

Оценка динамики температурного режима льдопородного целика, возведенного на дне отработанного кимберлитового карьера АК «АЛРОСА»

Ю.А. Хохолов, В.В. Киселев, Д.Е. Соловьев, Д.В. Хосоев ✉

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск,
Российская Федерация*
✉ dkhosoyev@mail.ru

Резюме: В статье рассмотрены негативные факторы, осложняющие подземную отработку подкарьерных запасов кимберлитовых месторождений криолитозоны. Приведено описание предлагаемых способов: возведения льдопородного целика на дне отработанного кимберлитового карьера, намораживания льдопородного массива из вод техногенного озера, сооружения теплозащитного слоя однослойной и двухслойной конструкции. Приведены в графической форме результаты расчетов по разработанной авторами методике температурного режима льдопородного массива и теплозащитного экрана при различных значениях толщин породной отсыпки и слоя полистирола, позволяющие оценить динамику происходящих тепловых процессов в течение года, которые подтверждают эффективность двухслойной теплозащитной конструкции. Подчеркивается при внедрении предлагаемого способа возможность обеспечения: мерзлого состояния возведенного целика при наличии гидрозащитного покрытия и работающего водоотлива; безопасности ведения горных работ в руднике, отрабатывающем подкарьерные запасы; устойчивости прибортового горного массива отработанного карьера; отработки имеющегося рудного целика с получением дополнительных доходов.

Ключевые слова: льдопородный массив, обводненная породная осыпь, техногенное озеро, теплозащитный слой, температура, моделирование, теплообмен, дно отработанного кимберлитового карьера, подкарьерные запасы, полистирол, криолитозона

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (FWRS-2026-0056, №1025031700053-3-1.5.1 ЕГИСУ НИОКТР) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

Для цитирования: Хохолов Ю.А., Киселев В.В., Соловьев Д.Е., Хосоев Д.В. Оценка динамики температурного режима льдопородного целика, возведенного на дне отработанного кимберлитового карьера АК «АЛРОСА». *Горная промышленность*. 2026;(1):56–60. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-56-60>

Assessment of temperature dynamics in ice-rock mass formed at the bottom of an ALROSA depleted kimberlite open pit

Yu.A. Khokholov, V.V. Kiselev, D.E. Soloviev, D.V. Hosoev ✉

*N.V. Chersky Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk,
Russian Federation*
✉ dkhosoyev@mail.ru

Abstract: The article outlines negative factors that make mining of underground kimberlite deposits in the cryolithozone more complicated. It describes the proposed methods, i.e. construction of an ice rock block at the bottom of a depleted kimberlite open pit, freezing of ice rock mass using waters of a man-made lake, and construction of a single-layer and double-layer thermal insulation screen. The results of calculations using the authors' methodology for the temperature regime of the ice rock mass and the thermal insulation screen at different thicknesses of the rock backfill and polystyrene layer are presented in graphical form, making it possible to assess the dynamics of the thermal processes occurring throughout the year, which confirm the efficiency of the double-layer thermal insulation structure. It is emphasized that implementation of the proposed method makes it possible

to ensure the frozen state of the constructed block if a waterproof coating and a functioning drainage system is in place; the safety of mining operations in the underground mine that is used to develop the pit reserves; the stability of the near-wall rock mass of the worked-out open pit; development of the existing ore body with additional revenue.

Keywords: ice rock mass, water-saturated rock debris, man-made lake, thermal insulation layer, temperature, modeling, heat exchange, bottom of a depleted kimberlite pit, pit reserves, polystyrene

Acknowledgments: The study was carried out within the State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (FWRS-2026-0056, № 1025031700053-3-1.5.1 EGISU NIOCTR) using instruments that belong to the Shared core facilities of the Federal Research Center, Yakutsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

For citation: Khokholov Yu.A., Kiselev V.V., Soloviev D.E., Hosoev D.V. Assessment of temperature dynamics in ice-rock mass formed at the bottom of an ALROSA depleted kimberlite open pit. *Russian Mining Industry*. 2026;(1):56–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-1-56-60>

Введение

К числу основных тенденций, осложняющих освоение минерально-сырьевой базы в России и за рубежом, относится ухудшение экономико-географических и горнотехнических условий разработки месторождений как открытым, так и подземным способом. В связи с этим перед различными направлениями горной науки, в первую очередь геомеханики и теплофизики, встал ряд сложных задач разработки эффективных, неординарных технологий ведения горных работ в экстремальных климатических, геокриологических и геотехнологических условиях, а также мероприятий по нейтрализации и управлению негативными процессами, приводящими к растеплению, деформированию и разрушению прибортовых горных массивов карьеров и подземных горных выработок рудников криолитозоны.

Всё вышесказанное в полной мере относится к кимберлитовым рудникам АК «АЛРОСА», дорабатывающим подкарьерные запасы, где горнотехнические условия крайне неблагоприятны, в частности, на руднике «Интернациональный» из-за наличия на дне отработанного карьера поверх бетонной плиты, сформированной на поверхности защитного рудного целика, мощной осыпи из обрушившихся обводненных горных пород, а также техногенного озера, образованного за многолетний период при отсутствии водоотлива, делает его потенциально опасным объектом.

Технология возведения искусственного льдопородного целика

Таким образом, в сложившейся неординарной, крайне непростой ситуации одним из наиболее приемлемых выходов может быть, по нашему мнению, искусственная проморозка накопленных обводненных осей с образованием монолитного льдопородного сооружения (искусственного целика), обладающего высокой несущей способностью [1]. Подтверждением обоснованности этого положения является нахождение рудника в зоне многолетней мерзлоты с неисчерпаемыми ресурсами естественного холода. Намороженный впоследствии на поверхности целика ледяной массив (ЛМ) из вод техногенного озера будет противостоять разрушению пород прибортового горного массива отработанного карьера и одновременно служить аккумулятором холода, предотвращающего растепление возведенного целика в летний период (рис. 1).

Обводненные породные осыпи промораживаются с по-

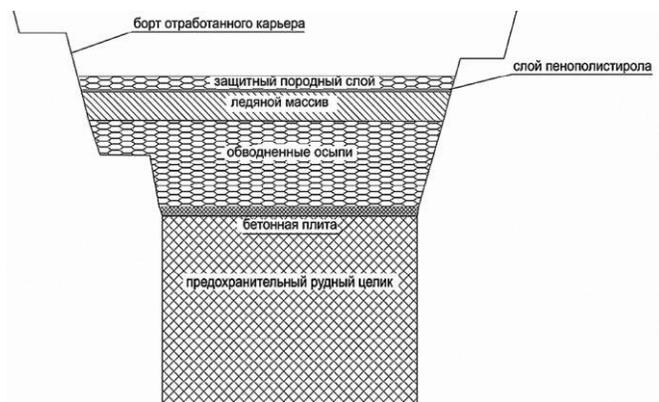


Рис. 1
Рекомендуемая схема возведения искусственного предохранительного целика на дне отработанного кимберлитового карьера

Fig. 1
The recommended design for building an artificial safety barrier at the bottom of a depleted kimberlite pit mine

мощью установок, работающих на естественном или искусственно выработанном холоде. После этого (образования льдопородного целика) в зимний период приступают к возведению ЛМ. Одним из эффективных способов возведения ЛМ в зимний период является применение факельного льдообразования [1–3]. При его применении воды техногенного озера послойно намораживаются поверх естественного ледяного покрова с образованием искусственного ЛМ, оседающего под собственным весом.

После завершения работ по намораживанию ЛМ (панциря), толщина которого соответствует глубине озера, поверх него для сохранения круглогодичного мерзлого состояния предлагается возведение теплоизолирующего экрана из материалов, обладающих высоким термическим сопротивлением.

Различные типы теплозащитных конструкций широко применяются в горном деле [4–6], прокладке автомобильных и железных дорог [7; 8], в промышленном и гражданском строительстве [9; 10]. В качестве теплоизоляционных используются природные материалы, в частности, рыхлые сухие горные породы и выпускаемые в широком ассортименте искусственные, например, вспенивающиеся пластмассы, а также их комбинации.

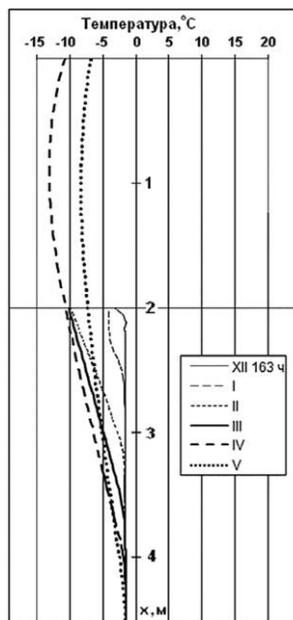


Рис. 2
Распределение температуры по глубине замороженного ледового массива и теплозащитного слоя из породных осыпей толщиной 2 м в период с декабря по май

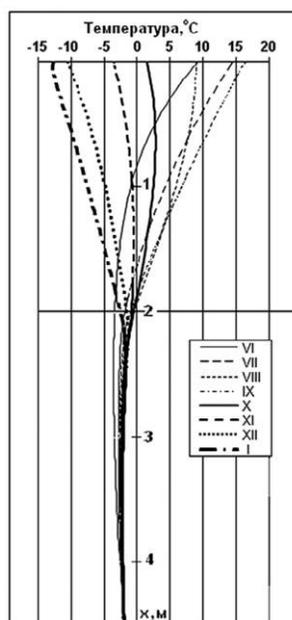


Рис. 3
Распределение температуры по глубине замороженного ледового массива и теплозащитного слоя из породных осыпей толщиной 2 м в период с июня по январь

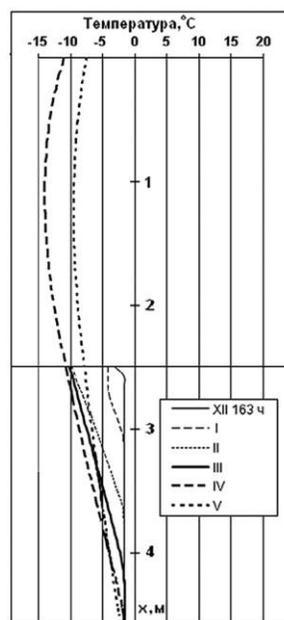


Рис. 4
Распределение температуры по глубине замороженного ледового массива и теплозащитного слоя из породных осыпей толщиной 2,5 м в период с декабря по май

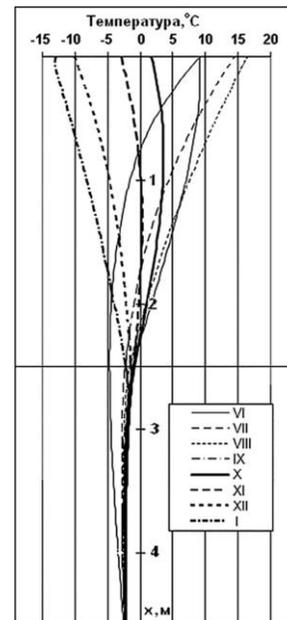


Рис. 5
Распределение температуры по глубине замороженного ледового массива и теплозащитного слоя из породных осыпей толщиной 2,5 м в период с июня по январь

Fig. 2
Temperature distribution across the depth of the frozen ice mass and the 2 m thick thermal insulation layer made of rock debris between December and May

Fig. 3
Temperature distribution across the depth of the frozen ice mass and the 2 m thick thermal insulation layer made of rock debris between June and January

Fig. 4
Temperature distribution across the depth of the frozen ice mass and the 2.5 m thick thermal insulation layer made of rock debris between December and May

Fig. 5
Temperature distribution across the depth of the frozen ice mass and the 2.5 m thick thermal insulation layer made of rock debris between June and January

Результаты расчетов параметров температурного режима возведенного ледового массива и искусственно намораживаемого ледового панциря с наличием теплоизоляционного экрана

Расчет температур ледового массива, искусственно намороженного ЛМ и теплозащитного слоя из породных осыпей проводился для условий карьера «Интернациональный» АК «Алроса» с использованием математической модели, изложенной в работах [1; 11]. Модель учитывает годовую динамику изменения температуры воздуха на дне отработанного карьера, теплофизические свойства пород осыпи, значения толщины ЛМ и теплоизоляции. С использованием разработанных методик были сделаны расчеты температурного режима ЛМ и теплозащитного слоя (экрана) из породных осыпей с целью оценки динамики и количественных показателей этого процесса при значениях толщины отсыпки 2 и 2,5 м. В расчетах принято, что температура фазовых переходов влаги соответствует -1°C из-за засоленности горных пород, толщина намороженного ЛМ (панциря) – 6,5 м – равна глубине техногенного озера. Результаты расчетов приведены на рис. 2–5 в виде распределений температур намороженного ЛМ (панциря) по глубине теплозащитного слоя (экрана) толщиной 2 м

в разные моменты времени. Из рис. 3, в частности, видно, что на глубине 2 м температура породного слоя на границе с ледовой поверхностью к концу летнего периода может составить $-0,6^{\circ}\text{C}$, и это значение превышает температуру фазовых переходов влаги. Таким образом двухметровая толщина защитного экрана не обеспечивает мерзлое состояние на контакте защитный экран–лед, хотя намороженный ЛМ протаивает только на глубину 0,15 м.

Анализ результатов расчета свидетельствует, что при толщине теплоизолирующей породной сыпучей отсыпки 2,5 м (см. рис. 4 и 5) температура на контакте теплоизолирующий экран–намороженный лед к концу летнего периода будет равна -1°C . Таким образом, при такой толщине защитного экрана удастся избежать протаивания намороженного ЛМ. При этом обязательным условием является наличие поверх экрана гидрозакричного покрытия и постоянно функционирующего карьерного водоотлива, обеспечивающего нахождение породной отсыпки в сухом, сыпучем состоянии.

Аналогичные расчеты были проведены при наличии комбинированной (двухслойной) теплоизоляции, состоящей из слоя полистирола, уложенного на ледяную поверхность, покрытого сверху сухим геоматериалом породной осыпи. Рассчитаны варианты с толщиной полистирола 0,05 и

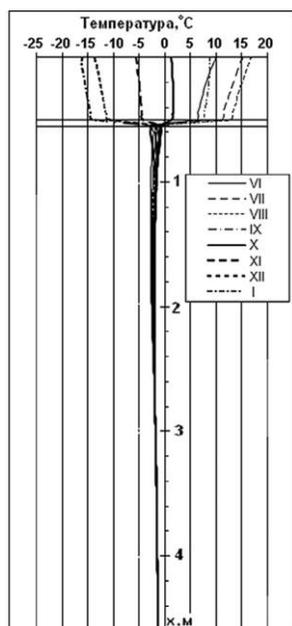


Рис. 6
Распределение температуры по глубине намороженного ледового массива и теплозащитного слоя из породных осыпей толщиной 0,5 м в комбинации с пенополистирольным покрытием толщиной 0,05 м в период с июня по январь

Fig. 6
Temperature distribution across the depth of the frozen ice mass and the 0.5 m thick thermal insulation layer made of rock debris in combination with the 0.05 m polystyrene layer between June and January

0,1 м и толщиной слоя пород 0,5 м, результаты приведены на рис. 6 и 7. Из графиков видно, что при толщине пенополистирола 0,05 м возможно оттаивание ЛМ на глубину 0,15 м, а при увеличении толщины до 0,1 м температура граничного слоя остается отрицательной.

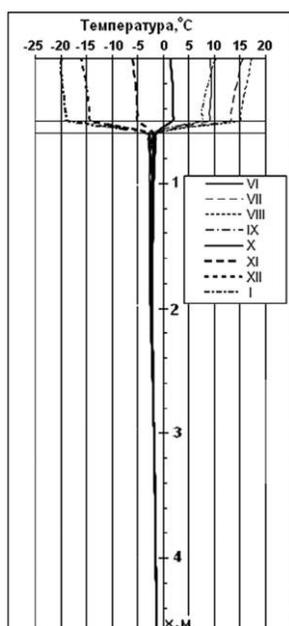


Рис. 7
Распределение температуры по глубине намороженного ледового массива и теплозащитного слоя из породных осыпей толщиной 0,5 м в комбинации с пенополистирольным покрытием толщиной 0,1 м в период с июня по январь

Fig. 7
Temperature distribution across the depth of the frozen ice mass and the 0.5 m thick thermal insulation layer made of rock debris in combination with the 0.1 m polystyrene layer between June and January

Заключение

Рассмотрены рекомендуемые способы возведения искусственного льдопородного целика, намораживания ЛМ и сооружения теплоизоляционного экрана. С использованием разработанных методик проведены тепловые расчеты температурного режима ЛМ и отсыпанного поверх него слоя (экрана) из породных осыпей бортов карьера с учетом динамики изменения температуры воздуха на дне отработанного карьера, теплофизических свойств пород и значений толщины экрана с целью оценки динамики и показателей этого процесса при значениях толщины отсыпки: 2 и 2,5 м. Установлено, что двухметровая толщина защитного экрана не обеспечивает мерзлое состояние на контакте теплозащитный экран–лед, хотя замороженный ледовый массив протаивает только на глубину 0,15 м.

Проведенные исследования подтверждают возможность круглогодичного сохранения возведенного льдопородного целика в замерзшем состоянии при наличии ЛМ, играющего роль аккумулятора холода и теплозащитного экрана однослойной или двухслойной конструкции, гидрозащитного покрытия, стабильно функционирующего карьерного водоотлива и нейтрализации восходящих тепловых потоков от действующего рудника. Результаты расчетов показывают, что при толщине породной отсыпки 2,5 м температура на контакте теплоизолирующий экран–намороженный лед к концу летнего периода не будет превышать -1°C и, следовательно, удастся избежать протаивания ЛМ. При соблюдении этих требований возведенный целик будет круглогодично находиться в твердом, замороженном состоянии с обеспечением требуемой несущей способности.

При наличии комбинированной (двухслойной) теплоизоляции для обеспечения мерзлого состояния намороженного ЛМ толщина слоя полистирола должна составлять не менее 0,1 м, а породного слоя $\geq 0,5$ м. Тем самым возведение двухслойной теплоизоляции предпочтительнее, позволяет намного ускорить возведение теплозащитного экрана при значительном уменьшении толщины породной отсыпки.

Внедрение предполагаемого способа позволит: возвести в короткие сроки при минимальных затратах надежный защитный искусственный целик; ликвидировать потенциально опасный объект; обеспечить безопасность ведения горных работ на руднике, обрабатывающем подкарьерные запасы, и устойчивость прибортового горного массива отработанного карьера, предотвращая образование осыпей. Кроме этого, при наличии искусственного целика представится возможность отработки существующего – рудного – с получением дополнительных доходов.

Список литературы / References

1. Хохолов Ю.А., Курилко А.С., Киселев В.В., Соловьев Д.Е. Математическое моделирование формирования искусственного ледяного массива методом факельного намораживания на дне отработанного карьера криолитозоны. *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2022;9(2):53–60.
Khokholov Yu.A., Kurilko A.S., Kiselev V.V., Solov'ev D.E. Mathematical modeling of artificial ice massif formation by jet freezing at the bottom of mined-out quarry in permafrost zone. *Journal of Fundamental and Applied Mining Sciences*. 2022;9(2):53–60. (In Russ.)
2. Гохман В.В., Сосновский А.В. Опыт применения факельного намораживания льда в условиях Шпицбергена. *Материалы гляциологических исследований*. 1984;(50):231–237.
Gokhman V.V., Sosnovsky A.V. Experience of using jet formation of ice in conditions of Spitsbergen. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. 1984;(50):231–237. (In Russ.)

3. Сосновский А.В., Накалов П.Р., Ненашев С.В. Физико-географические закономерности формирования искусственных фирново-ледяных массивов. *Лёд и снег*. 2014;54(2):113–119. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-113-119>
Sosnovsky A.V., Nakalov P.R., Nenashev S.V. Physical-geographical aspects of formation of artificial firn-ice massives. *Ice and Snow*. 2014;54(2):113–119. (In Russ.) <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2014-2-113-119>
4. Авксентьев И.В., Скуба В.Н. *Теплоизоляция горных выработок в условиях многолетней мерзлоты*. Новосибирск: Наука; 1984. 175 с.
5. Гончаров С.А., Бельченко Е.Л. Теплоизоляция талых золотоносных песков при условии попусения их промерзания на западную глубину. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 1998;(6):28–32.
Goncharov S.A., Belchenko E.L. Thermal insulation of thawed gold-bearing sands when they are allowed to freeze down to the designated depth. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 1998;(6):28–32. (In Russ.)
6. Васильев П.Н., Курилко А.С., Хохолов Ю.А., Шерстов В.А. *Тепловой режим угольных шахт якутии и способы его регулирования*. Якутск: ЯНЦ СО РАН; 2009. 240 с.
7. Стетюха В.А., Рахвалова Н.В. Оценка эффективности теплоизоляции многолетнемерзлых грунтов. *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2013;(10):82–88.
Stetyukha V.A., Rakhvalova N.V. The estimation of thermal insulation effectiveness of permafrost. *Transbaikal State University Journal*. 2013;(10):82–88. (In Russ.)
8. Ашпиз Е.С., Хрусталева Л.Н., Емельянова Л.В., Ведерникова М.А. Использование синтетических теплоизоляторов для сохранения мерзлотных условий в основании железнодорожной насыпи. *Криосфера Земли*. 2008;12(2):84–89.
Ashpiz E.S., Khrustaleva L.N., Emelyanova L.V., Vedernikova M.A. Using of synthetical thermal insulators for conservation of frozen soil conditions in the base of railway embankment. *Earth's Cryosphere*. 2008;12(2):84–89. (In Russ.)
9. Бек-Булатов А.И. Морозозащищенные фундаменты мелкого заложения. *Строительные материалы*. 2006;(6):68–69.
Bek-Bulatov A.I. Freeze-protected shallow foundations. *Stroitel'nye Materialy*. 2006;(6):68–69. (In Russ.)
10. Конаш В.Е., Алексеев А.Г., Бондаренко Г.И., Хрусталева Л.Н., Кашабин А.В., Бек-Булатов А.И. *Руководство по применению теплоизоляции из плит полистирольных вспененных экструзионных Пеноплэкс при проектировании и устройстве фундаментов зданий и опор трубопроводов на подсыпках на многолетнемерзлых грунтах*. М.: ФГУП НИЦ Строительство; 2009. 32 с. Режим доступа: https://e-uteplitel.ru/pdf-doc/penopleks_fundamenty_na_merzlyx_gruntax.pdf (дата обращения: 23.09.2025).
11. Хохолов Ю.А., Курилко А.С. Теплообмен породных и закладочных массивов при отработке кимберлитов. *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2004;(1):35–41.
Khokholov Yu.A., Kurilko A.S. Heat exchange of rock and filling masses in kimberlite mining. *Journal of Mining Science*. 2004;40(1):31–36. <https://doi.org/10.1023/B:JOMI.0000041525.89156.af>

Информация об авторах

Хохолов Юрий Аркадьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-9510-3808>; e-mail: khokholov@igds.ysn.ru

Киселев Валерий Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

Соловьев Дмитрий Егорович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация

Хосоев Доржо Владимирович – младший научный сотрудник, Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения Российской академии наук, г. Якутск, Российская Федерация; e-mail: dkhosoyev@mail.ru

Information about the authors

Yury A. Khokholov – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, Mining Geophysics Laboratory, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-9510-3808>; e-mail: khokholov@igds.ysn.ru

Valery V. Kiselev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Geophysics Laboratory, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

Dmitry E. Soloviev – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Mining Geophysics Laboratory, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

Dorzho V. Hosoev – Junior Research, N.V. Chersky Institute of Mining of the North of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation; e-mail: dkhosoyev@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 28.10.2025

Поступила после рецензирования: 16.12.2025

Принята к публикации: 17.12.2025

Article info

Received: 28.10.2025

Revised: 16.12.2025

Accepted: 17.12.2025