



**РОЛЬ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
И БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАХТ И РУДНИКОВ КРИОЛИТОЗОНЫ**

С. М. Ткач, А. С. Курилко, Д. Е. Соловьев

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН,
E-mail: tkach@igds.ysn.ru, a.s.kurilko@igds.ysn.ru, solovjevde@igds.ysn.ru,
просп. Ленина 43, г. Якутск 677980, Россия*

Изложены вопросы, касающиеся влияния температурного фактора на безопасность и эффективность при разработке месторождений полезных ископаемых подземным способом в районах распространения многолетнемерзлых горных пород. Определены особенности ведения горных работ и формирования теплового режима в россыпных шахтах криолитозоны. Показано, что основным требованием регулирования теплового режима шахты является предотвращение оттаивания окружающих выработки дисперсных горных пород. Представлены результаты прогнозных расчетов (методом математического моделирования) температурного режима в воздухоподающих выработках, а также вмещающем их массиве горных пород проектируемой россыпной шахты. Рассмотрены результаты математического моделирования температурного режима грунтов в районе свайного фундамента башенного копра и устьевой части вертикального ствола. На основе результатов численного моделирования даны рекомендации по организации автоматизированного контроля температуры грунтов (горизонтальными скважинами) устьевой части ствола.

Криолитозона, шахты и рудники Севера, горные выработки, тепловой режим, математическое моделирование

**ROLE OF THERMOPHYSICAL RESEARCH IN PROVIDING EFFICIENCY
AND SAFETY OF MINE OPERATION IN PERMAFROST ZONE**

S. M. Tkach, A. S. Kurilko, and D. E. Solovyov

*Mining Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: tkach@igds.ysn.ru, a.s.kurilko@igds.ysn.ru, solovjevde@igds.ysn.ru,
pr. Lenina 43, Yakutsk 677980, Russia*

The issues concerning the influence of temperature factor on safety and efficiency during the underground mining of mineral deposits in the areas with permafrost rocks are set forth. The features of mining operations and the formation of a thermal regime in alluvial mines of the permafrost zone have been determined. It is shown that the main requirement for regulating the thermal regime of a mine is to prevent thawing of dispersed rocks surrounding mine workings. The results of predictive calculations (by the method of mathematical modeling) of the temperature regime in air supply workings, as well as in enclosing rock mass of a designed alluvial mine, are presented. The results of mathematical modeling of the temperature regime of soils in the area of pile foundation of a tower-type drop hammer and the mouth of a vertical shaft are considered. Based on the results of numerical modeling, recommendations are given to organize automated control of soil temperature (horizontal wells) of the wellhead.

Permafrost, mines of the Russian North, mine workings, thermal regime, mathematical modeling

Общеизвестно, что как в России, так и за рубежом к основным тенденциям осложняющим освоение минерально-сырьевой базы при добыче полезных ископаемых подземным и открытым способами относятся усложнение экономико-географических и горно-технических условий

разработки месторождений. Это приводит к тому, что перед горной наукой, в первую очередь геомеханикой и горной теплофизикой, встает целый ряд сложных задач, связанных с выявлением особенностей ведения горных работ в экстремальных климатических, геокриологических и геотехнологических условиях и разработке соответствующих мероприятий по нейтрализации и управлению негативными процессами, которые приводят к деформированию и разрушению прибортовых горных массивов карьеров, подземных горных выработок и надшахтных зданий рудников Севера.

Тепловой режим устьевых участков россыпных шахт Севера. Одним из основных факторов, определяющим эффективность и безопасность ведения технологических процессов горного производства при разработке россыпных месторождений полезных ископаемых криолитозоны, является температура. Определяющее значение данного фактора связано с зависимостью прочностных свойств дисперсных горных пород от температуры. Наличие льда-цемента в мерзлых дисперсных породах, который обладает отчетливо выраженными пластическими свойствами, при изменении температуры оказывает непосредственное влияние на механические свойства пород. При этом цементационные свойства льда значительно снижаются вплоть до нуля в результате его таяния. Так, с повышением температуры мерзлых пород с -18 до -1°C прочность пород снижается более чем в три раза [1], а при полном протаивании они превращаются в пластичную или сыпучую массу. Риски, связанные с обрушением воздухоподающих выработок при оттайке вмещающих мерзлых пород в летний период эксплуатации шахты, а также существенные затраты на их теплоизоляцию и крепление приводят к тому, что разработка небольших неглубоко залегающих россыпей осуществляется только в зимний период с использованием переносного низкопроизводительного оборудования, а в летнее время проводится лишь промывка песков. Аналогичный подход применяется и за рубежом, в частности на Аляске [2, 3].

Внедрение самоходного горного оборудования (СГО) с двигателями внутреннего сгорания позволяет значительно увеличить объемы добычи и производительность труда горнорабочих и соответственно снизить сроки отработки месторождения и себестоимость добычи песков на крупных россыпных шахтах (РШ). В тоже время при работе данного оборудования выделяются высокотоксичные выхлопные газы, загрязняющие шахтную атмосферу, в результате чего возникает необходимость в усиленной вентиляции РШ, чтобы обеспечить требуемые правилами безопасности их предельно допустимые концентрации.

Эффективность и в конечном итоге сама возможность эксплуатации СГО на россыпных шахтах криолитозоны в значительной степени зависит от класса устойчивости пород кровли, поскольку влияет на выбор системы разработки и ее параметров, а также способов управления горным давлением [4]. Одним из основных параметров классификации устойчивости массива многолетнемерзлых дисперсных пород на РШ Севера является их температурный режим.

Высокая сложность проведения физического моделирования в натуральных условиях РШ предопределила необходимость математического моделирования тепловых процессов в горных породах и выработках, которое составляет в настоящее время значительную часть исследований, направленных на оценку их криогенного состояния, устойчивости, прочности и т. д. при ведении горных работ. В первую очередь это вызвано развитием вычислительной техники, которая в настоящее время обладает достаточной оперативной памятью, позволяющей решать широкий класс тепловых задач с фазовыми переходами влаги в горных породах, характерных для криолитозоны. Кроме того, во многих случаях математическое моделирование является единственно возможным методом оценки динамики температурного поля горных пород вокруг выработок.

В лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН разработана программа, которая позволяет рассчитывать воздухораспределение и тепловой режим сети горных выработок шахт и рудников криолитозоны [5]. В основе программы лежит двумерная математическая модель, описывающая процессы теплопереноса в горных породах с учетом фазовых переходов влаги. Численная реализация математической модели осуществляется конечно-разностным методом суммарной аппроксимации, который сводит многомерную задачу к последовательному решению одномерных задач. Одномерные задачи аппроксимировались неявными разностными схемами сквозного счета. С использованием данной программы проведены исследования формирования теплового режима РШ с учетом влияния работы СГО для условий россыпного месторождения алмазов “Солур”.

Как видно из рис. 1, круглогодичная эксплуатация шахты при знакопеременном тепловом режиме приводит к тому, что в летний период в устьевой части воздухоподающего ствола происходит значительное протаивание мерзлых дисперсных пород на глубину более 1.5 м. В свою очередь, в зимний период наблюдается прямо противоположная картина — интенсивное промораживание породного массива, температура пород на глубине 0.5 м понижается до -22°C , а на глубине 1.5 м — до -13°C .

Численные расчеты показали, что при эксплуатации РШ с естественным (нерегулируемым) тепловым режимом будет происходить уменьшение размера ореола оттаивания пород вокруг устьевой части выработки, поскольку в значительно более длинный зимний период эксплуатации в сравнении с летним окружающий породный массив аккумулирует холод, тем самым оказывая положительное влияние на устойчивость выработки [6]. В тоже время экстремально низкие температуры воздуха, поступающего в шахту в отсутствие его подогрева, будут создавать дискомфортные условия труда для горнорабочих, вызывая рост простудных заболеваний, и могут привести к образованию морозобойных трещин в приконтурном слое породного массива.

Таким образом, чтобы обеспечить устойчивость и снизить затраты на крепление воздухоподающих выработок необходимо осуществлять предварительное охлаждение воздуха, подаваемого в шахту в летний период, иначе высока вероятность их обрушения [7], что соответственно потребует дополнительных финансовых затрат на ликвидацию аварии и потерь от простоя горного предприятия. Мероприятия, связанные с охлаждением воздушной струи, подаваемой в шахту, являются довольно энергозатратными и дорогостоящими, чем объясняется сезонность работ большинства РШ криолитозоны (в основном в зимний период) с консервацией на летний сезон.

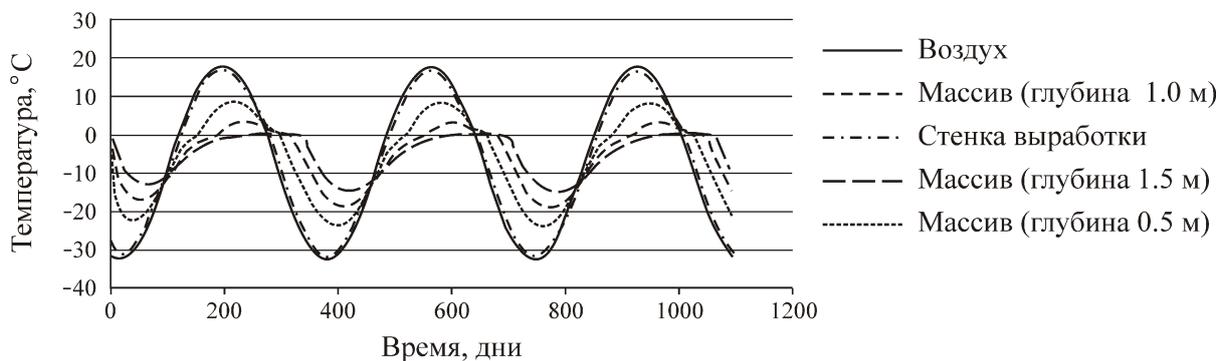


Рис. 1. Динамика изменения температуры воздуха, горных пород стенки выработки и по глубине массива (0.5, 1 и 1.5 м) в устьевой части воздухоподающего ствола при круглогодичной эксплуатации шахты

Следует отметить, что наибольший объем воздуха, подаваемого для вентиляции высокомеханизированных РШ, определяется необходимостью разжижения выхлопных газов СГО с дизельным приводом. За рубежом в среднем нормативный расход воздуха, приходящийся на 1 кВт

мощности дизельного двигателя, составляет 3.8 м³/мин [8]. В существующих на данный момент в России Единых правилах безопасности (в отличие от предыдущих) отсутствует нормативный показатель в 6.8 м³/мин на 1 кВт номинальной мощности дизельных двигателей, что позволяет в свою очередь уменьшить объемы подаваемого воздуха по фактору разжижения выхлопных газов до требуемых. Таким образом, этот показатель может быть скорректирован в сторону снижения. Этому во многом способствует рост экологичности современных двигателей и совершенствование очистительных устройств, выпускаемых для горных предприятий, позволяющий приблизить нормативный показатель до значений, применяемых за рубежом. Данное обстоятельство, а также применение соответствующих мероприятий по регулированию теплового режима создаст условия, которые обеспечат возможность круглогодичной эксплуатации РШ или значительного сокращения продолжительности ее консервации в летний период. В зимний период это позволит уменьшить затраты на подогрев вентиляционного воздуха для обеспечения требуемых санитарно-гигиенических условий (по температурному фактору) для горнорабочих.

Температурный режим грунтов, вмещающих свайный фундамент копров и устьевые части вертикальных стволов кимберлитовых рудников криолитозоны. В настоящее время основные месторождения алмазов в Якутии, такие как “Интернациональный”, “Мир”, “Удачный” и “Айхал”, ранее обрабатываемые открытым способом, перешли на подземный способ. При этом данные месторождения вскрываются вертикальными и наклонными стволами, над которыми располагаются громоздкие, многотонные башенные копры. Эти сооружения создают большую нагрузку на свайное поле, которое расположено вокруг ствола. При проходке стволов в условиях криолитозоны в основном происходит технологическое растепление закрепного пространства. Так, на клетевом стволе рудника “Интернациональный” талая зона достигла радиуса 20 м и полностью поглотила свайное поле, что привело к возникновению аварийной ситуации.

Устойчивость копра гарантирована только при отрицательной температуре грунтов, обеспечивающей их круглогодичное нахождение в мерзлом состоянии, что предполагает необходимость их обязательного искусственного укрепления каким-либо способом. Как известно из практики, наиболее простым и эффективным способом укрепления талых грунтов в условиях криолитозоны является их искусственное охлаждение с помощью различных систем замораживания.

Однако стоит отметить, что нередко случаи разрушения крепи стволов (из бетона и чугунных тубингов) в их устьевых частях, приходящихся на зону годовых колебаний температуры. В связи с чем при искусственном замораживании грунтов в основании фундамента копров возникает актуальная задача управления этим процессом, добиваясь с одной стороны необходимой несущей способности свай фундаментов, а с другой — недопущения разрушения крепи ствола.

В соответствии с правилами безопасности воздух, поступающий в подземные горные выработки, должен иметь температуру не менее +2°С, что предопределяет эксплуатацию алмазных рудников в течение года с положительным тепловым режимом. Монтаж замораживающих колонок вокруг ствола позволяет отсечь тепловой поток, идущий от стенок ствола вглубь массива. Дополнительно требуется установка температурных датчиков в термометрических скважинах для регулирования режима работы системы замораживания, поскольку ее эксплуатация предусматривается на весь срок существования рудника.

Прогноз температурного режима пород в основании фундаментов башенных копров является сложной задачей, требующей учета множества факторов, таких как учет температуры замораживающей жидкости, длины замораживающих скважин, их количества и места расположения, годового хода температуры атмосферного воздуха, температуры воздуха в стволе, слоистости и степени засоленности пород вмещающих ствол и фундамент копра и др. В лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН разработана трехмерная математическая модель [9],

которая применялась для определения режима работы замораживающей системы (ЗС), обеспечивающей мерзлое состояние грунтов в основании фундамента копров и в устьевой части стволов на алмазодобывающих рудниках АК “АЛРОСА”, в частности на руднике “Удачный”, для которого отдельные результаты расчетов приведены ниже.

С началом работы замораживающей системы происходит промерзание породного массива, окружающего вертикальный ствол и свайный фундамент копра. Но, как отмечено ранее, промерзание пород может вызвать деформирование конструкций, а также разрушение крепи сдвиговыми напряжениями и чтобы избежать этого требуется наличие демпфирующего кольцеобразного слоя талых пород вокруг ствола. По оценке ряда исследователей минимальная толщина талой зоны должна находиться в пределах от 0.5 до 1 м [10, 11]. Поэтому, чтобы не допустить полного промораживания пород и обеспечить наличие талой кольцеобразной зоны вокруг ствола, а также мерзлое состояние пород свайного фундамента копра необходимо определить параметры работы ЗС.

Результаты численных экспериментов для скипового ствола рудника “Удачный” (при температуре воздуха в стволе $+5^{\circ}\text{C}$ и температуре хладоносителя в колонках -15°C) показали, что наиболее рациональным будет режим, при котором замораживающая система работает в течение трех месяцев и затем на три месяца отключается.

На рис. 2 изображены изолинии, полученные по результатам расчетов температурных полей вокруг ствола, в горизонтальной плоскости на глубине 14 и 27 м (глубина расположения вентиляционного канала), а на рис. 3 — в вертикальной плоскости. Как видно из рис. 2а, на глубине 14 м вокруг ствола при таком режиме работы ЗС через четыре года может быть образована кольцеобразная мерзлая зона с температурой пород $-4 \div -5^{\circ}\text{C}$, а на глубине 27 м — такая же зона с температурой $-4 \div -5^{\circ}\text{C}$ (рис. 2б). Подтверждено, также что существенное тепловое влияние на окружающий породный массив стволов оказывает вентиляционный канал, температура пород вокруг которого не превышает $-1 \div -2^{\circ}\text{C}$.

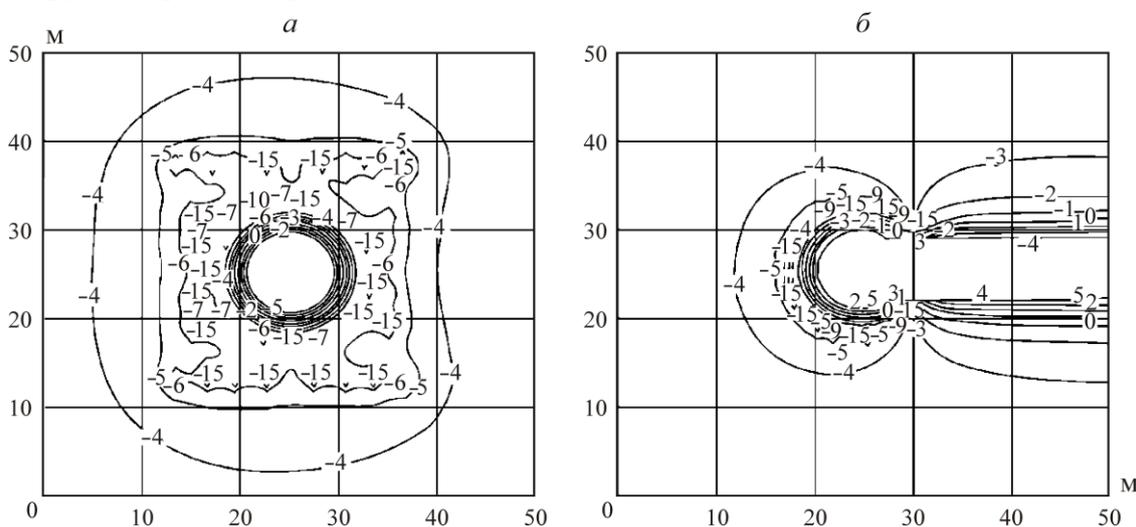


Рис. 2. Температурное поле вокруг скипового ствола на конец 4-го года эксплуатации замораживающей системы. Сечение на глубине, м: а — 14; б — 27

Для более полного контроля за температурой пород (в кольцеобразной талой зоне вокруг ствола) разработаны рекомендации по установке горизонтальных термометрических скважин. На основе проведенных численных расчетов определены три горизонта установки таких скважин на отметках 8, 18 и 35 м от земной поверхности. Длина каждой скважины составляет 2.5 м. Следует отметить, что в качестве обсадки скважин рекомендуется использовать металлические трубы, обладающие высокими прочностными свойствами.

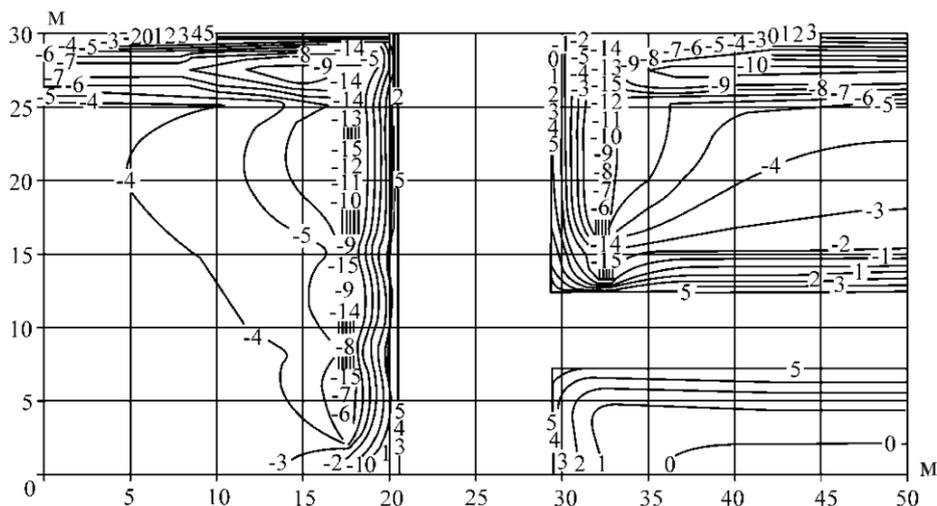


Рис. 3. Температурное поле вокруг скипового ствола на конец четвертого года эксплуатации замораживающей системы. Сечение через ось ствола

Проведенные численные исследования, формирования температурного режима в основании свайного фундамента копра и устьевой части ствола, позволили определить, что для оперативного мониторинга температурного поля на контролируемых объектах достаточно снимать замеры с термометрической системы один раз в неделю.

ВЫВОДЫ

Устойчивость горных выработок шахт и рудников криолитозоны (в том числе устьевых частей) во многом зависят от их температурного режима, поэтому теплофизические исследования, способствующие эффективной и безопасной эксплуатации шахт и рудников криолитозоны имеют исключительно важное значение. Основным требованием обеспечения безопасности шахты является недопущение подачи для вентиляции атмосферного воздуха с положительной температурой, чтобы предотвратить оттаивание окружающих горные выработки дисперсных горных пород.

На основе разработанной в лаборатории горной теплофизики ИГДС СО РАН программы расчета воздухораспределения и теплового режима сети горных выработок установлено, что в устьевой части воздухоподающего наклонного ствола будет происходить протаивание мерзлых дисперсных пород на глубину более 1.5 м, что создаст повышенный риск разрушения крепи и обрушения выработки. В зимний период наблюдается интенсивное промораживание породного массива с понижением температуры пород на глубине 0.5 м до -22°C , а на глубине 1.5 м до -13°C . При этом из года в год будет происходить устойчивое понижение температуры окружающих горных пород в результате аккумуляции холода в зимний период, которое будет положительно влиять на повышение их прочности и соответственно устойчивости выработки.

Отмечается, что существующие на данный момент в России Единые правила безопасности позволяют отходить от прежней нормы объема воздуха в $6.8 \text{ м}^3/\text{мин}$ на 1 кВт номинальной мощности дизельных двигателей по фактору разжижения выхлопных газов до предельно допустимых концентраций. Данное обстоятельство, а также применение соответствующих мероприятий по регулированию теплового режима создаст условия для круглогодичной эксплуатации высокомеханизированных россыпных шахты криолитозоны или сократит продолжительность их консервации на летний период.

Результаты прогнозных расчетов, выполненные для скипового ствола рудника "Удачный" показали, что наиболее рациональным будет режим работы замораживающей системы, при котором она в течение трех месяцев работает, а затем на три месяца отключается. Это позволит сохранить талую демпфирующую кольцеобразную зону мощностью не менее 0.5 м вокруг ствола, а также мерзлое состояние пород свайного фундамента копра.

Разработаны рекомендации по монтажу систем термоконтроля в устьевой части ствола. Проведенные численные расчеты позволили определить скорость движения нулевой изотермы в породном массиве, вмещающем устьевую часть ствола, и установить оптимальный период проведения температурных замеров для оперативного мониторинга температурного поля вмещающих ствол горных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. **Sherstov V. A., Skuba A. N., Lubyi K. I., and Kostromitinov K. N.** Underground mining of placer deposits in Yakutia, Yakutsk, Publishing house of the Yakut branch of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1981, 188 pp. [**Шерстов В. А., Скуба А. Н., Лубий К. И., Костромитинов К. Н.** Подземная разработка россыпных месторождений Якутии. — Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1981. — 188 с.]
2. **Athey J. E., Werdon M. B., Twelker E., and Henning M. W.** Alaska's Mineral Industry 2015, AK: Alaska Division of Geological & Geophysical Survey, Fairbanks, 2016, 57 pp.
3. **Modern Day Placer Mining in Yukon.** URL: http://www.emr.gov.yk.ca/mining/pdf/modern_placer_mining.pdf (дата обращения 15.08.2018).
4. **Instructions** for the development of permafrost placers by underground method (chamber and pillar mining systems), RD 06-326-99. Approved by the decree of the Gosgortekhnadzor of Russia dated November 18, 1999 N 84. [**Инструкция** по разработке многолетнемерзлых россыпей подземным способом (камерные и столбовые системы разработки), РД 06-326-99. Утв. постановлением Госгортехнадзора России от 18.11.99 N 84.]
5. **Khokholov Yu. A., Soloviev D. E.** Forecast of the thermal regime of the mine taking into account the dynamics of the development of mining operations, Mining information and analytical bulletin, 2009, no. 5, pp. 270–275. [**Хохолов Ю. А., Соловьев Д. Е.** Прогноз теплового режима рудника с учетом динамики развития горных работ // ГИАБ. — 2009. — № 5. — С. 270–275.]
6. **Kurilko A. S., Khokholov Yu. A., and Soloviev D. E.** Features of the formation of the thermal regime of alluvial mines in the permafrost zone during mining operations with the use of self-propelled equipment, Mining Journal, 2015, no. 4, pp. 29–31. [**Курилко, А. С., Хохолов Ю. А., Соловьев Д. Е.** Особенности формирования теплового режима россыпных шахт криолитозоны при ведении добычных работ с применением самоходной техники // Горный журнал. — 2015. — № 4. — С. 29–31.]
7. **Emelyanov V. I., Mamaev Yu. A., Kudlai E. D.** Underground mining of permafrost placers, Moscow, Nedra, 1982, 240 pp. [**Емельянов В. И., Мамаев Ю. А., Кудлай Е. Д.** Подземная разработка многолетнемерзлых россыпей. — М.: Недра, 1982. — 240 с.]
8. **Gangal M.** Summary of worldwide underground mine diesel regulations Proceedings of the 18th MDEC Conference, Toronto, Ontario, 2012.
9. **Kurilko A. S., Khokhlov Yu. A., Drozdov A. V., and Soloviev D. E.** Geothermal control of the soils of the base of the headframes and the mouth of the vertical shafts on the example of the Udachny diamond mine (Yakutia), Cryosphere of the Earth, 2017, vol. XXI, no. 5, pp. 82–91. [**Курилко А. С., Хохлов Ю. А., Дроздов А. В., Соловьев Д. Е.** Геотермический контроль грунтов основания копров и устьевой части вертикальных стволов на примере алмазодобывающего рудника “Удачный” (Якутия) // Криосфера Земли. — 2017. — Т. XXI. — № 5 — С. 82–91.]
10. **Kramskov N. P.** Stability of vertical shafts headgear – the basis of industrial safety of diamond mines, Science and Education, 2004, no. 1, pp. 27–34. [**Крамсков Н. П.** Устойчивость копров вертикальных стволов – основа промышленной безопасности алмазодобывающих рудников // Наука и образование. — 2004. — № 1. — С. 27–34.]
11. **Sleptsov V. I., Mordovskoy S. D., and Izakson V. Yu.** Mathematical modeling of heat exchange processes in permafrost rocks, Novosibirsk, Nauka, 1996. [**Слепцов В. И., Мордовской С. Д., Изаксон В. Ю.** Математическое моделирование теплообменных процессов в многолетнемерзлых горных породах. — Новосибирск: Наука, 1996.]