



STATE AND STRENGTH-DEFORMABILITY PROPERTIES OF THE MIRNY MINING AND PROCESSING PLANT (MPP) TECHNOGENIC TAILINGS DAM DEPOSITS AS A FACTOR OF DAM STABILITY

E.P. Dushkin ¹✉, V.V. Akulova ¹, A.A. Rybchenko ¹, A.M. Yannikov ²

¹Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia

²Institute Yakutniproalmaz, ALROSA PJSC, 39 Lenin St, Mirny, 678174, Republic of Sakha (Yakutia) Russia

ABSTRACT. The occurrence and development of exogeodynamic processes caused by liquefaction and fluidity of deposits that comprise the mine tailings dam may provoke emergency situations (breakthroughs). To prevent such situations, objects like these are covered by regular geomonitoring.

The article presents the results of the study of the current state of the technogenic tailings dam deposits of the enrichment factory No.3 of the MPP (Mirny, Yakutia). Severe climatic, structural-geological and permafrost-hydrogeological conditions of the study area, as well as the thawed state of the technogenic strata (+0.5 to +3.1 °C) require to carry out a thorough control over the state of the dam in order to ensure its effective and safe operation.

Studies of the material composition and properties of technogenic deposits were carried out based on the data on five drilled 31–58 m deep boreholes and sampling intervals. The granulometric and mineralogical compositions, as well as physical, physical-chemical and mechanical properties were determined according to standard methods using modern equipment (Analysette 22 NanoTec granulometric analyser, automated test complex ASIS).

It has been found that the technogenic strata are layers of loose rock represented mainly by silty-clayey (sandy loam, loam and clay), less often by sandy material. Most of the clay varieties transform from solids to fluid-plastics. The most common lithological variety is silty loam, comprising ~40 % of the total volume sampled. The mineral composition of sediments is characterized by a high content of dolomite, calcite, quartz, serpentine and clay minerals. All clay deposits types have been found to have low strength ($C=0.003\text{--}0.050$ MPa, $\varphi=3.9\text{--}15.7^\circ$) and high deformability ($E=1.6\text{--}5.6$ MPa). They also exhibit "dangerous" process-forming properties – plasticity, fluidity and flowability, which give rise to the development of exogenous geological processes (erosion, slumps, landslides, etc.), and consequently, influence the stability of the mine tailings dam.

KEYWORDS: strength-deformability properties; laboratory studies; Mirny; mine tailings dam; technogenic deposits

FUNDING: The study was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. 075-15-2024-533, project "Fundamental research of the Baikal natural territory on the basis of a system of interconnected basic methods, models, neural networks and a digital platform of ecological environmental monitoring"). The work was conducted using equipment and infrastructure of the Centre for Geodynamics and Geochronology at the Institute of the Earth's Crust SB RAS.



EDN: XGJONW

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Egor P. Dushkin, dushkin@crust.irk.ru

Received: January 31, 2025

Revised: March 13, 2025

Accepted: March 14, 2025

FOR CITATION: Dushkin E.P., Akulova V.V., Rybchenko A.A., Yannikov A.M., 2025. State and Strength-Deformability Properties of the Mirny Mining and Processing Plant (MPP) Technogenic Tailings Dam Deposits as a Factor of Dam Stability. *Geodynamics & Tectonophysics* 16 (3), 0832. doi:10.5800/GT-2025-16-3-0832

СОСТОЯНИЕ И ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕХНОГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА МИРНИНСКОГО ГОКА КАК ФАКТОР ЕЕ УСТОЙЧИВОСТИ

Е.П. Душкин¹, В.В. Акулова¹, А.А. Рыбченко¹, А.М. Янников²

¹ Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

² Институт «Якутнипроалмаз», АК АЛРОСА (ПАО), 678174, Мирный, ул. Ленина 39, Республика Саха (Якутия), Россия

АННОТАЦИЯ. Формирование и развитие экзогеодинамических процессов, обусловленных разжижением и текучестью отложений, слагающих ограждающую дамбу, могут спровоцировать возникновение аварийных ситуаций (прорыв). Для предотвращения такого исхода, как правило, на подобных объектах организуется регулярный геомониторинг.

В данной статье представлены результаты изучения современного состояния техногенных отложений, слагающих намывной массив ограждающей дамбы хвостохранилища обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа (г. Мирный, Якутия). Ввиду суровых климатических, структурно-геологических и мерзлотно-гидрогеологических условий размещения объекта исследования, а также талого состояния техногенной толщи (температура от +0.5 до +3.1 °С) необходимо осуществлять строгий контроль за состоянием дамбы с целью обеспечения ее эффективного и безопасного функционирования.

Исследования вещественного состава и свойств техногенных отложений проведены по материалам бурения пяти скважин (глубина 31–58 м) с поинтервальным опробованием. Выполнено определение гранулометрического и минералогического состава, а также физических, физико-химических и деформационно-прочностных свойств по стандартным методикам с использованием современного оборудования (анализатор гранулометрического состава Analysette 22 NanoТес, автоматизированный испытательный комплекс АСИС).

Установлено, что техногенная толща сложена рыхлыми образованиями, представленными преимущественно пылевато-глинистым (супеси, суглинки и глины), реже – песчаным материалом. Состояние глинистых разновидностей варьируется в основном от твердого до текучепластичного. Наиболее распространенной литологической разностью являются суглинки пылеватые, занимающие ~40 % от общего объема исследованных образцов. Минеральный состав отложений характеризуется повышенным содержанием доломита, кальцита, кварца, серпентина и глинистых минералов. Выявлена низкая прочность ($C=0.003-0.050$ МПа, $\varphi=3.9-15.7^\circ$) и высокая деформируемость ($E=1.6-5.6$ МПа) у всех типов глинистых отложений. Отмечено проявление ими «опасных» процессформирующих свойств – пластичности, пльвунности и текучести, обуславливающих развитие экзогеодинамических процессов (эрозия, сплывы, оползни и др.) и, следовательно, осложняющих состояние ограждающей дамбы хвостохранилища.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деформационно-прочностные свойства; лабораторные исследования; Мирный; хвостохранилище; техногенные отложения

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено при поддержке Минобрнауки РФ (грант № 075-15-2024-533, проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). Работа выполнена с использованием оборудования и инфраструктуры ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Переработка полезных ископаемых на обогатительных фабриках сопряжена с образованием значительного объема отработанного материала (хвостов), требующего дальнейшего складирования. В связи с этим вблизи горно-обогатительных комбинатов располагаются специальные гидротехнические сооружения (ГТС), как правило представляющие собой систему хвостохранилищ и ограждающих их дамб.

Дамбы являются основным объектом ГТС, обеспечивающим безопасное и эффективное функционирование всего горно-добывающего комплекса. Преиму-

щественно с ними связано большинство аварийных ситуаций, влекущих за собой социальные, экономические и экологические последствия [Gusenkov et al., 2007]. Одним из таких примеров служит техногенная катастрофа на железорудной шахте в г. Брумадинью (Бразилия), произошедшая в 2019 г. Обрушение дамбы привело к гибели более 250 человек, среди которых, помимо рабочего персонала, были и жители близлежащих населенных пунктов, к распространению по территории штата Минас-Жерайс жидких отходов горно-добывающей промышленности (объем более 11×10^6 м³) и к загрязнению р. Параопеба токсичными

компонентами [Rotta et al., 2020]. Согласно базе данных ICOLD (International Commission on Large Dams) по всему миру в период с 1915 по 2020 г. произошло не менее 366 подобных инцидентов (Карамкенский ГОК, РФ, 2009 г., рудник Маунт Полли, Канада, 2014 г., и др.). При этом данная цифра представляет собой лишь часть от общего числа таких происшествий [Islam, Murakami, 2021]. Надежность и безопасность ГТС такого типа для окружающей среды определяются во многом состоянием техногенного массива дамбы [McFadden, Bennet, 1991; Lolaev, Butiugin, 2005], поэтому во избежание возникновения подобных техногенных аварий требуется проведение мониторинга состояния техногенного

грунтового массива дамбы и ее основания, а также необходима разработка своевременных мероприятий по стабилизации данной природно-технической системы.

Хвостохранилище обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа (рис. 1) расположено в Мирнинском районе Республики Саха (Якутия) и является гидротехническим сооружением I класса намывного типа. Оно введено в эксплуатацию осенью 1989 г. и предназначено для складирования отходов обогащения (хвостов) кимберлитовых руд [Aniskin et al., 2016]. По данным АК «АЛРОСА» (ПАО) объем хвостохранилища на 2019 г. составлял 60.82 млн м³, а максимальная высота

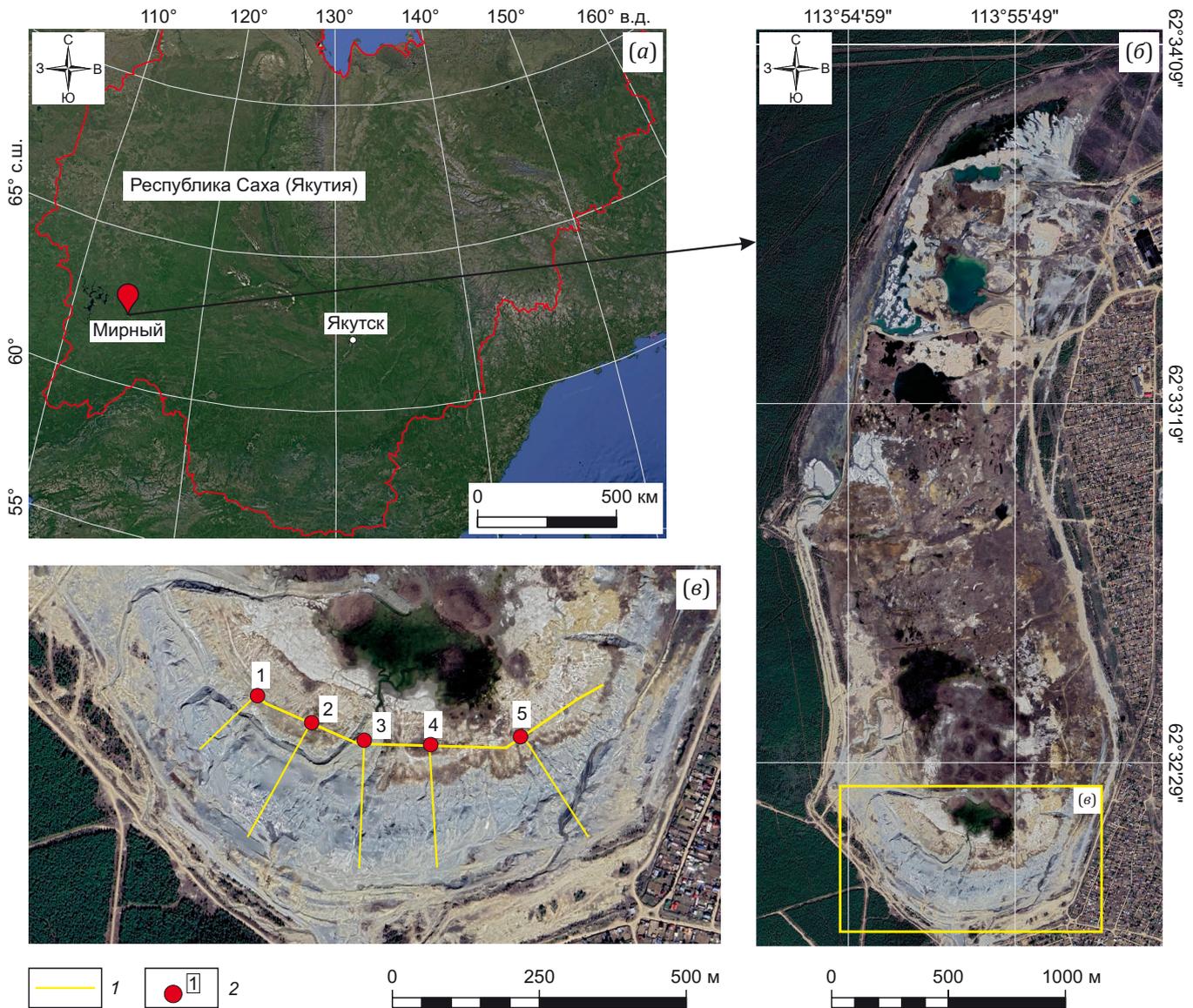


Рис. 1. Объект исследования.
 (а) – обзорная схема расположения хвостохранилища (г. Мирный, Якутия); (б) – хвостохранилище обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа; (в) – дамба хвостохранилища. 1 – профили; 2 – точки расположения скважин (цифрами обозначены номера скважин).
Fig. 1. Study object.
 (а) – schematic overview of the tailing facility (Mirny, Yakutia); (б) – tailing facility of the enrichment factory No. 3 of the Mirny MPP; (в) – mine tailings dam. 1 – profiles; 2 – well location points (figures designate the numbers of wells).

достигала 75 м, при этом планируемый объем на январь 2024 г. должен был составлять 71.4 млн м³.

Территория размещения хвостохранилища характеризуется суровыми климатическими, сложными структурно-геологическими (тектоническая раздробленность преимущественно терригенно-карбонатных пород нижнего палеозоя) и мерзлотно-гидрогеологическими (сплошное распространение многолетнемерзлых пород мощностью до 400 м; наличие межмерзлотных и подмерзлотных водоносных горизонтов) условиями [Drozdov et al., 2008; Gotovtsev, Klimovsky, 2020; Yannikov et al., 2024]. Обеспечение эффективного и безопасного функционирования объектов промышленности в таких районах является первостепенной задачей [Phukan, 1985; Zhang, 2014]. Также по результатам специальных мерзлотных и гидрогеологических исследований, проведенных институтом «Якутнипроалмаз» в 2023 г., было установлено, что весь техногенный массив дамбы хвостохранилища находится в талом состоянии (температура отложений изменяется от +0.5 до +3.1 °С). Кроме того, в процессе бурения скважин были зафиксированы обводненные зоны. Такое достаточно сложное состояние техногенной толщи создает трудности при дальнейшей эксплуатации данного ГТС. В связи с этим была поставлена цель провести комплексные исследования состава, состояния и деформационно-прочностных свойств техногенных отложений, слагающих ограждающую дамбу, и выявить их потенциал к развитию опасных инженерно-геологических процессов.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В марте – апреле 2023 г. специалистами лаборатории горно-геологических проблем разработки месторо-

ждений (ЛГГПРМ) института «Якутнипроалмаз» было выполнено бурение опытных скважин с отбором проб отложений и вскрываемых вод. Всего было пробурено пять скважин глубиной от 31 до 58 м. Отобранные пробы были доставлены в Институт земной коры СО РАН для дальнейших лабораторных исследований.

Определение гранулометрического состава техногенных отложений проводилось ситовым методом с использованием набора стандартных сит, а также лазерно-дифракционным с помощью анализатора гранулометрического состава Analysette 22 NanoTec (Fritsch, Германия). Данный прибор позволяет измерять частицы размером от 0.08 до 2000 мкм (зеленый и инфракрасный лазеры), для разрушения агрегированных частиц предусмотрена функция ультразвука.

Минералогический состав отложений исследовался методом рентгеноструктурного анализа. Пробы, истертые в агатовой ступке со спиртом, были исследованы методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0. Условия съемки: излучение – $\text{CuK}\alpha$, Ni – фильтр, V – 30 кВ, I – 20 мА, шаг сканирования – 0.05°. Для идентификации глинистых минералов осуществлялась подготовка ориентированных проб осаждением глинистой фракции на стеклянной подложке (воздушно-сухая суспензия), насыщенной этиленгликолем и прокаленной до 550 °С в течение трех часов [Brown, 1965]. Рентгенограммы идентифицированы с помощью программы поиска фаз. Полуколичественное соотношение компонентов рассчитано по корундовым числам методом RIR [Hubbard, Snyder, 1988].

Параметры физического состояния техногенных отложений (природная плотность, плотность минеральной части, плотность скелета, влажность, пористость и

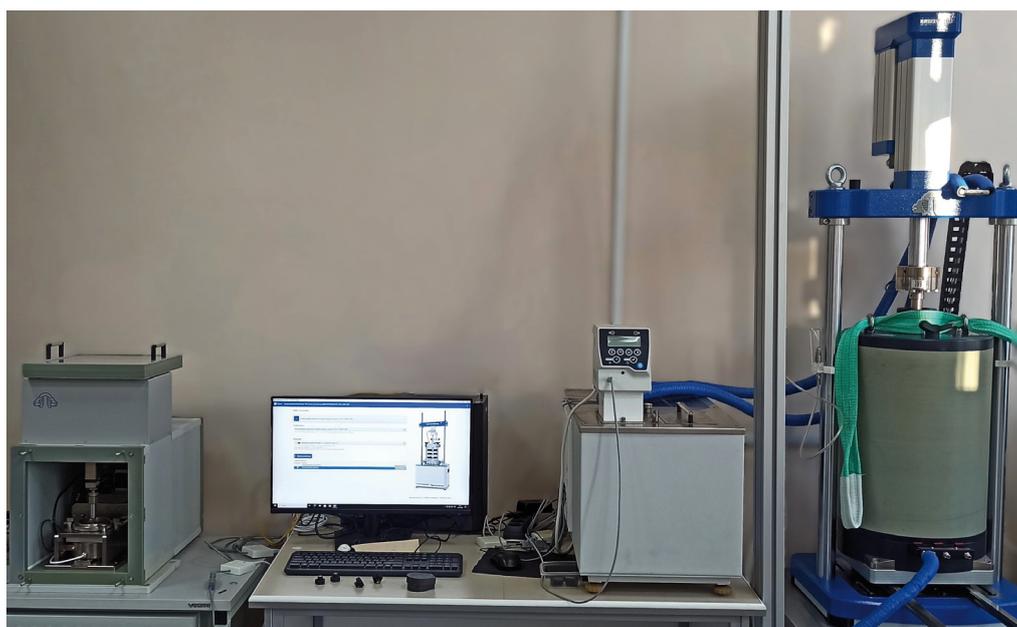


Рис. 2. Внешний вид автоматизированного испытательного комплекса «АСИС».

Fig. 2. An external view of the automated test complex «ASIS».

др.) получены по стандартным методикам (ГОСТ 5180-2015). Определение коэффициента фильтрации (K_f) осуществлялось на фильтрационном приборе КФ-1 для песчаных отложений и на компрессионно-фильтрационном приборе ПКФ-01 для глинистых (ГОСТ 25584-2016).

Среди деформационно-прочностных характеристик для глинистых техногенных образований были определены: удельное сцепление (C), угол внутреннего трения (φ) и модуль деформации (E), для песчаных разновидностей – угол естественного откоса в воздушно-сухом состоянии и под водой (φ_1, φ_2). Значения C, φ и E получены по результатам испытаний, проводимых на автоматизированном комплексе «АСИС» (ООО НПП «Геотек», Россия) (рис. 2), методом трехосного сжатия дисперсных грунтов на ГТ 2.3.23 по ГОСТ 12248.3-2020. Кроме того, определение параметров прочности (C, φ) выполнено на приборе одноплоскостного среза для мерзлых и дисперсных грунтов ГТ 1.2.14 по ГОСТ 12248.1-2020. Измерение углов естественного откоса песков осуществлялось на приборе УВТ-3М.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В соответствии с классификацией В.В. Охотина (с изменениями) [Okhotin, 1933; Ivanov, 1990] гранулометрический состав техногенных отложений дамбы хвостохранилища (80 проб) представлен следующими литологическими разновидностями: глины пылеватые, суглинки пылеватые, суглинки, супеси и пески мелкозернистые (рис. 3).

Наиболее распространенной литологической разновидностью являются суглинки пылеватые, которые составляют ~40 % от общего объема образцов. Они характеризуются средним содержанием глинистой, пылеватой и песчаной фракций 24.1, 63.1 и 12.8 % соответственно. Далее следуют супеси (5.9, 17 и 77.1 %) и суглинки (15.1, 30.2 и 54.6 %). К менее распространенным относятся пески (1.7, 5.4 и 92.8 %). Глины пылеватые (31.4, 63.9 и 4.7 %) представлены преимущественно маломощными линзами и прослоями до 1–2 см (рис. 4).

Анализ распределения содержаний глинистой, пылеватой и песчаной фракций в техногенных отложениях выявил некоторые особенности (рис. 5). В составе пылеватых разновидностей (глины пылеватые и суглинки пылеватые) доминируют пылеватые (до 63.9 %) и глинистые (до 31.4 %) частицы. Супеси и пески на фоне минимальных содержаний пылеватой (5.4–17.0 %) и глинистой (2.0–5.9 %) фракций отличаются аномально высоким количеством песчаных (77.1–91.9 %) частиц. Суглинки, характеризующиеся практически средними содержаниями глинистой (до 15.2 %), пылеватой (до 30.2 %) и песчаной (до 54.6 %) фракций, занимают промежуточное положение между пылеватыми и песчаными разновидностями.

Минералогический состав техногенных отложений включает терригенную составляющую, представленную преимущественно кальцитом, доломитом, кварцем и серпентином, а также тонкодисперсную – хлоритами, смектитами и иллитами, реже – каолинитами

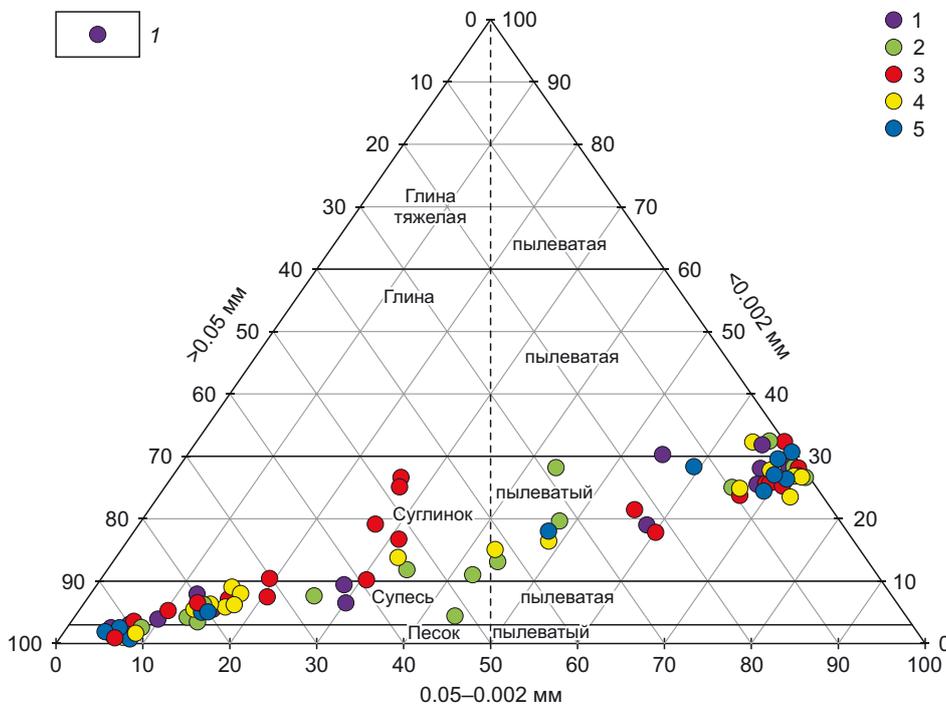


Рис. 3. Треугольная классификационная диаграмма техногенных отложений по гранулометрическому составу (по [Okhotin, 1933; Ivanov, 1990]). 1 – образцы отложений (цифрами обозначен номер скважины).

Fig. 3. Triangular diagram for classification of technogenic deposits by granulometric composition (according to [Okhotin, 1933; Ivanov, 1990]). 1 – deposit samples (figures designate the numbers of wells).

и смешанослойными минералами (табл. 1). Выявлены некоторые особенности. Глины пылеватые и суглинки пылеватые имеют практически идентичный состав, характеризующийся максимальным содержанием глинистых минералов (31–35 %) и повышенным – доломита (17–19 %), кальцита (15–16 %) и серпентина (11–13 %). Суглинки отличаются максимальными содержаниями кальцита (34 %), серпентина (20 %) и повышенным количеством глинистых минералов (до 30 %), а супеси – равномерным распределением основных компонен-

тов: кальцита (22 %), кварца (18 %), доломита (16 %), серпентина (14 %), и глинистых минералов (13 %). Песчаные отложения выделяются максимальным количеством кварца (35 %), полевых шпатов (20 %) и минимальным – кальцита (10 %), серпентина (6 %) и глинистых минералов (5 %).

Необходимо отметить, что состав тонкодисперсной фракции во всех выделенных литологических разновидностях техногенных отложений преимущественно полиминеральный. Он представлен хлоритом (10 %),

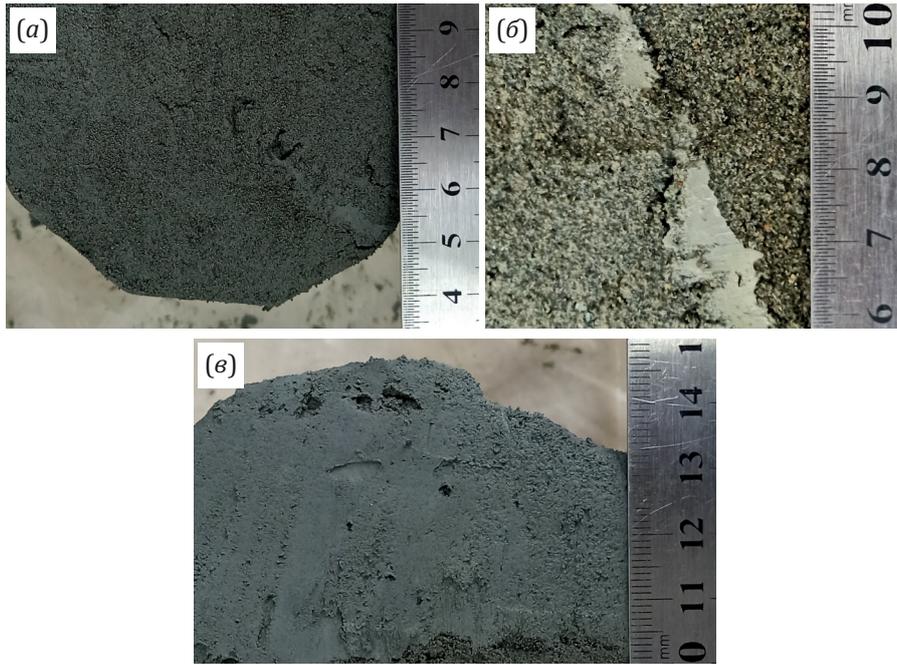


Рис. 4. Внешний вид образцов техногенных отложений дамбы хвостохранилища. (а) – супесь; (б) – песок с маломощным глинистым прослоем (1.0–1.5 см); (е) – суглинок с тонкими супесчаными прослоями (до 1–5 мм).

Fig. 4. Appearance of the samples of mining technogenic tailings dam deposits. (a) – sandy loam; (b) – sand with a thin interlayer of clay (1.0–1.5 cm); (e) – loam interlayered with thin sandy loams (up to 1–5 mm).

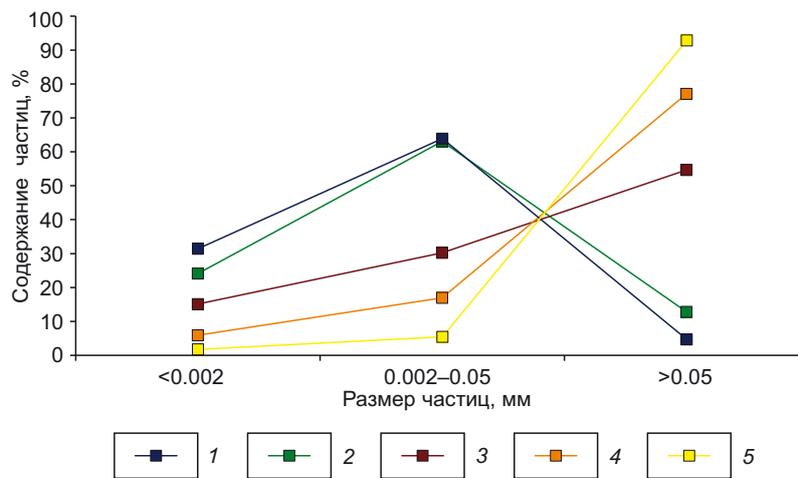


Рис. 5. Распределение усредненного гранулометрического состава техногенных отложений. 1 – глины пылеватые; 2 – суглинки пылеватые; 3 – суглинки; 4 – супеси; 5 – пески.

Fig. 5. Distribution of the average granulometric composition of technogenic deposits. 1 – silty clays; 2 – silty loams; 3 – loams; 4 – sandy loams; 5 – sands.

Таблица 1. Данные усредненного содержания минералов в техногенных отложениях
Table 1. Data on the average mineral content in technogenic deposits

Литологические разновидности	Минералогический состав, %								
	Dol	Cal	Qz	Fsp	Srp	Amp	Gp	Tlc	CM
Суглинки пылеватые	19	16	11	8	11	2	2	-	31
Глины пылеватые	17	15	10	5	13	3	2	-	35
Суглинки	7	34	3	1	18	7	-	-	30
Супеси	16	22	18	4	14	5	-	8	13
Пески	14	10	35	20	6	-	-	10	5

Примечание. Dol – доломит, Cal – кальцит, Qz – кварц, Fsp – полевоый шпат, Srp – серпентин, Amp – амфибол, Gp – гипс, Tlc – тальк, CM – глинистые минералы.

Note. Dol – dolomite, Cal – calcite, Qz – quartz, Fsp – feldspar, Srp – serpentine, Amp – amphibole, Gp – gypsum, Tlc – talc, CM – clay minerals.

сметитом (8 %), иллитами (7 %), реже – каолинитом (7 %), а также смешанослойными минералами. Перечисленные минералы отличаются кристаллической структурой, которая в одном случае более жесткая (каолинит, иллит, хлорит), а в другом – раздвижная (сметит и смешанослойные минералы) [Sokolov, 1996]. Структурные особенности глинистых минералов определяют их свойства (физико-химическую активность, гидрофильность, адсорбционную способность) [Osipov et al., 2017].

Исследуемые техногенные отложения обладают сложным смешанным минеральным составом, который в достаточной мере соответствует исходному материалу (терригенно-карбонатные и кимберлитовые породы) из трубки «Мир» [Posukhova et al., 2013]. Кроме того, сходство состава выделенных литологических разновидностей подтверждает, что дамба хвостохранилища сформирована из одних и тех же отложений.

По результатам лабораторных исследований физико-механических параметров техногенных отложений установлены некоторые особенности.

Суглинки пылеватые с природной влажностью от 11.6 до 39.4 % представляют собой отложения, состояние которых варьируется в широком пределе – от твердого до текучего (рис. 6, а). Плотность скелета варьируется от очень низкой до высокой ($\rho_d=1.3-1.8 \text{ г/см}^3$), также отмечается значительный разброс значений коэффициента пористости ($e=0.51-1.19$). Среди данных образований в основном преобладают недоуплотненные и водонасыщенные разновидности. Они характеризуются низкой плотностью скелета, высокой пористостью и, соответственно, повышенной влажностью. В целом, пылеватые отложения являются водонепроницаемыми ($K_\phi=0.001 \text{ м/сут}$).

Параметры прочности и деформируемости (C, φ, E) суглинков пылеватых в зависимости от консистенции изменяются следующим образом: для тугопластичной ($W=22.1 \%$, $\rho_d=1.6 \text{ г/см}^3$, $e=0.7$) – $C=0.05 \text{ МПа}$, $\varphi=10.4^\circ$, $E=2.8 \text{ МПа}$; мягкопластичной ($W=27.3 \%$, $\rho_d=1.4 \text{ г/см}^3$, $e=0.6$) – $C=0.03 \text{ МПа}$, $\varphi=9.8^\circ$, $E=2.5 \text{ МПа}$ и текучей ($W=39.4 \%$, $\rho_d=1.3 \text{ г/см}^3$, $e=0.9$) – $C=0.003 \text{ МПа}$, $\varphi=3.9^\circ$, $E=1.6 \text{ МПа}$ (рис. 7). Согласно классификациям,

представленным в ГОСТ 25100-2020, данные отложения относятся к «очень сильно деформируемым; средней, низкой и чрезвычайно низкой прочности».

Известно, что у природных глинистых отложений в процессе длительных сдвиговых испытаний часто наблюдается релаксация касательных напряжений (после достижения максимального напряжения происходит его уменьшение на фоне продолжающейся деформации сдвига), т.е. проявляются реологические свойства (падение прочности) [Lomtadze, 1990; Osipov, 1979]. А при существенном увлажнении ($I_L>0.5$) данных образований иногда отмечается полная потеря прочности. По мнению В.И. Осипова с коллегами [Osipov et al., 2017], в этом случае свойства глинистых отложений определяются в основном влиянием адсорбционного слоя гидратных пленок минеральных частиц, дополнительное воздействие нагрузки приводит к развитию процесса текучести. Подобная ситуация отмечается и у исследуемых авторами техногенных образований: сильно переувлажненные ($W>30 \%$) пылеватые суглинки имеют практически «нулевую» прочность.

Суглинки с природной влажностью от 9.6 до 26.8 % представлены твердыми, полутвердыми и мягкопластичными разновидностями (см. рис. 6, б). По сравнению с пылеватыми суглинками данные отложения в среднем обладают более плотным сложением, установлены средненизкие показатели плотности скелета ($\rho_d=1.8-1.5 \text{ г/см}^3$), а также меньшие значения пористости ($e=0.47-0.95$). Обладают низкой водопроницаемостью ($K_\phi=0.01 \text{ м/сут}$).

Суглинки мягкопластичные ($W=24.8 \%$, $\rho_d=1.7 \text{ г/см}^3$, $e=0.6$) имеют следующие параметры прочности и деформируемости: $C=0.011 \text{ МПа}$, $\varphi=13.5^\circ$, $E=2.1 \text{ МПа}$, что позволяет отнести их к «очень сильно деформируемым разновидностям очень низкой прочности» (ГОСТ 25100-2020). Твердые разновидности суглинков ($W=15.8 \%$, $\rho_d=1.8 \text{ г/см}^3$, $e=0.4$) имеют более высокий модуль общей деформации ($E=3.7 \text{ МПа}$), но при этом остаются очень сильно деформируемыми.

Супеси находятся в твердом и преимущественно пластичном состоянии (см. рис. 6, в). Природная влажность варьируется от 14.2 до 25.5 %. Они характеризуются

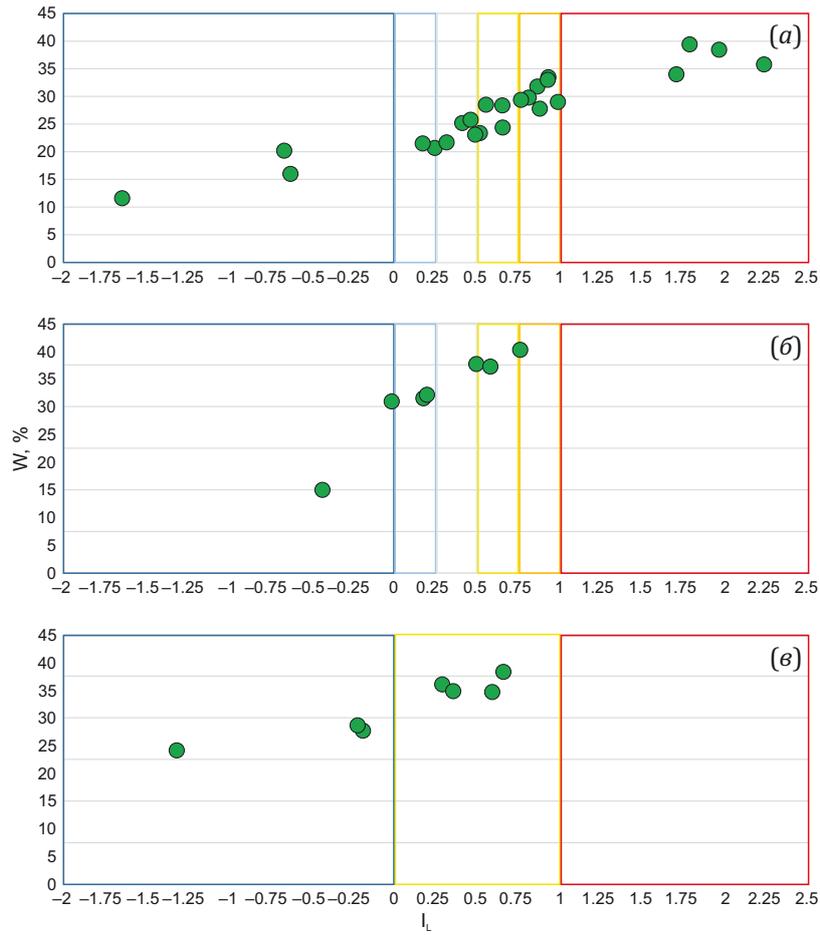


Рис. 6. Консистенция (I_L) наиболее распространенных техногенных глинистых отложений в зависимости от влажности ($W, \%$). (а) – суглинки пылеватые; (б) – суглинки; (в) – супеси (I_L суглинков: твердая <0, полутвердая 0.00–0.25, тугопластичная 0.25–0.50, мягкопластичная 0.50–0.75, текучепластичная 0.75–1.00, текучая >1; I_L для супесей: твердая <0, пластичная 0–1, текучая >1).

Fig. 6. Consistency (I_L) of the most common technogenic clayey deposits depending on moisture content ($W, \%$). (а) – silty loams; (б) – loams; (в) – sandy loams (I_L for loams: solid <0, semisolid 0.00–0.25, stiff-plastic 0.25–0.50, soft-plastic 0.50–0.75, plastic or flowable 0.75–1.00, flowable >1; I_L for sandy loams: solid <0, plastic 0–1, flowable >1).

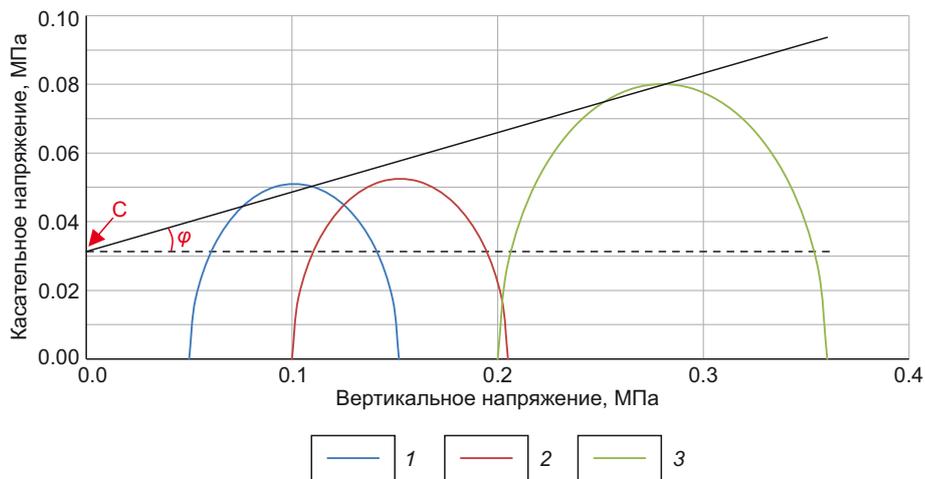


Рис. 7. Результаты определения параметров прочности (C, φ) на приборе для испытаний методом трехосного сжатия по кругам Мора-Кулона в полных напряжениях для мягкопластичных пылеватых суглинков. 1 – испытание 1 (50 КПа), 2 – испытание 2 (100 КПа), 3 – испытание 3 (200 КПа).

Fig. 7. Results of estimating Mohr-Coulomb strength parameters (C, φ) in full stresses for soft-plastic silty loams using triaxial compression test device. 1 – test 1 (50 KPa), 2 – test 2 (100 KPa), 3 – test 3 (200 KPa).

средневысокой плотностью ($\rho_d=1.7-1.9 \text{ г/см}^3$; $e=0.38-0.59$) и, в отличие от ранее представленных глинистых разновидностей, являются водопроницаемыми (K_ϕ от 0.39 до 1.28 м/сут).

Супеси пластичные ($W=23.2 \%$, $\rho_d=1.7 \text{ г/см}^3$, $e=0.5$) имеют достаточно низкие параметры прочности и деформируемости ($C=0.01 \text{ МПа}$, $\varphi=15.7^\circ$, $E=3.2 \text{ МПа}$). Они также относятся к «очень сильно деформируемым отложениям очень низкой прочности». Твердые разновидности ($W=16 \%$, $\rho_d=1.8 \text{ г/см}^3$, $e=0.4$) характеризуются более высокими значениями модуля общей деформации ($E=5.6 \text{ МПа}$) и относятся к сильно деформируемым.

Пески с природной влажностью 13.3–31.2 % являются водопроницаемыми и сильноводопроницаемыми ($K_\phi=0.59-3.31 \text{ м/сут}$). Аномальные значения влажности песков ($W=25.0-31.2 \%$) приурочены к обводненным зонам. С целью исследования устойчивости песков определялись углы естественного откоса в воздушно-сухом состоянии и под водой. Средние значения углов (φ_1, φ_2) естественного откоса песков в воздушно-сухом состоянии и под водой составляют 33–38° и 25–29° соответственно. Существенная разница ($\Delta\varphi$) между ними (от 6 до 12°) может указывать на склонность песчаных отложений к плавунности.

Выявленный широкий спектр состояний исследуемых техногенных отложений обуславливает формирование опасных локальных недоуплотненных и перувлажненных зон в теле дамбы. Наличие таких участков создает сложное и неоднородное напряженно-деформированное состояние техногенного массива, что может сопровождаться развитием экзогеодинамических процессов (эрозия, сплывы, оползни и др.) на поверхности дамбы.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам комплексного исследования состава, состояния и деформационно-прочностных свойств техногенных отложений, слагающих дамбу хвостохранилища обогатительной фабрики № 3 Мирнинского ГОКа, можно сделать следующее заключение.

Тело дамбы сложено достаточно сходными по минеральному, но неоднородными по гранулометрическому составу отложениями, представляющими собой отходы (хвосты) горно-обогатительного производства. По литологическому составу они являются глинами пылеватыми, суглинками пылеватыми, суглинками, супесями и мелкозернистыми песками. При этом наиболее распространены суглинки пылеватые (~40 % от общего объема).

Выявлен широкий спектр физических состояний глинистых отложений по степени плотности скелета (от высокой до очень низкой) и показателю консистенции (от твердой до текучей). Большая их часть имеет низкосредние значения плотности скелета ($1.3-1.7 \text{ г/см}^3$) и находится в пластичном состоянии.

Исследуемые отложения обладают достаточно низкой прочностью и повышенной деформируемостью. Подтверждено, что значения прочностных и деформа-

ционных параметров в наибольшей степени определяются гранулометрическим составом техногенных образований и их физическим состоянием.

Учитывая то, что техногенные образования характеризуются проявлением таких «опасных» процессформирующих свойств, как пластичность, плавунность и текучесть, на объекте организован регулярный геомониторинг, направленный на предупреждение и предотвращение негативных ситуаций.

5. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

6. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Aniskin N.A., Malakhanov V.V., Antonov A.S., 2016. Analysing the Operation of the Drainage System of the Dam of the Tailings Dump of Mirny Mining and Processing Plant. Vestnik MGSU 12, 91–102 (in Russian) [Анискин Н.А., Малаханов В.В., Антонов А.С., Анализ работы дренажной системы дамбы хвостохранилища Мирнинского ГОК // Вестник МГСУ. 2016. № 12. С. 91–102]. DOI:10.22227/1997-0935.2016.12.91-102.

Brown G. (Ed.), 1965. The X-Ray Identification and Crystal Structures of Clay Minerals. Mir, Moscow, 599 p. (in Russian) [Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов / Ред. Г. Браун. М.: Мир, 1965. 599 с.].

Drozov A.V., Iost N.A., Lobanov V.V., 2008. Cryohydrogeology of Diamond Deposits in Western Yakutia. ISTU Publishing House, Irkutsk, 507 p. (in Russian) [Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. 507 с.].

Gotovtsev S.P., Klimovsky I.V., 2020. On the Geocryological Studies on the Southern Part of Western Yakutia. Arctic and Subarctic Natural Resources 25 (2), 81–86 (in Russian) [Готовцев С.П., Климовский И.В. О геокриологической изученности южной части Западной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2020. Т. 25. № 2. С. 81–86]. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-2-6>.

Gusenkov S.N., Stefanishin D.V., Finagenov O.M., Shulman S.G., 2007. Reliability of Tailing Facilities of Enrichment Plants. Vezelitsa, Belgorod, 674 p. (in Russian) [Гузенков С.Н., Стефанишин Д.В., Финагенов О.М., Шульман С.Г. Надежность хвостовых хозяйств обогатительных фабрик. Белгород: Везелица, 2007. 674 с.].

Hubbard C.R., Snyder R.L., 1988. RIR – Measurement and Use in Quantitative XRD. *Powder Diffraction* 3 (2), 74–77. <https://doi.org/10.1017/S0885715600013257>.

Islam K., Murakami S., 2021. Global-Scale Impact Analysis of Mine Tailings Dam Failures: 1915–2020. *Global Environmental Change* 70, 102361. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102361>.

Ivanov I.P., 1990. *Engineering Geology of Mineral Deposits*. Nedra, Moscow, 302 p. (in Russian) [Иванов И.П. Инженерная геология месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 302 с.].

Lolaev A.B., Butugin V.V., 2005. *Geological and Ecological Problems of Industrial Hydraulic Engineering in Cryolite Zone*. Nedra, Moscow, 240 p. (in Russian) [Лолаев А.Б., Бутюгин В.В. Геоэкологические проблемы промышленной гидротехники в криолитозоне. М.: Недра, 2005. 240 с.].

Lomtadze V.D., 1990. *Physical and Mechanical Properties of Rocks. Methods of Laboratory Research*. Nedra, Leningrad, 328 p. (in Russian) [Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. Л.: Недра, 1990. 328 с.].

McFadden T.T., Bennet F.L., 1991. *Construction in Cold Regions: A Guide for Planners, Engineers, Contractors, and Managers*. John Wiley & Sons, New York, 615 p.

Okhotin V.V., 1933. *Granulometric Classification of Soils on the Basis of Their Physical and Mechanical Properties*. OGIZ-Lengostransizdat, Leningrad, 70 p. (in Russian) [Охотин В.В. Гранулометрическая классификация грунтов на основе их физических и механических свойств. Л.: ОГИЗ-Ленгострансиздат, 1933. 70 с.].

Osipov V.I., 1979. *Nature of Strength and Deformation Properties of Clay Rocks*. MSU Publishing House, Moscow, 232 p. (in Russian) [Осипов В.И. Природа прочности и деформационных свойств глинистых пород. М.: Изд-во МГУ, 1979. 232 с.].

Osipov V.I., Karpenko F.S., Kalbergenov R.G., Kutergin V.N., Romyantseva N.A., 2017. Rheological Properties of the Clay Soils. *Geocology. Engineering Geology, Hydrogeology, Geocryology* 6, 41–51 (in Russian) [Осипов В.И., Карпенко Ф.С.,

Кальбергенов Р.Г., Кутергин В.Н., Румянцева Н.А. Реологические свойства глинистых грунтов // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*. 2017. Т. 6. С. 41–51].

Phukan A., 1985. *Frozen Ground Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 336 p.

Posukhova T.V., Dorofeev S.A., Garanin K.V., Gao Siaoin, 2013. *Diamond Industry Wastes: Mineral Composition and Recycling*. *Moscow University Geology Bulletin* 68, 96–107. <https://doi.org/10.3103/S0145875213020087>.

Rotta L.H.S., Alcântara E., Park E., Negri R.G., Lin Y.N., Bernardo N., Mendes T.S.G., Filho C.R.S., 2020. The 2019 Brumadinho Tailings Dam Collapse: Possible Cause and Impacts of the Worst Human and Environmental Disaster in Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 90, 102119. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102119>.

Sokolov V.N., 1996. *Microcosm of Clays*. *Soros Educational Journal* 3, 56–64 (in Russian) [Соколов В.Н. Микромир глинистых пород // *Соросовский образовательный журнал*. 1996. № 3. С. 56–64].

Yannikov A.M., Korepanov A.Yu., Struchkova A.S., 2024. Features of the Formation of Natural-Technical Systems Within the Injection Areas of the Daldyn Kimberlite Field (Western Yakutia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 335 (9), 61–72 (in Russian) [Янников А.М., Корепанов А.Ю., Стручкова А.С., Особенности формирования природно-техногенных систем в пределах участков закачки Далдынского кимберлитового поля (Западная Якутия) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2024. Т. 335. № 9. С. 61–72]. <https://doi.org/10.18799/24131830/2024/9/4455>.

Zhang R.V., 2014. *Geocryology Principles of Earth Dams for Low and Medium Pressures in Permafrost in a Changing Climate*. *Fundamental Researches* 9 (2), 288–296 (in Russian) [Чжан Р.В. Геокриологические принципы работы грунтовых плотин в криолитозоне в условиях меняющегося климата // *Фундаментальные исследования*. 2014. Т. 9. № 2. С. 288–296].