 — 8. DOI: 10.17580/or.2025.03.01.

33. *Татауров С. Б.* Обоснование геотехнологических процессов кучного выщелачивания золота с криогенными преобразованиями минерального сырья: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. — СПб.: СПбГУ, 2011. — 41 с.

34. *Leiming W., Shenghua Y., Aixiang W.* Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals // Journal of Cleaner Production. 2021, vol. 279, article 123705. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123705.

35. *Petrakov D. G., Karmanskiy D. A.* Comparison of analytical and experimental methods for determining dependency of permeability of clayey sandstones on effective pressure // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025, vol. 38, no. 11, pp. 2502 – 2510. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.03.

36. *Thiel R., Smith M. E.* State of the practice review of heap leach pad design issues // Geotextiles and Geomembranes. 2004, vol. 22, no. 6, pp. 555 – 568. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2004.05.002.

37. *Van Staden P. J., Petersen J.* The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, Part 1: Segregation // Minerals Engineering. 2018, vol. 128, pp. 202 – 214. DOI: 10.1016/J.Mineng.2018.08.045.

38. *Маринин М. А., Поспехов Г. Б., Поморцева А. А., Сушкова В. Н.* Патент РФ № 2779166, МПК B03B 13/00, E02D 1/00. Устройство для определения характеристик песчано-глинистых окомкованных руд. 2022, 12 с. ГИАБ

REFERENCES

1. Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V., Naumov I. A., Ratnikov M. A. Assessment of the role of the state in the management of mineral resources. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 95 – 111. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.

2. Ligotsky D. N., Dolgushin N. A. Analysis of experience in the use of unmanned technologies in open pit mining and prospects for their development. *Gornyi Zhurnal*. 2025, no. 2, pp. 42 – 47. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2025.02.06.

3. Afanasev P. I., Belov A. A. Assessment of the seismic-blast effects on the marginal rock mass due to the amplitudefrequency characteristics of the blast. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 3, pp. 138 – 145. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-3-138-145.

4. Chanturia V. A., Nikolaev A. I., Aleksandrova T. N. Innovative environmentally safe processes for the extraction of rare and rare-earth elements from complex ores of perplexed material composition. *Geology of Ore Deposits*. 2023, vol. 65, no. 5, pp. 402 – 415. [In Russ]. DOI: 10.31857/S0016777023050040.

5. Pashkevich M., Evdokimova M. Finely-dispersed wastes of titanium production as an additive for manufacturing of building materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2025, vol. 29, no. 2, pp. 19 – 23. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-2-19-23.

6. Shirima J., Wikedzi A., Rasskazova A. V. Investigation of old waste dump composition of lean gold-bearing ores from the Golden Pride Project (GPP) mining operation in Nzega district, Tanzania. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024, vol. 9, no. 1, pp. 5 – 11. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-07-130.

7. Golik V. I., Titova A. V. An algorithm for extracting metals from natural leaching solutions of lost ores. *Russian Mining Industry Journal*. 2024, no. 6, pp. 116 – 119. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-116-119.

8. Massel L. V., Komendantova N., Massel A. G., Tsvetkova A. Y., Zaikov K. S., Marinina O. A. Resilience of socio-ecological and energy systems: Intelligent information technologies for risk assessment of natural and technogenic threats. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*. 2024, no. 8, pp. 4700 – 4700. DOI: 10.24294/jipd.v8i7.4700.

9. Sekisov A. G., Lavrov A. Yu. Shadow economy in gold mining and how it can be legalised through innovative technologies. *Shadow Economy*. 2022, vol. 6, no. 2, pp. 75 – 84. [In Russ]. DOI: 10.18334/tek.6.2.114736.

10. Wang L., Yin S., Wu A. Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals. *Journal of Cleaner Production*. 2020, vol. 279, article 123705. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123705.

11. Manning T., Kappes D. Heap leaching of gold and silver ores. *Gold Ore Processing*. 2016, pp. 413 – 428. DOI: 10.1016/B978-0-444-63658-4.00025-6.

12. Valiev N. G., Golik V. I. Experience of gold mining by heap leaching in Kazakhstan. *Tsvetnye Metally*. 2024, no. 12, pp. 41 – 46. [In Russ]. DOI: 10.17580/tsm.2024.12.04.

13. Bar N., Teleu N. Geotechnical evaluation of heap leach pad design. *Proceedings of the 14th Australia and New Zealand Conference on Geomechanics,* Cairns, Australia. 2023.

14. Yakubovsky M. M., Pavlichenko M. V., Loginov E. V. Experience in technical recultivation of lands disturbed during the development of sand-gravel deposit. *Mineral mining & conservation*. 2022, no. 3(65), pp. 66 – 74. [In Russ]. DOI: 10.26121/ RON.2022.38.25.007.

15. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching technology — current state, innovations, and future directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2016, vol. 377, pp. 73 — 119. DOI: 10.1080/08827508.2015.1115990.

16. Dement'ev V. E., Druzhinina G. E., Gudkov S. S. *Kuchnoe vyshchelachivanie zolota i serebra* [Heap leaching of gold and silver], Irkutsk, Irgiredmet, 2004, 352 p.

17. Fazlullin M. I., Sadykov R. Kh., Dement'ev V. E. *Kuchnoe vyshchelachivanie blagorodnykh metallov* [Heap leaching of noble metals], Moscow, 2001. 646 p.

18. Van Zyl D., Henderson M., Cobb B. Economic aspects of pad construction costs on heap leach projects. *International Journal of Mining and Geological Engineering*. 1990, vol. 8, pp. 275 — 286. DOI: 10.1007/BF00920641.

19. Kaimonov M. V., Matveev A. I., Hosoev D. V. Modeling of thermal conditions for ore stockpile in heap leaching of gold in cold climates. *Russian Mining Industry Journal*. 2025, no. 1, pp. 102 — 108. [In Russ]. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-1-102-108.

20. Apelt T., Forrester K., Short M., Stefan L. Determination of optimum heap height from column leach tests: 1. Model development and initial results. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2017, vol. 126, no. 3, pp. 146 — 156. DOI: 10.1080/03719553.2016.1196520.

21. Thenepalli T., Chilakala R., Habte L., Tuan L., Kim C. S. A brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals. *Sustainability*. 2019, vol. 11, no. 12. article 3347. DOI: 10.390/SU1112334730.

22. Abbasi B., Azarfar B., Ahmadvand S., Seal T., Ulrich B. The effect of hydro-jex operation on the stability of heap leach pads: a case study of a heap leach operation in Central Mexico. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2020, vol. 37, pp. 1583 — 1592. DOI: 10.1007/s42461-020-00251-4.

23. Smith M., Parra D., Asociados A. Leach pad cost benchmarking. *Proceedings of Heap Leach Solutions*. Lima, Peru Published by InfoMine. 2014.

24. Breitenbach A. J. Heap leach pad liner systems in North America. *Mining Engineering*. 1994, vol. 46, no. 1, pp. 46 — 56.

25. Majdi A., Amini M., Chermahini A. A. An investigation on mechanism of acid drain in heap leaching. *Journal of Hazardous Materials Structures*. 2009, vol. 165, pp. 1098 — 1108. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.104.

26. Majdi A., Amini M., Nasab S. K. Adequate drainage system design for heap leaching structures. *Journal of Hazardous Materials*. 2007, vol. 147, pp. 288 — 296. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2007.01.038.

27. Niou S., Chaoui K., Azzouz S., Hamlaoui N., Alimi L. A method for mechanical property assessment across butt fusion welded polyethylene pipes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018, vol. 97, pp. 543 — 561. DOI: 10.1007/s00170-018-1908-y.

28. Puhalsky J. V., Vorobyov N. I., Loskutov S. I., Chukaeva M. A., Sidorova V. R., Matveeva V. A. Neural network cognitive analysis of accumulation of metals by marigold. *Doklady Earth Sciences*. 2024, vol. 515, no. 2, pp. 701 — 708. DOI: 10.1134/s1028334x23603759.

29. Kovyazin V., Bogdanova E. Current state of specially protected natural areas of the Arctic of the Russian Federation. *Ecology and Industry of Russia*. 2025, vol. 29, no. 4, pp. 59 — 65. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-4-59-65.

30. Marinin M. A., Pospehov G. B., Sushkova V. I., Pomortseva A. A., Moseykin V. V. Experience of trial percolation in heap leaching pile of sandy–clayey rocks. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024, no. 8, pp. 51 — 62. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_8_0_51.

31. Marinin M. A., Karasev M. A., Pospehov G. B., Pomortseva A. A., Kondakova V. N., Sushkova V. I. Comprehensive study of filtration properties of pelletized sandy clay ores and filtration modes in the heap leaching stac. *Journal of Mining Institute*. 2023, vol. 259, pp. 30 — 40. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.7.

32. Aleksandrova T. N., Aburova V. A., Nikolaeva N. V., Struk G. V. The influence of energy exposure on the strength characteristics of gold-bearing ore. *Obogashchenie Rud*. 2025, no. 3, pp. 3 — 8. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2025.03.01.

33. Tataurov S. B. *Obosnovanie geotekhnologicheskikh protsessov kuchnogo vyshchelachivaniya zolota s kriogennymi preobrazovaniyami mineral'nogo syr'ya* [Justification of geotechnological processes of heap leaching of gold with cryogenic transformations of mineral raw materials], Doctor's thesis, Saint-Petersburg, 2011, 41 p.

34. Leiming W., Shenghua Y., Aixiang W. Ore agglomeration behavior and its key controlling factors in heap leaching of low-grade copper minerals. *Journal of Cleaner Production*. 2021, vol. 279, article 123705. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123705.

35. Petrakov D. G., Karmanskiy D. A. Comparison of analytical and experimental methods for determining dependency of permeability of clayey sandstones on effective pressure. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2025, vol. 38, no. 11, pp. 2502–2510. DOI: 10.5829/ije.2025.38.11b.03.

36. Thiel R., Smith M. E. State of the practice review of heap leach pad design issues. *Geotextiles and Geomembranes*. 2004, vol. 22, no. 6, pp. 555–568. DOI: 10.1016/j.geotexmem.2004.05.002.

37. Van Staden P. J., Petersen J. The effects of simulated stacking phenomena on the percolation leaching of crushed ore, Part 1: Segregation. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 128, pp. 202–214. DOI: 10.1016/J.Mineng.2018.08.045.

38. Marinin M. A., Pospekhov G. B., Pomortseva A. A., Sushkova V. I. Patent RU 2779166, МПК B03B 13/00, E02D 1/00. 2022. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Маринин Михаил Анатольевич[1] — канд. техн. наук,
доцент, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,
Поспехов Георгий Борисович[1] — канд. геол.-минерал. наук,
доцент, e-mail: pospehov@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9090-5150,
Карасев Максим Анатольевич[1] — д-р техн. наук,
профессор, e-mail: karasev_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,
Сушкова Вероника Ивановна[1] — аспирант,
e-mail: s235054@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4247-6499,
[1] Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Для контактов: Маринин М.А., e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

M.A. Marinin[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0002-5575-9343,
G.B. Pospekhov[1], Cand. Sci. (Geol. Mineral.),
Assistant Professor, e-mail: pospehov@spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-9090-5150,
M.A. Karasev[1], Dr. Sci. (Eng.), Professor,
e-mail: karasev_ma@pers.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8939-0807,
V.I. Sushkova[1], Graduate Student,
e-mail: s235054@stud.spmi.ru,
ORCID ID: 0000-0003-4247-6499.
[1] Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
199106, Saint-Petersburg, Russia.
Corresponding author: M.A. Marinin, e-mail: marinin_ma@pers.spmi.ru.

Получена редакцией 18.12.2025; получена после рецензии 15.01.2026; принята к печати 19.01.2026.
Received by the editors 18.12.2025; received after the review 15.01.2026; accepted for printing 19.01.2026.