

ФОРМИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ШТАБЕЛЯ КУЧНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ ЗОЛОТА

*А. А. Поморцева,
ООО «Газпром инвест», Санкт-Петербург, Россия
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия;
Г. Б. Поспехов,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация: Исследованы инженерно-геологические условия формирования и эксплуатации техногенного массива песчано-глинистых окомкованных руд штабеля при кучном выщелачивании золота. Выявлены ключевые факторы, определяющие формирование напряженно-деформированного состояния штабеля при кучном выщелачивании. Проведена оценка формирования напряженно-деформированного состояния массива штабеля. Основные методы исследования включали в себя использование численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива штабеля с применением методов механики сплошной среды. Установлено, что оптимальным подходом к оценке напряженно-деформированного состояния является комплексный анализ на основе алгоритма, приближенного к условиям формирования и эксплуатации массива штабеля при кучном выщелачивании. При моделировании учтены этапы строительства штабеля, уплотнение от воздействия горнотранспортного оборудования, а также вес вышележащих пород с учетом различной степени водонасыщения в процессе эксплуатации. Фильтрационное моделирование позволило определить зону полного насыщения при заданных параметрах орошения. Формирование напряженно-деформированного состояния массива штабеля при кучном выщелачивании золота и его устойчивость были проанализированы при моделировании по продольным и поперечным расчетным сечениям.

Ключевые слова: кучное выщелачивание, штабель, напряженно-деформированное состояние, оценка устойчивости, инженерно-геологический прогноз, моделирование геомеханических процессов.

Для цитирования: Поморцева А. А., Поспехов Г. Б. Формирование напряженно-деформированного состояния массива штабеля кучного выщелачивания золота // Маркшейдерия и недропользование. 2024. № 3. С. 72-79. DOI: 10.56195/20793332_2024_3_72_79.

FORMATION OF STRESS-STRAIN STATE OF THE MASSIF OF HEAP LEACHING GOLD STACK

*A. A. Pomortseva,
Gazprom invest, Saint Petersburg, Russia
Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia;
G. B. Pospelkhov,
Saint-Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia;*

Abstract: Engineering and geological conditions of formation and operation of the technogenic massif of sandy-clay clay pelletised ores of gold heap leaching stack were investigated. Key factors determining the formation of stress-strain state of heap leaching stack were identified. The formation of the stress-strain state of the stack massif was evaluated. The main research methods included the use of numerical modelling of the stress-strain state of the stack massif with the application of continuum mechanics methods. It was established that the optimal approach to the assessment of the stress-strain state is a complex analysis based on an algorithm approximated to the conditions of formation and operation of the heap leach stack array. The modelling takes into account the stages of stack construction, compaction from the impact of mining transport equipment, as well as the weight of overlying rocks, taking into account different degrees of water saturation during operation. Filtration modelling made it possible to determine the zone of full saturation at given irrigation parameters. The formation of the stress-strain state of the heap leaching gold stack massif and its stability were analysed by longitudinal and cross-sectional modelling.

Keywords: heap leach pad, stress and strain state, stability assessment, engineering and geological forecast, modeling of geomechanical processes.

For citation: Pomortseva A. A., Pospelkhov G. B. Formation of stress-strain state of the massif of heap leaching gold stack. Surveying and subsoil use. 2024;(3):72-79. (In Russ.). DOI: 10.56195/20793332_2024_3_72_79.

Для эффективного решения прикладных задач в области геотехнологий, инженерной геологии и геомеханики необходимо провести детальное описание объекта исследования с целью разработки адекватной расчетной схемы. Применение полуэмпирических и аналитических методов анализа, которые включают в себя обобщение, идеализацию параметров среды и типизацию формы объектов строительства, может оказаться менее эффективным. В связи с этим инженерно-геологические и геомеханические процессы при формировании напряженно-деформированного состояния (далее – НДС) в массивах штабелей участков при кучном выщелачивании (далее – КВ) не могут быть полностью учтены [1, 2].

В настоящее время с целью улучшения точности расчетов и прогностических оценок широко применяются численные методы, основанные на методе конечных элементов (далее – МКЭ). Основным преимуществом МКЭ перед аналитическими методами является возможность учета анизотропии и неоднородности массива горных пород при прогнозировании горно-геомеханических условий [3–5].

Использование метода конечных элементов для оценки НДС массива отвечает условию статического равновесия при применении различных геомеханических моделей материала. Этот метод позволяет оценить развитие НДС с учетом пространственной изменчивости как самого сооружения, так и его отдельных элементов, в результате изменения различных свойств, включая геометрические параметры и неоднородности системы [6–8]. Численное моделирование МКЭ позволяет вычислить коэффициент запаса устойчивости и определить наиболее критическую поверхность скольжения [9, 10].

Цель исследования

Разработка комплексного подхода к численному моделированию НДС массива штабеля при кучном выщелачивании с учетом этапности возведения сооружения, нагрузки от горнотранспортной техники и условий обводненности при эксплуатации.

Метод исследования

Математическое моделирование развития напряженно-деформированного состояния массива штабеля при кучном выщелачивании золота методами механики сплошной среды [11–13].

Объект исследований

Массив штабеля при кучном выщелачивании окомкованных песчано-глинистых золотосодержащих руд состоял

из четырех ярусов. Руда в штабель укладывалась механизированным способом с помощью стакеров. Каждый ярус высотой 10 м был разделен на панели, которые отделялись друг от друга разделительными дамбами высотой 2 м. Для эффективного сбора продуктивного раствора наклон основания штабелей КВ принимали под углом 30° в поперечном направлении и 10° в продольном направлении, что соответствовало промышленной практике [14–16].

Основные конструктивные параметры штабеля при кучном выщелачивании представлены на рисунке 1. В основе алгоритма расчета параметров напряженного состояния штабеля при КВ лежали результаты лабораторных испытаний окомкованных песчано-глинистых руд штабеля.

Расчет устойчивости массива при кучном выщелачивании выполнялся для двух основных расчетных случаев. Первый расчетный этап – этап строительства, характеризующий напряженное состояние массива в процессе его формирования. Второй этап – этап эксплуатации, описывающий изменение напряженного состояния массива в процессе выщелачивания руды. Во время строительства массив и грунты основания находились в сухом состоянии. На этапе эксплуатации грунты ниже уровня обводнения растворами выщелачивания считались полностью водонасыщенными, а грунты выше уровня обводнения растворами выщелачивания – полностью сухими.

В основе расчетной схемы для описания поведения грунтов основания была принята упругопластическая модель Кулона – Мора [17–19]. Для достоверного прогноза изменения НДС массива горных пород зачастую используется упругопластическая модель Кулона – Мора [20]. Эта модель пластического течения используется для анализа механических свойств исследуемых техногенных массивов с целью определения их несущей способности.

Применение модели Кулона – Мора подходит для анализа поведения пород при однократной нагрузке или разгрузке, если жесткость грунта остается постоянной независимо от бокового давления [21, 22]. Однако данная модель неприменима в случаях циклического воздействия нагрузки и разгрузки на массив, подвергающийся нагружению и уплотнению в ходе технологических операций [23, 24].

Модель упрочняющегося грунта была использована для описания поведения окомкованной руды массива штабеля [25, 26]. За основу модели упрочняющегося грунта принята нелинейно-упругая модель Дункана – Ченга, описываю-

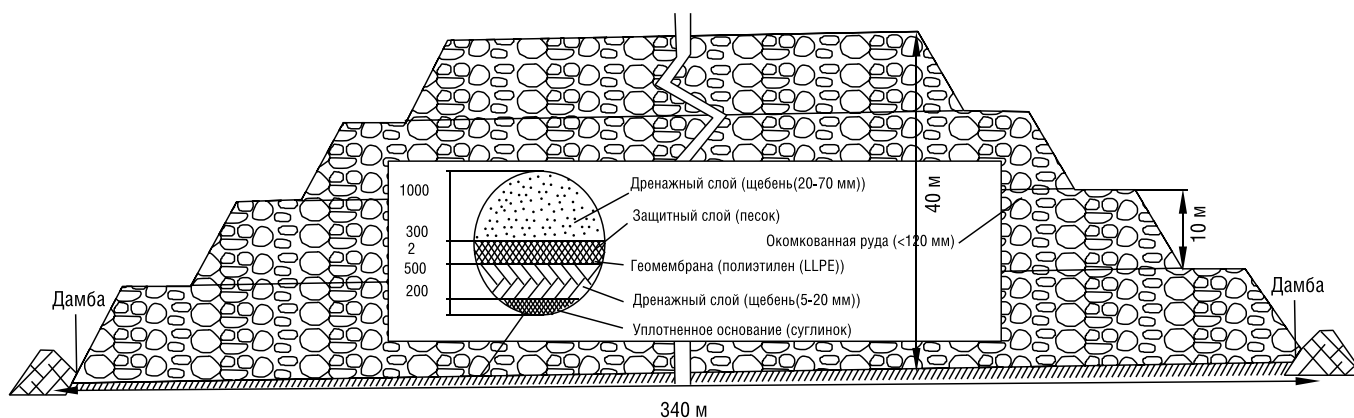


Рис. 1. Схема техногенного массива штабеля при кучном выщелачивании в поперечном направлении

Fig. 1. Schematic of the heap leach stack (cross direction)

шая гиперболическую зависимость вертикальных относительных деформаций ε_1 и компоненты девиатора тензора напряжений q_d (рис. 2).

Кроме модели упрочняющегося грунта часто рассматриваются модели с двойным упрочнением при сдвиге и объемном сжатии [27-29]. Класс таких моделей позволяет независимо друг от друга задавать упрочнение как при сдвиге, так и при сжатии [30-32].

Фильтрационный расчет пористой среды штабеля участка при КВ был реализован на основании модели Van Genuchten - Mualem, получившей широкое распространение в практике. Модель Van Genuchten - Mualem применяется для описания фильтрации через пористые тела в полностью водонасыщенном состоянии и неполностью водонасыщенном состоянии, позволяет учесть изменение фильтрационных характеристик пористой среды в зависимости от степени ее водонасыщения, что в значительной степени повышает достоверность прогноза развития фильтрационных процессов в зоне полного и неполного водонасыщения [33].

Фильтрационные характеристики пористой среды контролировались через характеристическую зависимость между степенью водонасыщения (влажностью) грунта и величиной отрицательного порового давления, которая характеризует способность грунта сохранять жидкость в пористом пространстве при различных значениях порового давления (рис. 2).

При выполнении фильтрационных расчетов аналитическими методами коэффициент фильтрации определялся гранулометрическим составом с учетом крупных включений [34, 35]. Показатели фильтрационной модели не полностью водонасыщенной среды были определены для гранулометрического состава с размерами фракций от 0,002-0,25 м [36].

Параметры фильтрационной модели для окомкованной руды в виде закономерностей изменения отрицательного порового давления и коэффициента фильтрации от степени водонасыщения сведены в таблицу 1.

При анализе фильтрационных характеристик штабеля при заданных параметрах орошения установлено, что зона полного водонасыщения не поднимается выше дренажного слоя, и принятые параметры дренажного слоя позволяют обеспечивать эффективный отвод раствора.

Расчет устойчивости выполнялся на основании численного моделирования в плоско-деформационной постановке в программном комплексе Plaxis. Рассмотрена последовательность этапов формирования ярусов массива, включая воздействие нагрузки от горнотранспортного оборудования и обводненность растворами выщелачивания массива. Процесс формирования массива сопровождается деформацией руды, что приводит к изменению геометрической конфигурации массива за счет уплотнения руды [37].

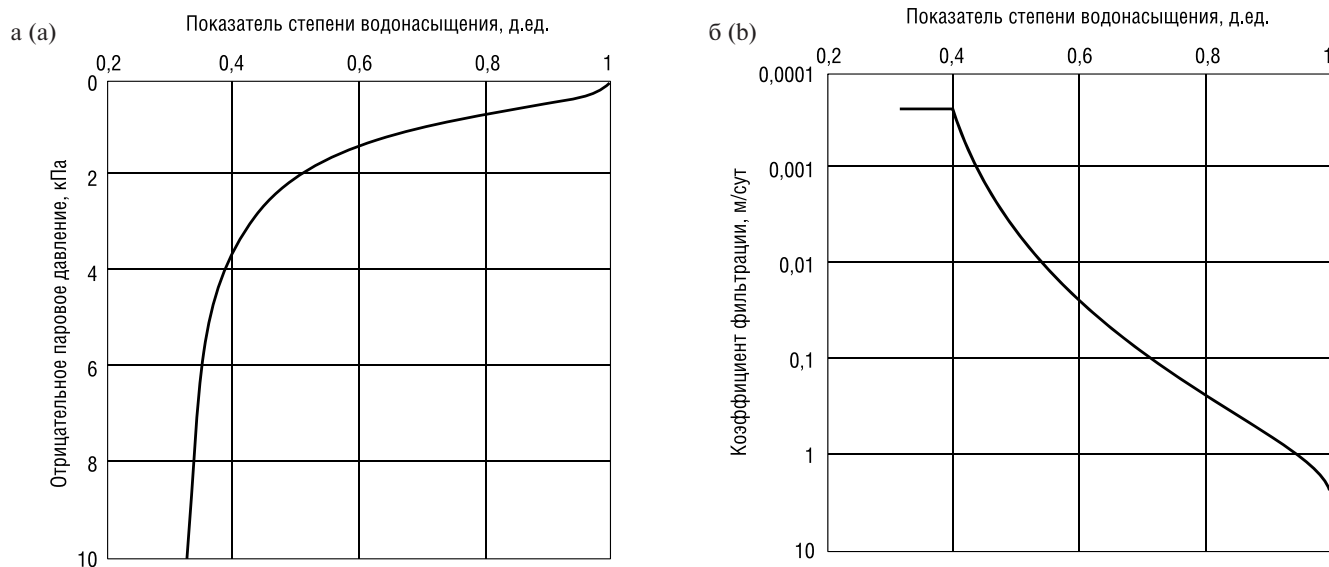


Рис. 2. Зависимости изменения отрицательного порового давления (а) и коэффициента фильтрации (б) от степени водонасыщения

Fig. 2. Dependences of change in negative pore pressure (a) and filtration coefficient (b) on the degree of water saturation

Таблица 1 / Table 1

Параметры фильтрационной модели Van Genuchten - Mualem
Parameters of the Van Genuchten - Mualem filtration model

Наименование материала	Коэффициент фильтрации полностью насыщенной раствором пористой среды k_{sat} , м/сут	Параметр модели Van Genuchten - Mualem					
		S_{res}	S_{sat}	g_a , 1/м	g_n	g_c	g_l
Окомкованная руда	2,35	0,139	1,0	12,4	2,28	-0,56	0,5
Гравийный слой	7,0	0,105	1,0	14,5	2,68	-0,62	0,5
Песчаный слой	3,5	0,105	1,0	14,5	2,68	-0,62	0,5

Таблица 2 / Table 2

Основные механические характеристики основания и элементов сооружения, модель Кулона - Мора
Main mechanical characteristics of the foundation and elements of the structure, Coulomb-Mohr model

Наименование	γ_{unsat} , кН/м ³	γ_{sat} , кН/м ³	c	E_0 , МПа	ν_0	C, кПа	φ , град
Грунт основания							
Суглинок дресвяный с примесью торфа, мягкопластичный	15,6	18,4	0,73	10,0	0,35	18	20
Элемент сооружения							
Тело дамбы	21,0	22,0	0,32	40,0	0,40	10	35
Защитный слой из щебенистого грунта	22,0	24,0	0,73	40,0	0,40	5	40

γ_{unsat} – объемный вес грунта при естественной влажности; γ_{sat} – объемный вес грунта при полном водонасыщении; e – коэффициент пористости; E_0 – модуль деформации грунта; ν_0 – коэффициент поперечной деформации грунта; C – эффективное сцепление грунта; φ – эффективный угол внутреннего трения.

Таблица 3 / Table 3

Основные механические характеристики окомкованной руды, модель Hardening soil
Major mechanical characteristics of pelletised ore, Hardeningsoil model

γ_{unsat} , кН/м ³	γ_{sat} , кН/м ³	e	E_{50} , МПа	E_{oed} , МПа	E_{ur} , МПа	m	c, кПа	φ , град	ψ , град
15,6	17,3	-	10,0	6,5	30	0,6	40	31	0

E_{50} – модуль деформации грунта; E_{oed} – упругий модуль деформации грунта; E_{ur} – модуль упругости грунта; m – показатель, учитывающий влияние среднего напряжения на деформационные свойства грунта; ψ – угол дилатансии.

Расчетные параметры физико-механических характеристик грунтов основания, элементов сооружения и окомкованной руды штабеля сведены в *таблицы 2 и 3*.

Расчеты исследований

При расчете напряженно-деформированного состояния в процессе формирования ярусов массива штабеля при КВ было принято четыре стадии формирования напряженного состояния, каждая из которых соответствует формированию ярусов массива штабеля (*рис. 4, см. цветную вклейку на стр. 27*). В зависимости от принятой расчетной схемы (стадия строительства, стадия эксплуатации) условия обводненности тела массива штабеля при КВ изменялись.

Была проведена оценка устойчивости массива на основе двух форм потери устойчивости: местной и общей. Местная устойчивость относится к потере устойчивости локального участка при минимальном значении коэффициента устойчивости по всему массиву (*рис. 5, см. цветную вклейку на стр. 27*).

Общая устойчивость в свою очередь означает потерю устойчивости всего массива, когда поверхность скольжения простирается через все четыре яруса массива и может иметь катастрофические последствия. При обеспечении общей устойчивости местная устойчивость может оказаться недостаточной.

Результаты оценки устойчивости массива штабеля при КВ согласно принятым расчетным схемам сведены в *таблице 4*. Результаты оценки общей устойчивости массива представлены в *таблице 5*.

Вне скобок приведены результаты оценки устойчивости в программном комплексе Plaxis, учитывающие изменение конфигурации массива в процессе его уплотнения; в скобках приведены результаты оценки устойчивости массива методом предельного равновесия, не учитывающие изменение начальной конфигурации тела массива в процессе уплотнения.

Таблица 4 / Table 4

Оценка местной устойчивости массива штабеля при кучном выщелачивании на стадии строительства
Assessment of local stability of heap leach stack massif at the construction stage

Расчетное сечение	Коэффициент запаса по устойчивости при формировании яруса штабеля			
	I ярус	II ярус	III ярус	IV ярус
Без нагрузки от горнотранспортного оборудования				
Поперечное сечение - I	2.16 (1.72)	2.12 (1.72)	1.98 (1.72)	1.98 (1.72)
Продольное сечение - II	2.18 (1.87)	2.16 (1.87)	2.13 (1.87)	2.01 (1.87)
С учетом нагрузки от горнотранспортного оборудования				
Поперечное сечение - I	1.57 (1.44)	1.76 (1.73)	1.97(1.82)	1.90(1.82)
Продольное сечение - II	1.80 (1.53)	1.95 (1.84)	1.99 (1.85)	1.93 (1.80)

Общая устойчивость откоса массива штабеля при кучном выщелачивании
Overall slope stability of heap leach stack massifs

Расчетное сечение	Коэффициент запаса по устойчивости при различных схемах нагружения				
	Стадия строительства	Стадия эксплуатации			
		режим нормальной эксплуатации	полное водонасыщение первого яруса	полное водонасыщение всех ярусов, с учетом дамб между ярусами	полное водонасыщение всех ярусов
Поперечное сечение - I	1.83	1.61	1.36	1.21	0.76
Продольное сечение - II	1.94	1.88	1.52	1.42	0.91

Заключение

1. В исследовании представлен комплексный подход к моделированию развития напряженно-деформированного состояния техногенного массива штабеля при кучном выщелачивании золота.

2. Основной целью работы является разработка алгоритма численного моделирования напряженно-деформированного состояния массива штабеля участка КВ на основе численного инструмента, способного моделировать инженерно-геологическую и горно-геомеханическую обстановку участка КВ.

3. Для достижения более точных результатов моделирования и прогноза разработан комплексный подход оценки напряженно-деформированного состояния массива, адаптированный под условия сооружения и эксплуатации техногенного массива штабеля участка при кучном выщелачивании золота. Представленная модель показывает, что поверхность скольжения локализуется в пределах яруса и не распространяется на всю высоту штабеля, указывая на повышенный общий коэффициент устойчивости штабеля за счет сбалансированности сил активного давления и сил сопротивления

смещению пород. Рекомендуемая высота каждого яруса в 10 метров считается оптимальной и приемлемой для обеспечения общей устойчивости штабеля для рассматриваемого объекта моделирования.

4. Из проведенного исследования следует, что коэффициент запаса по устойчивости практически не изменяется при увеличении числа ярусов штабеля от первого до четвертого. Деформации преимущественно происходят в окомкованной руде первого яруса, что может привести к смещению пород штабеля и требует принятия специальных мер для поддержания устойчивости первого яруса.

5. В заключение подчеркивается важность проведения численного моделирования напряженно-деформированного состояния на основе комплексного подхода с учетом стадийности формирования и различных вариантов нагружения массива при эксплуатации, включая уплотнение пород массива штабеля под воздействием горнотранспортного оборудования, веса вышележащих пород, а также обводненности массива штабеля участка при кучном выщелачивании золота растворами цианида при обязательном выполнении численного фильтрационного моделирования. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубецкой, К. Н. Принципы обоснования параметров устойчивого и экологически сбалансированного освоения месторождений твердых полезных ископаемых / К. Н. Трубецкой, Д. Р. Каплунов, М. В. Рыльникова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 2. - С. 3-10.
2. Чантурия, В. А. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья / В. А. Чантурия, Л. А. Вайсберг, А. П. Козлов // Обогащение руд. - 2014. - № 2. - С. 3-9.
3. Шумилова, Л. В. Альтернативные варианты подготовки техногенных отходов к выщелачиванию металлов / Л. В. Шумилова, А. Н. Хатькова, В. Г. Черкасов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2021. - № 3-2. - С. 173-181.
4. Иваник, С. А. Флотационное выделение элементарной серы из золотосодержащих кеков / С. А. Иваник, Д. А. Илюхин // Записки Горного института. - 2020. - Т. 242. - С. 202-208.
5. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation / T. Alexandrova, N. Nikolaeva, A. Afanasova [et al.] // Minerals. - 2023. - Vol. 13, № 1. - P. 84-112.
6. Экогетехнология добычи бедных руд с созданием условий для попутной утилизации отходов горного производства / И. В. Соколов, Ю. Г. Антипин, А. А. Рожков [и др.] // Записки Горного института. - 2023. - Т. 260. - С. 289-296.
7. Особенности обоснования параметров кондиций рентабельного извлечения ценных редкоземельных составляющих многокомпонентного минерального сырья / Ф. Д. Ларичкин, Ю. Л. Войтеховский, А. Г. Воробьев [и др.] // Горный журнал. - 2016. - № 1. - С. 49-53.
8. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов: в 2 т. / Под ред. М. И. Фазлуллина. - М.: ИД «Руда и металлы», 2005. - 407 с.
9. Санакулов, К. С. Эффективное использование техногенных отходов при кучном выщелачивании золота / К. С. Санакулов. - Навои, 2021. - 379 с.
10. Механохимическая технология добычи металлов из хвостов обогащения / В. И. Голик, Ю. И. Разоренов, В. С. Бригида [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2020. - Т. 331, № 6. - С. 175-183.
11. Heap leaching: Modeling and forecasting using CFD technology / D. McBride, J. Gebhardt, N. Croft [et al.] // Minerals. - 2018. - Vol. 8, № 1. - P. 9.

12. Кутепов, Ю. И. Методология инженерно-геологического изучения гидрогеомеханических процессов в техногенно-нарушенных массивах при разработке МПИ / Ю. И. Кутепов, Н. А. Кутепова // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2014. - № 8. - С. 123-131.
13. Petersen, J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores. A brief overview / J. Petersen // Hydrometallurgy. - 2016. - Vol. 165. - P. 206-212.
14. Повышение достоверности 3D-моделирования оползневого склона на основе учета данных инженерной геофизики / В. В. Глазунов, С. Б. Бурлуцкий, Р. А. Шувалова [и др.]. // Записки Горного института. - 2022. - Т. 257. - С. 771-782.
15. Лушников, Я. В. Определение физико-механических свойств окатышей при формировании штабеля кучного выщелачивания / Я. В. Лушников, В. К. Багазеев // Известия вузов. Горный журнал. - 2013. - № 8. - С. 124-127.
16. Татауров, С. Б. Экспериментально-теоретические исследования и обоснование геотехнологии формирования штабеля из окомкованных золотосодержащих руд для улучшения его фильтрационных свойств / С. Б. Татауров // Записки Горного института. - Т. 189. - С. 168-174.
17. Gangues and clays minerals as rate-limiting factors in copper heap leaching: a review / N. Toro, Y. Ghorbani, M. D. Turan [et al.] // Metals. - 2021. - Vol. 11. - P. 1539-1554.
18. Деметьев, В. Е. Основные аспекты технологии кучного выщелачивания золотосодержащего сырья / В. Е. Деметьев, А. П. Татаринов, С. С. Гудков // Горный журнал. - 2001. - № 5. - С. 53-55.
19. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching / S. W. Robertson, P. J. van Staden, A. Cherkaev [et al.] // Hydrometallurgy. - 2022. - Vol. 208. - P. 1-17.
20. Argimbaev, K. R. Investigations of the deposit geological structure impact on the technogenic accident risk at the mining plant / K. Argimbaev // Journal of Engineering and Applied Sciences. - 2018. - Vol. 13, № 7. - P. 1713-1717.
21. Reyes, A. 3D slope stability analysis of heap leach pads using the limit equilibrium method / A. Reyes, P. Garma, D. Parra. - Peru, 2014. - P. 257-271.
22. Analysis of mining waste dump site stability based on multiple remote sensing technologies / L. Wei, Y. Zhang, Z. Zhao [et al.] // Remote Sensing. - 2018. - Vol. 10, № 12. - P. 2025-2045.
23. Ponomarenko, T. An assessment of the applicability of sustainability measurement tools to resource-based economies of the commonwealth of independent states / T. Ponomarenko, M. Nevskaya, O. Marinina // Sustainability. - 2020. - Vol. 12, № 14. - P. 5582-5589.
24. Smith, M. Leach pad cost benchmarking / M. Smith, D. Parra, A. Asociados // Proceedings of Heap Leach Solutions. - Peru, 2014. - P. 9.
25. Пашкевич, М. А. Формирование экологического ущерба при складировании сульфидсодержащих отходов обогащения полезных ископаемых / М. А. Пашкевич, А. В. Алексеев, Р. Р. Нуреев // Записки Горного института. - 2023. - Т. 260. - С. 155-167.
26. Rehabilitation of disturbed lands with industrial wastewater sludge / T. A. Petrova, E. Rudzisha, A. V. Alekseenko [et al.] // Minerals. - 2022. - Vol. 12, № 3. - P. 1-19.
27. Господариков, А. П. Техно-технологические аспекты использования валков с профилем в форме треугольника Рело в дробящих агрегатах на рудоподготовительном переделе / А. П. Господариков, Д. А. Ефимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2022. - № 10-2. - С. 117-126.
28. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching / P. Mostaghimi, B. S. Tollit, S. J. Neethling [et al.] // Journal of Engineering Mathematics. - 2014. - Vol. 87, № 1. - P. 111-121.
29. 3D dual pore-system leaching model. Part 1: Study on fluid flow / X. Miao, G. A. Narsilio, A. Wu [et al.] // Hydrometallurgy. - 2017. - Vol. 167. - P. 173-182.
30. Brinkgreve, R. B. J. PLAXIS 3D 2017. Material Models Manual / R. B. J. Brinkgreve. - Netherlands, 2018. - 212 p.
31. Протосеня, А. Г. Прогноз напряженно-деформированного состояния и устойчивости лба забоя тоннеля при пересечении нарушенных зон грунтового массива / А. Г. Протосеня, А. В. Алексеев, П. Э. Вербилло // Записки Горного института. - 2022. - Т. 254. - С. 252-260.
32. Smith, I. M. Programming the finite element method / I. M. Smith, D. V. Griffith. - 2nd edition. - Chisester, U.K.: John Wiley & Sons, 1982. - 351 p.
33. Schanz, T. The Hardening Soil Model: Formulation and verification / T. Schanz, P. A. Vermeer, P. G. Bonnier // Beyond 2000 in Computational Geotechnics. - 1999. - P. 281-290.
34. Деменков, П. А. Прогноз оседания поверхности земли при сооружении котлована вблизи застройки / П. А. Деменков, О. В. Трушко, В. В. Комолов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. - 2019. - № 2. - С. 300-309.
35. Schaap, M. G. A modified mualem-van genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation / M. G. Schaap, M. Th. Van Genuchten // Vadose Zone Journal. - 2006. - Vol. 5. - P. 27-34.
36. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching / P. Mostaghimi, B. S. Tollit, S. J. Neethling [et al.] // Journal of Engineering Mathematics. - 2014. - Vol. 87. - P. 111-121.
37. A Brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals / T. Thenepalli, R. Chilakala, L. Habte [et al.] // Sustainability. - 2019. - Vol. 11, № 12. P. 3347.

REFERENCES

1. Trubetskoy KN, Kaplunov DR, Rylnikova MV. The principles of parametes justification of sustainable and ecologically balanced exploration of solid mineral resources. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2014;2:3-10 (In Russ.).
2. Chanturiya VA, Vaysberg LA, Kozlov AP. Promising trends in investigations aimed at all-round utilization of mineral raw materials. *Ore Dressing.* 2014;2:3-9 (In Russ.).
3. Shumilova LV, Khatkova AN, Cherkasov VG. Alternative preparation of mining waste for metal leaching. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;3-2:173-81 (In Russ.).

4. Ivanik SA, Ilyukhin DA. Flotation extraction of elemental sulfur from gold-bearing cakes. *Journal of Mining Institute*. 2020;242:202-8 (In Russ.).
5. Alexandrova T, Nikolaeva N, Afanasova A, et al. Extraction of low-dimensional structures of noble and rare metals from carbonaceous ores using low-temperature and energy impacts at succeeding stages of raw material transformation. *Minerals*. 2023;13(1):84-112.
6. Sokolov IV, Antipin YuG, Rozhkov AA, et al. Environmental geotechnology for low-grade ore mining with the creation of conditions for the concurrent disposal of mining waste. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:289-96 (In Russ.).
7. Larichkin FD, Voitekhovskiy YuL, Vorobyov AG, et al. Peculiarities of substantiating the parameters of the conditions for cost-effective extraction of valuable rare-earth components of multicomponent mineral raw materials. *Mining Magazine*. 2016;1:49-53 (In Russ.).
8. Underground and heap leaching of uranium, gold and other metals. Ed. M. I. Fazlullina. Moscow, 2005 (In Russ.).
9. Sanakulov KS. Efficient utilisation of technogenic wastes in heap leaching of gold, Navoi, 2021 (In Russ.).
10. Golik VI, Razorenov YuI, Brigida VS, et al. Mechanochemical technology of metal mining from enriching tails. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2020;331(6):175-83 (In Russ.).
11. McBride D, Gebhardt J, Croft N, et al. Heap leaching: Modeling and forecasting using CFD technology. *Minerals*. 2018;8(1):9.
12. Kutepov YuI, Kutepova NA. Methodology of engineering-geological study of hydrogeomechanical processes in technogenic-disturbed massifs during mining MPI. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2014;8:123-31 (In Russ.).
13. Petersen J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores. A brief overview. *Hydrometallurgy*. 2016;165:206-12.
14. Glazunov VV, Burlutsky SB, Shuvalova RA, et al. Increasing the reliability of 3D modeling of a landslide slope based on accounting for engineering geophysics data. *Journal of Mining Institute*. 2022;257:771-82 (In Russ.).
15. Lushnikov YaV, Bagazeev VK. Definition of physical and mechanical properties of ore pellets when forming a stack of heap leaching. *News from universities. Mining magazine*. 2013;8:124-27 (In Russ.).
16. Tataurov SB. Experimental and theoretical studies and justification of geotechnology of stock pile formation from pelletized gold-bearing ores in order to enhance its filtration properties. *Journal of Mining Institute*, 2011;189:168-74 (In Russ.).
17. Toro N, Ghorbani Y, Turan MD, et al. Gangues and clays minerals as rate-limiting factors in copper heap leaching: a review. *Metals*. 2021;11:1539-54.
18. Dementev VE, Tatarinov AP, Gudkov SS. Main aspects of heap leaching technology for gold-bearing raw materials. *Mining Magazine*. 2001;5:53-5 (In Russ.).
19. Robertson SW, van Staden PJ, Cherkaev A, et al. Properties governing the flow of solution through crushed ore for heap leaching. *Hydrometallurgy*. 2022;208:1-17.
20. Argimbaev KR. Investigations of the deposit geological structure impact on the technogenic accident risk at the mining plant. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018;13(7):1713-17.
21. Reyes A, Garma P, Parra D. 3D slope stability analysis of heap leach pads using the limit equilibrium method. Peru, 2014:257-71.
22. Wei L, Zhang Y, Zhao Z, et al. Analysis of mining waste dump site stability based on multiple remote sensing technologies. *Remote Sensing*. 2018;10(12):2025-45.
23. Ponomarenko T, Nevskaya M, Marinina O. An assessment of the applicability of sustainability measurement tools to resource-based economies of the commonwealth of independent states. *Sustainability*. 2020;12(14):5582-89.
24. Smith M, Parra D, Asociados A. Leach pad cost benchmarking. Proceedings of Heap Leach Solutions. Peru, 2014.
25. Pashkevich MA, Alekseenko AV, Nureev RR. Environmental damage from the storage of sulfide ore tailings. *Journal of Mining Institute*. 2023;260:155-67 (In Russ.).
26. Petrova TA, Rudzisha E, Alekseenko AV, et al. Rehabilitation of disturbed lands with industrial wastewater sludge. *Minerals*. 2022;12(3):1-19.
27. Gospodarikov AP, Efimov DA. Technical and technological aspects of the use of Reuleaux triangular profile rolls in crushing units in the ore processing plant. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2022;10-2:117-26 (In Russ.).
28. Mostaghimi P, Tollit BS, Neethling SJ, et al. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching. *Journal of Engineering Mathematics*. 2014;87(1):111-21.
29. Miao X, Narsilio GA, Wu A, et al. 3D dual pore-system leaching model. Part 1: Study on fluid flow. *Hydrometallurgy*. 2017;167:173-82.
30. Brinkgreve RBJ. PLAXIS 3D 2017. Material Models Manual. Netherlands, 2018.
31. Protosenya AG, Alekseev AV, Verbilo PE. Prediction of the stress-strain state and stability of the front of tunnel face at the intersection of disturbed zones of the soil mass. *Journal of Mining Institute*. 2022;254:252-60 (In Russ.).
32. Smith IM, Griffith DV. Programming the finite element method. John Wiley & Sons, Chisester, U.K, 2nd edition, 1982.
33. Schanz T, Vermeer PA, Bonnier PG. The hardening soil model: Formulation and verification. Beyond 2000 in Computational Geotechnics, 1999:281-90.
34. Demenkov PA, Trushko OV, Komolov VV. The forecast of earth surface subsidence at the excavator of the pit near the building. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2019;2:300-9 (In Russ.).
35. Schaap MG, Van Genuchten M. Th. A modified mualem-van genuchten formulation for improved description of the hydraulic conductivity near saturation. *Vadose Zone Journal*. 2006;5:27-34.
36. Mostaghimi P, Tollit BS, Neethling SJ, et al. A control volume finite element method for adaptive mesh simulation of flow in heap leaching. *Journal of Engineering Mathematics*. 2014;87:111-21.
37. Thenepalli T, Chilakala R, Habte L, et al. A Brief note on the heap leaching technologies for the recovery of valuable metals. *Sustainability*. 2019;11(12):3347.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Поморцева Анастасия Александровна:
соискатель,
кафедра маркшейдерского дела,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: a.a.pomortseva@mail.ru,
Scopus Author ID 57198448214,
ORCID ID 0000-0003-4247-6499



Поспехов Георгий Борисович:
кандидат геолого-минералогических наук,
ведущий научный сотрудник,
лаборатория физико-механических свойств
и разрушения горных пород НЦГиПП,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург, Россия,
e-mail: pospehov@spmi.ru,
Scopus Author ID 57195332705,
ORCID ID 0000-0001-9090-5150

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Pomortseva Anastasiia Aleksandrovna:
postgraduate student,
Department of Mine Surveying,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
St Petersburg Russia,
e-mail: a.a.pomortseva@mail.ru,
Scopus Author ID 57198448214,
ORCID ID 0000-0003-4247-6499

Posphehov Georgiy Borisovich:
Ph. D.-M. Sc.,
Leading Researcher,
Laboratory of Physical and Mechanical Properties and
Rock Fracture of the Scientific Centre of Geomechanics and
Mining Problems,
St. Petersburg Mining University of Empress Catherine II,
St Petersburg, Russia,
e-mail: pospehov@spmi.ru,
Scopus Author ID 57195332705,
ORCID ID 0000-0001-9090-5150

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION:

Поморцева Анастасия Александровна — написание текста статьи, генерация идеи исследования, выполнение работы по систематизации материала, проведение исследований, получение данных для анализа; Поспехов Георгий Борисович — постановка задачи исследования, разработка методики, анализ результатов исследования, написание текста статьи /

Pomortseva Anastasiia Aleksandrovna — writing the text of the article, generating the idea of the research, systematization of the material, conducting research, obtaining data for analysis; Georgiy Borisovich Posphehov — setting the research problem, developing the methodology, analyzing the research results, writing the text of the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST:

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.



НИТУ «МИСИС»

Информируем Вас



История Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» началась больше ста лет назад, когда в 1918 году была создана Московская горная академия, в которой открылось металлургическое отделение. Университет постоянно расширялся, и уже в 1921 году отделения были преобразованы в факультеты, а к 1930 году академию разделили на шесть самостоятельных институтов.

На сегодняшний день три из них — институт стали, цветных металлов и горный институт снова объединились в одно учебное заведение — Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Программы специализации:

- ◆ Геотехнологии,
- ◆ Горное дело,
- ◆ Физические процессы горного или нефтегазового производства

Контакты: 119991, Москва, Ленинский пр-т, 4 стр.1, НИТУ «МИСИС».
Приемная комиссия (Граждане РФ) +7 499 649-44-80, +7 499 649-40-48, +7 499 236-30-78, +7 495 638-46-78, +7 495 638-45-16



WWW.N-GN.RU