

Научная статья
УДК 502/504:551:311.2
DOI 10.46698/VNC.2026.58.71.001

Результаты геоэкологического мониторинга селевых рисков водоотводной инфраструктуры Тырныаузского хвостохранилища

Андзор Хамидбиевич Шерхов

Высокогорный геофизический институт, заведующий лабораторией геоэкологического мониторинга, кандидат физико-математических наук, Кабардино-Балкарская Республика, г. Нальчик, fff.ddd.11@mail.ru

Аннотация. В работе проведена геоэкологическая оценка актуального состояния комплекса гидротехнических сооружений (ГТС) хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината (ТГОК) в условиях нарастающей селевой нагрузки. Исходные морфометрические параметры объектов мониторинга получены по материалам разновременной аэрофотосъемки 2021–2025 гг. с применением БПЛА и последующей фотограмметрической обработкой данных. Получены расчетные оценки устойчивости оползневого массива в русле открытого аварийного канала; рассчитана его пропускная способность в водном, наносоводном и грязекаменном режимах. Выявлено прогрессирующее залесение наносов перед входным порталом водоотводного тоннеля.

Ключевые слова: геоэкологический мониторинг, хвостохранилище, пропускная способность, селевой поток, ортофотоплан

Для цитирования: Шерхов А.Х. Результаты геоэкологического мониторинга селевых рисков водоотводной инфраструктуры Тырныаузского хвостохранилища // Вестник Владикавказского научного центра РАН. 2026. Т. 26. № 3. С. 83–88.

DOI 10.46698/VNC.2026.58.71.001

Results of geoecological monitoring of mudflow risks to the drainage infrastructure of the Tyrnyauz tailings storage facility

Andzor Kh. Sherhov

Geophysical Institute, Head of the Laboratory of the High-Mountain, PhD, Russia Nalchik, fff.ddd.11@mail.ru

Abstract. The purpose of the work is to assess the current state of the complex of hydraulic structures (HSS) of the tailings storage facility of the Tyrnyauz Mining and Processing Plant (TMPP) in the conditions of increasing mudflow load. The initial morphometric parameters of the monitoring objects were obtained from multi-temporal aerial imagery acquired in 2021–2025 using unmanned aerial vehicles (UAVs), followed by photogrammetric processing. Stability estimates were calculated for the landslide mass in the channel of the open emergency channel, as was its discharge capacity under water, sediment-water, and debris-flow conditions. Progressive vegetation growth on the sediment deposits in front of the entrance portal of the drainage tunnel has been revealed.

Keywords: geoecological monitoring, tailings storage facility, discharge capacity, mudflow, orthophotomap.

For citation: Sherhov A.Kh. Results of geoecological monitoring of mudflow risks to the drainage infrastructure of the Tyrnyauz tailings storage facility // Bulletin of the Vladikavkaz Scientific Center of RAS. 2026. Vol. 26. No. 3. P. 83–88. DOI 10.46698/VNC.2026.58.71.001

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата, сопровождаемые нарушением температурно-влажностного баланса в горных ландшафтах, провоцируют увеличение частоты экстремальных метеоусловий и создают предпосылки активации опасных склоновых и русловых процессов [1]. Геоэкологический мониторинг промышленных объектов в горной местности, в том числе хвостохранилищ, входит в систему превентивных мер по предупреждению последствий подобных процессов [2–4]. Прогнозные климатические оценки [5, 4] фиксируют в рассматриваемом

районе в XXI веке повышение температур и увеличение максимальных суточных осадков (зимний рост – более 25 %), наблюдается тенденция роста осадков с интенсивностью свыше 20 мм/сутки, что рассматривается как селеобразующая для Центрального Кавказа [6]. Вследствие перечисленных трансформаций с начала 2000-х гг. р. Гижигит пропускает паводки в селевом режиме (2002, 2014 гг.). Водоотводная инфраструктура хвостохранилища Тырныаузского горно-обогатительного комбината (ТГОК) находится в запущенном состоянии и не рассчитана на пропуск селевых потоков. При развитии неблагоприятного сценария возможно переполне-

Таблица 1

Расчётные характеристики грунта

Характеристика	Обозначение	Значение
Удельный вес грунта	γ	19 кН/м ³
Угол внутреннего трения (природное сложение)	ϕ	22°
Угол внутреннего трения (переувлажнение)	ϕ_w	16°
Сцепление (природное)	c	12 кПа
Сцепление (переувлажнение)	c_w	5 кПа
Расчётная мощность оползневого тела	h	4 м

ние отстойника с переливом через отсечную дамбу и выходом потока на пляж хвостохранилища [7, 8]. В этом случае возможен размыв основной дамбы из-за переувлажнения складированной массы токсичных отходов (118 млн т).

Главной задачей исследования является геоэкологическая оценка рисков при селепроявлениях в русле р. Гижигит применительно к территории хвостохранилища ТГОК. Задачей исследования выступает определение реальных физических параметров отдельных участков комплекса гидротехнических сооружений ГТС с аналитической оценкой их соответствия изначально заложенным характеристикам. В частности, рассматривается аварийный открытый водоотводный канал, призванный обеспечить безопасное прохождение паводка в случае блокировки входного отверстия водоотводного тоннеля. Опасения специалистов вызывает его участок длиной 75 м, частично заваленный оползнем, спровоцированным подрезкой коренного склона.

Рассматриваемое хвостохранилище – крупнейшее на Северном Кавказе хранилище отходов добычи молибденовой и вольфрамовой руды, образованное мелкозернистой грунтовой массой (пульпой), содержащей более 30 химических элементов и их соединений, включая высокотоксичные [9, 10]. На момент остановки работ в 1997 г. объём накопленных отходов составил 118 млн м³. Удержание массы обеспечивается каскадом насыпных дамб в устье р. Гижигит; перепад высот достигает 168 м. Водоотвод р. Гижигит в р. Баксан организован через бетонный тоннель расчётной пропускной способностью 65 м³/с и длиной 3 600 м.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Контроль геоэкологического состояния объекта ведётся специалистами ФГБУ «ВГИ» и ГУ МЧС России по КБР с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) «Геоскан» и «DJI Mavic Air 2». Съёмка выполнялась штатной камерой беспилотника в соответствии с требованиями ГОСТ Р 70174-2022 и ГОСТ Р 70611-2022 [16, 17]. Полёты проводились в ясную погоду на высотах 150–280 м, с продольным и поперечным перекрытием 75 % × 75 %. Фотограмметрическая обработка выполнена в Agisoft Metashape Professional; по итогам обра-

ботки двух разновременных проектов (2021 и 2025 гг.) сформировано облако из 167,7 млн опорных точек. На их основе построены геопривязанные ортофотопланы и цифровые модели местности (ЦММ), сопоставительный анализ которых обеспечивает достоверную оценку пространственно-временной динамики рельефа исследуемой территории.

С целью расчёта устойчивости оползневого склона выбраны методики трёх независимых источников: СП 116.13330.2012 [11]; учебно-методическое пособие «Динамическая геоморфология: Оползневые процессы и их региональные особенности» [12]; ГОСТ Р 54257-2010 [13]. Исходными параметрами приняты: угол откоса – 18° (по ЦММ); площадь оползневого тела – 30 000 м² (по ортофотоплану); грунт – рыхлый обломочный материал (геол. карта М 1: 200 000 [14]); условия – подрезка коренного склона (факт активизации зафиксирован). Типовые расчётные характеристики грунта приняты по табличным нормативным значениям (табл. 1).

Вычисления проводились для трёх типов гидрологической ситуации: А – природная; Б – переувлажнение; В – переувлажнение с подпором грунтовых вод.

Для определения пропускной способности аварийного канала, расчёты выполнялись с применением методик трёх нормативных документов: 1 – СП 100.13330.2016 [15] для водного потока; 2 – СП 58.13330.2019 [16] для наносоводного потока; 3 – СП 116.13330.2012 [11] для грязекаменного потока. Коэффициент шероховатости определён с раздельным нормированием для скально-грунтового вертикального борта и крупнообломочного рыхлого оползневого откоса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Аналитическое сопоставление материалов БПЛА-съёмки 2021–2025 гг. выявило значительное увеличение объёма древесно-кустарниковой растительности на селевых отложениях 2002, 2014 гг. в русле р. Гижигит перед входным порталом водоотводного тоннеля. Площадь залесения наносов возросла с 4 856 м² (22 % от общей площади отложений 22 тыс. м²) в 2021 г. до 9 650 м² (43,8 %) в 2025 г. – прирост составил +21,8 % за четыре года. Основу растительности составляет ольха серая с поверхностной корневой системой (10–20 см) [17]. При повторении селепроявлений, сопоставимых с

Таблица 2

Расчётные значения коэффициента устойчивости оползневого участка
в русле открытого аварийного водопропускного канала

Сценарий	СП 116	Дин. Геоморфология	ГОСТ Р 54257	Статус
А – природный	7,85	1,75	1,46	Устойчив
Б – переувлажнение	3,63	1,10	0,91	Условно уст. / риск
В – переувлажнение + подпор	3,28	0,74	0,62	Неустойчив
Порог (I класс)	$\geq 1,25$	$\geq 1,10$	$\geq 1,25$	–

событиями 2002 и 2014 гг., весь объём этой растительности (средняя толщина стволов – 15–20 см) будет одномоментно сорван и увлечён грязе-каменным потоком, что в сочетании с отсутствием сороудерживающей сетки и накоплением крупно-обломочного материала у правой стенки оголовка создаёт реальную угрозу блокировки тоннеля и полной потери им пропускной способности.

Сравнительный анализ материалов разновременной аэрофотосъёмки, ортофотопланов и ЦММ оползневого участка, в русле аварийного водотводного открытого канала, не выявил подвижек оползневого тела. Тем не менее вопрос стабильности склона на этом участке остаётся открытым.

Пороговые значения коэффициента устойчивости для сооружений I класса ответственности, к которым относится хвостохранилище ТГОК, приведены в нижней строке таблицы.

Полученные результаты показывают, что в межпаводковый период все три метода демонстрируют

устойчивость оползневого участка, достаточную для данного класса ответственности – что подтверждается данными БПЛА-мониторинга об отсутствии подвижек тела в 2021–2025 гг. Однако с ухудшением гидрологической обстановки картина качественно меняется. Если рассчитанный по СП коэффициент устойчивости сохраняет приемлемые значения при всех сценариях, методы 2 и 3 выводят оползень на границу устойчивости или за её пределы. Расхождение объясняется более консервативным учётом сцепления в СП: при водонасыщении именно снижение сцепления является определяющим фактором, и для переувлажнённых рыхлых обломочных грунтов Центрального Кавказа расчёт методами 2 и 3 представляется физически наиболее достоверным.

Затем выполнена расчётная оценка пропускной способности открытого аварийного водопропускного канала на заваленном участке. Проектная пропускная способность канала – 245 м³/с при 0,1 %

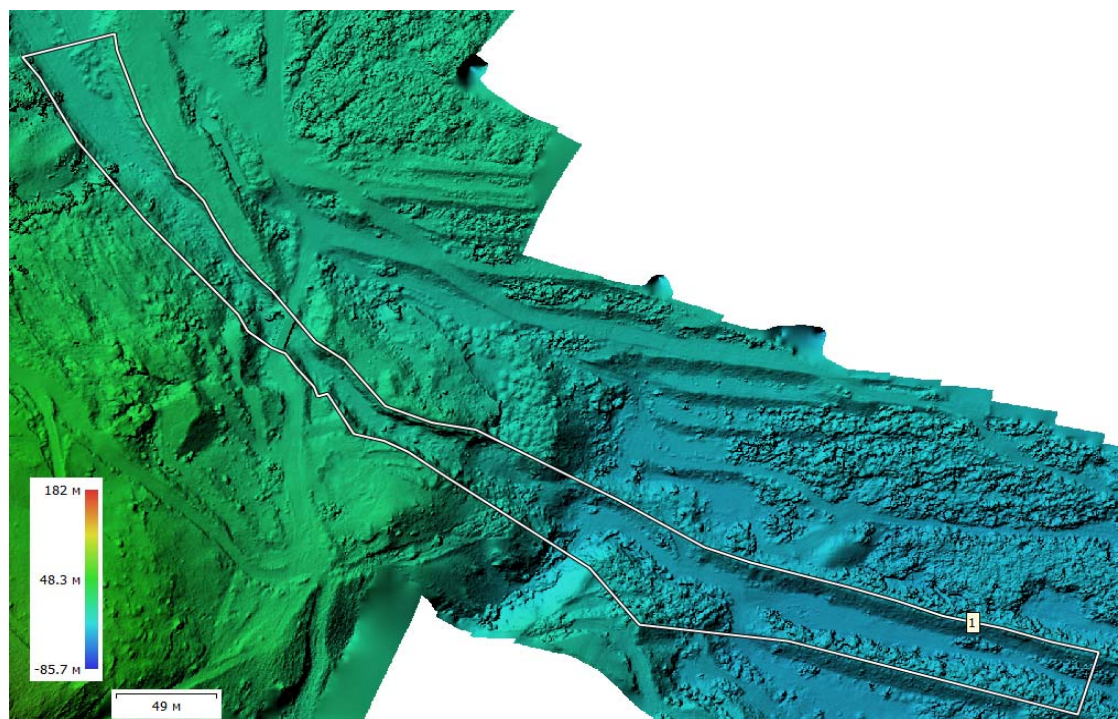


Рис. 1. Границы построенного полигона на цифровой модели рельефа, по которым определены изменения объемов накоплений в канале

обеспеченности. По данным анализа аэрофото-съемки протяженность заваленного сектора составляет 75 м; средняя площадь остаточного сечения – 49,5 м². Сечение приобрело форму прямоугольного треугольника с вертикальным левым бортом высотой 5,5 м и откосом языка оползня, выполняющим роль наклонного дна (длина 20 м); средний уклон русла – 1,2°.

Значение пропускной способности для водного потока рассчитывалось по формуле Маннинга [15], моделируя базовую ситуацию движения потока в открытом грунтовом русле без учета плотности смеси, и составила $Q_v = 100 \text{ м}^3/\text{с}$. Дефицит к запроектированному значению – 59 %. При этом расчетная скорость потока 2,0 м/с в 2,5–3 раза выше допустимой для грунтового русла, что неминуемо повлечет активный размыв оползневой массива с его дальнейшим оползанием в русло канала.

При расчете наносоводного потока (формула Шеши-Павловского [16]) вводилась поправка на взвешенные наносы при объемной концентрации, характерной для подобного режима паводков в бассейне р. Гижигит. Значение пропускной способности составило $Q_n = 90 \text{ м}^3/\text{с}$, дефицит – 63 %.

В случае с грязекаменным потоком пропускная способность рассчитывалась по Флейшману [11, 9]. Объемная концентрация твердой фазы принималась для режима грязекаменного сноса, типичного в бассейне р. Гижигит по данным наблюдений за со-

бытиями 2002 и 2014 гг. Вводился дополнительный коэффициент, учитывающий замедление потока вследствие вероятного смещения оползневой массива при прохождении селя. Пропускная способность на оползневом участке составила $Q_s = 54 \text{ м}^3/\text{с}$, дефицит – 78 %.

Анализ результатов расчетов демонстрирует неспособность канала пропустить паводок ни в одном из рассматривавшихся режимов, с дефицитом 59–78 %.

Ниже оползневой участка, заполнение русла канала грунтом и скальными обломками снижает пропускную способность, происходит накопление селеобразующего материала. Цифровое моделирование изменения объемов накоплений в пределах аварийного водосброса обеспечивает количественную оценку динамики засорения русла (рис. 1).

Объем внутреннего пространства русла открытого аварийного канала, рассчитанный по ЦММ в границах полигона, в 2021 г. составил 92 622 м³, в 2025 г. – 93 293 м³. Накопление потенциального селевого материала в виде осыпавшихся грунтово-осколочных масс не зафиксировано. Расхождение данных (менее 1 %) связывается с вариативностью программной интерпретации растительности как рельефа и укладывается в пределы погрешности измерений.

Между выходом на дорогу, идущую с дамбы по пляжу хвостохранилища, и подножием

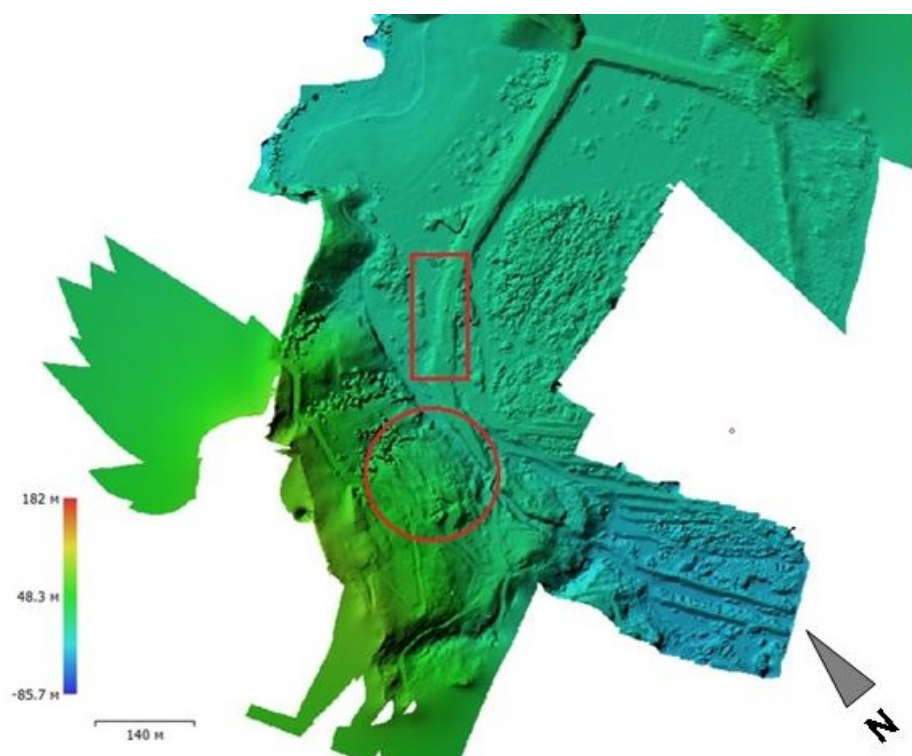


Рис. 2. Цифровая модель местности участка примыкания водоема-отстойника к пляжу хвостохранилища с обозначением наиболее уязвимых элементов ГТС.

Прямоугольником обозначена область недостаточно надежного сопряжения отсечной дамбы с входным оголовком открытого аварийного канала; окружностью – оползневой массив, сползающий в русло водопропуска

плотины цифровая модель местности зоны сопряжения отсечной дамбы и русла аварийного водосброса отражает минимальный (около 1 м) перепад высот. Наличие указанного перепада в сочетании с направленностью рельефа увеличивает вероятность выхода потока за пределы входного створа канала в сторону каскада дамб основной плотины.

Представленное исследование выполнено в рамках разработки научно-исследовательской темы 6.3.2 Росгидромета «Разработка и совершенствование методов мониторинга селей и горных ледников в предгорной и высокогорной зонах».

ВЫВОДЫ

Оценка результатов геоэкологического мониторинга территории Тырныаузского хвостохранилища с использованием БПЛА-технологий выявляет необходимость регулярного контроля состояния гидротехнических сооружений комплекса.

Сопоставительный анализ данных разновременной (2021–2025 гг.) аэрофотосъёмки фиксирует отсутствие подвижек оползневого тела в русле открытого аварийного водоотводного канала. Однако расчёты показывают, что при паводковом переувлажнении, а тем более в сочетании с подпором грунтовых вод, оползень оказывается на границе устойчивости или за её пределами, что грозит перекрытием русла и полной потерей пропускной способности канала. Поскольку аварийный водоотвод служит единственным резервным сооружением, для данного участка необходима организация регулярного инструментального контроля и разработка противооползневых мероприятий, включающих перехват и отвод грунтовых вод выше оползневого тела.

Данные, полученные по результатам расчётов пропускной способности, показывают, что канал не способен пропустить поток ни в водном, ни в наносоводном, ни в грязекаменном режиме: его

пропускная способность на заваленном участке составляет 22–41 % от расчётного расхода 245 м³/с. Расчётная скорость (2,0 м/с), в 2,5–3 раза превышающая допустимую для грунтового русла, будет дополнительно провоцировать размыв оползневого дна, снижая устойчивость всего узла. Приведённые значения пропускной способности следует рассматривать как оптимистичную оценку: реальные показатели могут оказаться ниже вследствие прогрессирующего эрозионного разрушения дна.

Существенной угрозой остаётся состояние предпортального участка водоотводного тоннеля: залесение наносов перед входным порталом достигло 43,8 % от общей площади (9 650 м²), увеличившись вдвое за 2021–2025 гг. При очередном сопоставимом сходе на р. Гижгит весь объём быстрорастущей ольхи серой с поверхностной корневой системой будет увлечён потоком, что в совокупности с отсутствием сороудерживающей сетки создаёт высокую вероятность блокировки тоннеля – единственного основного водоотводного сооружения. Блокировка тоннеля при одновременной неработоспособности аварийного канала формирует каскадный сценарий с угрозой разрушения основной дамбы и масштабного загрязнения бассейна р. Баксан токсичными отходами.

Таким образом, аварийный водоотводный канал хвостохранилища в нынешнем состоянии, по всей вероятности, не пригоден к выполнению запроектированной защитной функции. В качестве первоочередных мероприятий рекомендуется: вырубка растительности и расчистка наносов перед входным порталом тоннеля, установка сороудерживающей решётки; капитальная реконструкция аварийного водосброса с расчисткой русла от оползневых отложений и укреплением дна и стенок бетонными конструкциями; доработка правой оконечности отсечной дамбы для надёжного сопряжения с входным оголовком канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальнева И.В., Кононова Н.К. Активность селей на территории России и ближнего зарубежья в XXI веке // *ГеоРиск*. 2023. № 48. С. 1–10.
2. Дубинин С.В. Анализ геоэкологического ущерба от гидродинамических аварий на хвостохранилищах // *Кузбасский государственный технический университет. Кемерово*, 2016. С. 175–191.
3. Мельников Н.Н., Калашник А.И. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части российской сектора Арктики // *Арктика: экология и экономика*. 2015. № 3 (19). С. 66–67.
4. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. – СПб.: *Наукоемкие технологии*, 2022. 676 с.
5. *Ледники и климат Эльбруса* / под ред. В.Н. Михаленко. – М.: СПб.: *Нестор-История*, 2020. 369 с.
6. Опыт прогнозирования селей в условиях деградации оледенения на Центральном Кавказе / Сейнова И.Б. и др. // *ГеоРиск*. 2018. Т. XII, № 4, с. 26–37.
7. Докукин М.Д., Запороженко Э.В., Знаменский Д.В. Хвостохранилища – объекты повышенной селевой опасности // *Труды 6-й Международной конференции «Селевые потоки»*. – Душанбе, 2020. С. 25–38.
8. Запороженко Э.В., Докукин М.Д. Хвостохранилище на р. Гижгит в КБР и его проблемы // *IX Int. conf. «Modern problems of water management...»*. Tbilisi, 2019. pp. 301–310.
9. Гегиев К.А., Шерхов А.Х., Гергокова З.Ж., Анахаев К.К. Экологические проблемы Тырныаузского хвостохранилища на реке Гижгит // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. Вып. 11, с. 1386–1394.
10. Шерхов А.Х., Гергокова З.Ж. Оценка актуального состояния некоторых компонентов комплекса ГТС хвостохранилища ТГОК // *Природообустройство*. 2022. № 4. С. 100–106.
11. СП 116.13330.2012. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов (с Изм. № 1, 2020). – М.: *Минрегион России*, 2012. Прил. И.
12. Бевз В.Н., Горбунов А.С. Динамическая геоморфология: оползневые процессы и их региональные особенности. – Воронеж: *Изд-во ВГУ*, 2015. 40 с.
13. ГОСТ Р 54257-2010. *Надёжность строительных кон-*

струкций и оснований. Основные положения и требования. 14. Государственная геологическая карта РФ масштаба 1 : 200 000. Кавказская серия. Лист К 38-I, VII (Кисловодск). 2004. 15. СП 100.13330.2016. Мелиоративные системы и сооружения (актуализированная редакция СНиП 2.06.03-85). – М.:

Минстрой России, 2016. Пп. 8.3, 8.27, табл. А.1, табл. 8.8. 16. СП 58.13330.2019. Гидротехнические сооружения. Основные положения. – М.: Минстрой России, 2019. Прил. Д. 17. Ареалы деревьев и кустарников СССР / Соколов С.Я., Связева О.А., Кубли В.А. – Л.: Наука, 1977. Т. 1. с. 103–104.

REFERENCES

1. Malineva I.V., Kononova N.K. Mudflow activity in Russia and neighboring countries in the 21st century // *GeoRisk*. 2023. No. 48. pp. 1-10.
2. Dubinin S.V. Analysis of geoeological damage from hydrodynamic accidents at tailings ponds // *Kuzbass State Technical University*. Kemerovo, 2016. pp. 175-191.
3. Melnikov N.N., Kalashnik A.I. Creation of a multilevel geodynamic monitoring system for mining and oil and gas facilities in the western part of the Russian Arctic sector // *Arctic: Ecology and Economics*. 2015. No. 3 (19). pp. 66-67.
4. The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation / edited by V.M. Kattsov. St. Petersburg: Science-intensive technologies, 2022. 676 p.
5. *Glaciers and climate of Elbrus* / edited by V.N. Mikhlenko. M.: St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2020. 369 p.
6. Seinova I.B. et al., Experience in predicting mudflows in conditions of glaciation degradation in the Central Caucasus, *GeoRisk*. 2018. Vol. XII, No. 4, pp. 26-37.
7. Dokukin M.D., Zaporozhchenko E.V., Znamensky D.V. Tailings dumps — objects of increased mudflow hazard // *Proceedings of the 6th International Conference "Mudflows"*. Dushanbe, 2020. pp. 25-38.
8. Zaporozhchenko E.V., Dokukin M.D. The Gizhgir river tailing dam in the CBD and its problems // IX Int. conf. "Modern problems of water management...". Tbilisi, 2019. pp. 301-310.
9. Gegiev K.A., Sherkhov A.Kh., Gergokova Z.Zh., Anakhaev K.K. Environmental problems of the Tyrmayuz tailings dam on the Gizhgir River // *Bulletin of MGSU*. 2018. Vol. 13. Issue 11, pp. 1386-1394.
10. Sherkhov A.Kh., Gergokova Z.Zh. Assessment of the current state of some components of the GTS complex of the TGOC tailings storage facility // *Environmental management*. 2022. No. 4. pp. 100-106.
11. SP 116.13330.2012. Engineering protection of territories, buildings and structures from dangerous geological processes (with Amendments No. 1, 2020). Moscow: Ministry of Regional Development of Russia, 2012. Appendix I.
12. Bezz V.N., Gorbunov A.S. Dynamic geomorphology: landslide processes and their regional features. Voronezh: VSU Publishing House, 2015. 40 pages.
13. GOST R 54257-2010. Reliability of building structures and foundations. The main provisions and requirements.
14. State Geological map of the Russian Federation scale 1:200 000. Caucasian series. Sheet K 38-I, VII (Kislovodsk). 2004.
15. SP 100.13330.2016. Reclamation systems and structures (updated version of SNiP 2.06.03-85). Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2016. Paragraphs 8.3, 8.27, table A.1, Table 8.8.
16. SP 58.13330.2019. Hydraulic structures. Basic provisions. Moscow: Ministry of Construction of Russia, 2019. Appendix
17. Habitats of trees and shrubs of the USSR / Sokolov S. Ya., Svyazeva O.A., Kubli V.A. L.: Nauka, 1977. Vol. 1. pp. 103-104.

