



**ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСВОЕНИЯ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ СЕВЕРА РОССИИ**

**С. М. Ткач**

*Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,  
E-mail: tkach@igds.ysn.ru, пр. Ленина, 43, Якутск 677980, Россия*

Приведен анализ геомеханических и геотехнологических особенностей освоения месторождений твердых полезных ископаемых Севера России и их отрицательное и положительное влияние на эффективность и безопасность горного производства. Представлены результаты исследований Института горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН, направленные на решение задач по совершенствованию существующих и разработке принципиально новых, эффективных, экологически безопасных элементов инновационных геотехнологий, методов, технических средств добычи и переработки минерального сырья, максимально учитывающих специфические условия разработки месторождений твердых полезных ископаемых криолитозоны.

*Геотехнология, криолитозона, условия разработки, геомеханика, горная теплофизика, обогащение, эффективность*

**GEOMECHANICAL AND GEOTECHNOLOGICAL FEATURES  
OF SOLID MINERAL DEPOSITS OF THE RUSSIAN NORTH**

**S. M. Tkach**

*Chersky Institute of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
E-mail: tkach@igds.ysn.ru, pr. Lenina, Yakutsk 677980, Russia*

The paper presents the analysis of geomechanical and geotechnological features of mining solid mineral deposits in the North of Russia and their negative and positive influence on the efficiency and safety of mining production. The article reports new results of researches conducted by the Chersky Institute of Mining of the North, SB RAS to improve the existing and develop fundamentally new, efficient and ecologically friendly innovative technologies, methods, equipment for mineral mining and processing, taking maximum account of the specific conditions for mining solid mineral deposits in permafrost.

*Geotechnology, permafrost, mining conditions, geomechanics, thermophysics, processing, efficiency*

Предпринимаемые в последние годы Правительством Российской Федерации усилия по диверсификации экономики страны, ликвидации ее сырьевой направленности не достигли планируемых результатов. Доля несырьевого сектора в ВВП России снижается, а вес сырьевого сектора растет не только в промышленности, но и во всей экономике. По данным Росстата в 2018 г. доля добычи нефти, газа, угля, металлов и простейших минералов в ВВП достигла абсолютного рекорда за время доступной статистики — 13.2% [1]. Этот факт совершенно не свидетельствует о негативе в экономике страны в части соотношения развития сырьевого и несырьевого секторов. Поступательное развитие несырьевых отраслей невозможно без должной их обеспеченности углеводородами и целым рядом других полезных ископаемых, что подчеркивает важность роли горнодобывающей промышленности в устойчивом росте социально-экономического развития страны и повышении благосостояния ее населения.

Следует подчеркнуть, что в связи с существенным истощением ресурсной базы минерального сырья в регионах с хорошо развитой инфраструктурой новые объекты освоения неуклонно смещаются в малоосвоенные восточные и северо-восточные районы страны, характеризующиеся обширными территориями с очень слабо развитой инфраструктурой и малой их заселенностью, удаленностью от мест переработки и потребления добываемого сырья, дороговизной товаров и услуг, дефицитом высококвалифицированных кадров и др. [2]. Физико-географическая и геологическая среда указанных территорий несомненно оказывает существенное негативное влияние на экономическую эффективность горнодобывающей промышленности. Особенно остро это проявляется при разработке месторождений области распространения многолетнемерзлых горных пород (64 % территории России). Характерным примером подобных регионов страны является обширная (более 3 млн км<sup>2</sup>) территория Республики Саха (Якутия), на треть расположенная в арктической зоне с населением на 01.01.2020 г. чуть более 970 тыс. человек.

Геомеханические и геотехнологические особенности освоения месторождений твердых полезных ископаемых криолитозоны характеризуются и обуславливаются: наличием многолетнемерзлых горных пород; повышенными производственными затратами, практически, на всех процессах горного производства, особыми требованиями к горной технике и оборудованию с точки зрения надежности их эксплуатации в суровых климатических условиях; повышенными требованиями по безопасности труда и охране легкоранимой окружающей природной среды; сложной и затратной логистикой по снабжению горнодобывающих предприятий необходимым оборудованием, расходными материалами и доставке готовой продукции горного производства потребителям и др. Указанные особенности освоения недр предопределяет проблемы и задачи для горной науки и практики в части совершенствования и адаптации геотехнологий к условиям разработки месторождений Севера.

Активное промышленное освоение минерально-сырьевых ресурсов северо-восточных территорий страны, в том числе и Якутии, предопределило объективную необходимость научного сопровождения горных разработок в крайне сложных природно-климатических условиях. Для решения этих задач в 1980 г. в г. Якутске был создан институт горного дела Севера ЯФ СО АН СССР, ныне ИГДС СО РАН, носящий имя его основателя Н. В. Черского. С самого начала своей деятельности научные разработки Института так или иначе основываются на учете геомеханических и геотехнологических особенностей, влияющих на эффективность освоения недр Севера [2–4].

В рамках основных направлений научных исследований (проблемы комплексного освоения минеральных ресурсов в условиях криолитозоны; теплофизика и геомеханика многолетнемерзлых пород и массивов с учетом антропогенных факторов) учеными института получен ряд фундаментальных и прикладных результатов в области геомеханики и горной теплофизики, открытой и подземной геотехнологий разработки месторождений криолитозоны, обогащения и глубокой переработки минерального сырья, геофизических методов исследований грунтов и массивов горных пород, геоэкономики освоения недр Севера и др., которые послужили основой для разработки новой горной техники, технологий и их элементов, концептуальных положений и практических рекомендаций. Многие из них в разные годы были реализованы, либо успешно апробированы на практике горного производства в сложных условиях разработки месторождений Севера [5].

В части продолжения рассмотрения результатов исследований ИГДС СО РАН, приведенных в [2, 6], далее излагаются некоторые новые аннотированные результаты, полученные в рамках выполнения в 2019 г. государственного задания по трем темам: исследование и разработка эффективных конструктивных и технологических параметров подземной и открытой геотехнологии, методов освоения недр криолитозоны; исследование прочностных и физико-механических свойств геоматериалов и особенностей развития теплофизических и геомехани-

ческих процессов в горных выработках и массивах пород при разработке месторождений полезных ископаемых в условиях естественно низких температур; разработка и обоснование инновационных технических и технологических решений эффективного обогащения и глубокой переработки минерального сырья месторождений Севера [7 – 14].

**Геоэкономика и геотехнология.** Разработаны методологические основы комплексного менеджмента качества в цепочках поставок потребителям коксующегося и энергетического угля на примере сложных по структуре и неоднородных по свойствам месторождений Якутии. Основы базируются на: системном подходе при формулировании общих и частных принципов управления качеством; оценке требований сегментов конкурентных рынков к сырью; созданных базах данных месторождений и построенных их 3D моделях; изучении изменения свойств угля в пластах и потоках; разработанной методике деления и оценки зольности добываемого угля на природные и технологические составляющие; предложенных ресурсосберегающих организационных и технологических мерах, обеспечивающих регламентируемый потребителями уровень качества угля и снижающих его общие потери в цепочках поставок.

Обоснована система мероприятий по управлению качеством минерального сырья при эксплуатации глубоко погребенного золотороссыпного месторождения р. Б. Куранах с учетом статистических характеристик и моделей распределения полезного компонента в продуктивном контуре, комбинации дражного и бульдозерно-экскаваторного способов разработки, порядка погашения участков (блоков) месторождения, гранулометрического состава и степени сокращения объема обогащаемых песков при минимальных потерях полезного компонента, что позволит обеспечить стабильные показатели переработки и извлечения золота, селективность и полноту выемки запасов.

В рамках разработки методики измерений и обработки данных георадиолокации для оперативного изучения особенностей строения массива горных пород с выделением зон обводнения, включений льдов установлен комплекс георадиолокационных признаков пластового льда. Сложность выявления подземных льдов обусловлена схожестью их отображения в георадиолокационных волновых полях с любыми ненарушенными слоями мерзлых горных пород. Комплекс признаков установлен для георадиолокационной модели, представленной мерзлым песком (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon = 4$ ) с включением льда ( $\epsilon = 3.2$ ). Для определения участков радарограмм, отвечающих всем признакам, разработан алгоритм обработки данных георадиолокации. По алгоритму на радарограмме производится выделение непрерывных осей синфазности георадиолокационных сигналов, расположенных одна под другой. Для каждой пары осей синфазности проверяется противоположность фаз и подсчитывается количество максимумов  $N$  на Фурье-спектрах георадиолокационных трасс радарограммы. Затем рассчитывается отношение амплитудных значений  $\gamma$  сигналов осей синфазности (для льда  $\gamma < 1$ ). Результатом обработки данных георадиолокации по разработанному алгоритму является местоположение пластовых льдов, рассчитанное по параметрам осей синфазности, удовлетворяющих всем признакам.

Экспериментальными исследованиями установлено влияние степени минерализации поровой влаги в отбитой руде на ее потери при торцевом выпуске в условиях отрицательных температур очистного пространства. В частности, при обработке рудной массы 10%-м раствором хлорида кальция  $\text{CaCl}_2$  в количестве 2.5 л на 1 т отбитой руды с влажностью 1.0 % при температуре  $-5^\circ\text{C}$ , происходит значительное снижение ее потерь от смерзания при выпуске (на 20.7 %). Применение 15%-го раствора хлорида натрия  $\text{NaCl}$  в аналогичных условиях, позволяет снизить потери от смерзания на 16.5 % при расходе 5 л/т. Дальнейшее увеличение расхода раствора в обоих случаях приводит к снижению сыпучих свойств руды и возрастанию ее потерь в блоке (до 48 %).

Разработаны математическая модель и программа расчета параметров бестранспортной технологии внутреннего отвалообразования смерзающихся вскрышных пород, учитывающие температурный режим многолетнемерзлых горных пород в массиве и развале после взрывной подготовки, порядок отработки экскаваторного блока и показатели взрывных работ. Отличительной особенностью программы является возможность прогноза производительности драглайна на всех стадиях отработки взорванного блока в условиях изменения его температурного режима по глубине.

**Геомеханика и горная теплофизика.** В рамках линейной теории упругости выполнено математическое моделирование процесса деформирования многолетнемерзлого массива вокруг одиночных протяженных выработок круглого и квадратного сечения и определены критические размеры ореола оттаивания. Установлено, что появление оттаявшей зоны способствует уменьшению напряжений на контуре выработки, которые затем, по мере увеличения размера оттаявшей зоны, постепенно возрастают. Также установлено, что для условий, когда отношение предела прочности в талой зоне к пределу прочности в мерзлой зоне меньше, чем отношение соответствующих модулей упругости, существует критический размер ореола оттаивания, при котором выработка теряет устойчивость по критерию Кулона – Мора.

Разработан, физически обоснован и экспериментально подтвержден ряд новых нелокальных критериев разрушения, область применения которых распространяется на квазихрупкие материалы с развитой зоной предразрушения. Критерии содержат минимальное количество дополнительных констант и имеют вид, удобный для инженерных расчетов. Их применение позволяет не только оценивать прочность материалов и элементов конструкций, содержащих концентраторы напряжений, но и прогнозировать наступление катастрофических разрушений, связанных с вязко-хрупким переходом в материалах, включая геоматериалы и горные породы.

Экспериментальными исследованиями влияния знакопеременного температурного воздействия ( $+20 \div -20^\circ\text{C}$ ) на энергоемкость разрушения карбонатных горных пород различной степени засоления (NaCl) в нивальных условиях установлено, что максимальное снижение удельных энергозатрат на разрушение образцов доломита с пористостью 14 % трубки “Интернациональная” составляет 6 % после воздействия пяти циклов замораживания – оттаивания при концентрации раствора 0 % NaCl. С увеличением концентрации раствора степень влияния на энергоемкость разрушения циклов замораживания – оттаивания снижается, и при концентрации свыше 10 % воздействия 10 циклов замораживания – оттаивания воздействие не выявлено.

Разработаны рекомендации по обеспечению оптимального теплового режима пород уступа карьера криолитозоны (предотвращение их оттаивания), учитывающие изменение температурного поля в окружающем породном массиве в зависимости от климатических условий, теплофизические и фильтрационные свойств пород, уклон склона и высоту уступа, теплофизические свойства и геометрические параметры теплоизоляции, что позволит существенно повысить устойчивость уступа и, как следствие, безопасность открытых горных работ на протяжении всего периода отработки месторождения.

В области рудничной аэрогазодинамики методом математического моделирования установлено влияние продолжительности реверса главной вентиляторной установки в наиболее холодный период года на формирование температурного режима в вентиляционном стволе, бетонной крепи и вмещающем его массиве горных пород на примере алмазодобывающих рудников Якутии. Установлено, что при температуре атмосферного воздуха  $-45^\circ\text{C}$  и скоростях вентиляционного потока более 2 м/с через 24 ч после начала реверса происходит полное промерзание бетонной крепи. При скоростях воздушного потока до 10 м/с, толщина зоны мерзлых пород вокруг ствола не превысит 7 см. Через 48 ч после реверса максимальная глубина промерзания массива горных пород достигает 30 см. В устьевой части ствола при скорости вентиляци-

онного потока в стволе 5 м/с и температуре атмосферного воздуха  $-45^{\circ}\text{C}$  замерзание пород (что может вызвать их пучение и деформацию крепи) в демпферном слое толщиной 0.5 м происходит через 48 ч после начала реверса, а при толщине 1 м через 96 ч.

**Рудоподготовка, обогащение и переработка минерального и углеводородного сырья.** Экспериментальными исследованиями на лабораторной модели вертикального центробежного измельчителя ВЦИ-12 конструкции ИГДС СО РАН установлены рациональные рабочие параметры вертикальной мельницы (зазор между рабочими дисками — 3 мм, угол разгрузки — 150 град.), что позволило обеспечить управление процессом измельчения в режиме многократных динамических и истирающих воздействий (исключение выброса недоизмельченных частиц из рабочей зоны измельчения), а также задавать контролируемую крупность помола продуктов дезинтеграции. Разработан проект и рабочая документация на вертикальный центробежный измельчитель ВЦИ-12 с производительностью до 12 т/ч.

Разработана методика выбора и расчета режимных и конструктивных параметров на основе базового типоразмера пневмосепаратора с диаметром внешней стенки винтовой камеры — 500 мм, внутренней — 60 мм при количестве двух витков для различного технологического назначения, учитывающая фракционный состав, плотность минерального сырья и пустой породы, скорость воздушного потока для разделения минералов по их миграционной способности, что позволяет определить рациональные режимы и конструктивные параметры винтообразной рабочей камеры (шаг, углы наклона внутренней и внешней стенки, форма, параметры сечения) для эффективного разделения различных классов полезных минералов высокой и средней плотности (выше  $3.2 \text{ г/см}^3$ ) от пустой породы плотностью до  $2.7 \text{ г/см}^3$ .

Предложен способ получения высококачественных сорбентов из угольного сырья, основанный на совмещении химической и парогазовой активации и экспериментально установлены оптимальные параметры процесса получения сорбентов адсорбционной активностью по йоду выше 1000 мг/г. В частности, обработка угольного сырья должна производиться гидроксидом калия в соотношении 1 : 1 перед термическим воздействием при  $800^{\circ}\text{C}$  в режиме термоудара и последующей изотермической выдержкой в течение 60 мин с подачей парогазового реагента (250–300 мл/ч).

## **ВЫВОДЫ**

В условиях интенсивного освоения месторождений твердых полезных ископаемых Востока и Северо-Востока РФ, которые в основном расположены в зоне распространения многолетнемерзлых горных пород, удалены от перерабатывающих производств и потенциальных потребителей минерально-сырьевых ресурсов, требуется приложить максимальные усилия горной науки и практики в решение задач, максимально учитывающих геомеханические и геотехнологические особенности эксплуатации месторождений региона. Представленные новые результаты ученых института горного дела Севера ориентированы на модернизацию существующих и разработку новых эффективных, природоохранных геотехнологий и их отдельных элементов, методов и технических средств добычи, обогащения и глубокой переработки минерального сырья.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES**

1. <https://www.gks.ru/storage/mediabank/str3.xls>
2. **Ткач С. М.** Adaptation of geotechnologies to mineral mining conditions in permafrost, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2018, vol. 5, no. 1, pp. 116–121. [Ткач С. М. Актуальные проблемы адаптации геотехнологий к условиям разработки месторождений криолитозоны // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2018. — № 1. — Т. 5. — С. 116–121.]

3. **Yakovlev V. L., Kornilkov S. V., Rasskazov I. Y., and Tkach S. M.** Integrated subsoil use and territorial development in difficult natural environments and adverse climatic conditions, *Mining Journal*, 2019, no. 6, 2019, pp. 84–89. [Яковлев В. Л., Корнилков С. В., Рассказов И. Ю., Ткач С. М. О комплексном освоении недр и территорий в сложных природно-климатических условиях // Горный журнал. — 2019. — № 6. — С. 84–89.]
4. **Batugin S. A., Zubkov V. P., Novopashin M. D., and Tkach S. M.** Yakutia mineral-raw complex on the way to adaptation to conditions of radical changes, *Geotechnological problems of integrated subsoil development: Collection of scientific papers*, vol. 2, Yekaterinburg, GDI Uro RAN, 2004, pp. 71–86. [Батугин С. А., Зубков В. П., Новопашин М. Д., Ткач С. М. Минерально-сырьевой комплекс Якутии на пути адаптации к условиям кардинальных перемен // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр: сб. науч. тр. Вып. 2. — Екатеринбург: Изд-во ИГД УрО РАН, 2004. — С. 71–86.]
5. **Tkach S. M.** Geotechnological and geo-economic aspects of solid mineral development in permafrost, *Fundamental and Applied Mining Science*, 2019, vol. 6, no. 3, pp. 370–376. [Ткач С. М. Геотехнологические и геоэкономические аспекты освоения месторождений твердых полезных ископаемых криолитозоны // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 3. — С. 370–376.]
6. **Tkach S. M.** Chersky Institute of Mining of the North SB RAS 35 years of operation in the area of permafrost zone development, *Mining Journal*, 2015, no. 4, pp. 4–10. [Ткач С. М. 35 лет работы Института горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН в решении проблем освоения недр криолитозоны // Горный журнал. — 2015. — № 4. — С. 4–10.]
7. **Batugina N. S., Gavrillov V. L., and Tkach S. M.** Principles of resource-saving management of quality for coal supply to the hard-to-reach regions of the North-East of Russia, *Arctic and Subarctic Natural Resources*, 2019, no. 2, pp. 64–73. [Батугина Н. С., Гаврилов В. Л., Ткач С. М. Принципы ресурсосберегающего управления качеством при поставках угля в труднодоступные районы Северо-Востока // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2019. — № 2. — С. 64–73.]
8. **Fedorova L. L., Kulyandin G. A., Savvin D. V.** Geocryological analysis of rocks to predict adverse freeze-and-thaw effects, *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, no. 6, pp. 1023–1031. [Федорова Л. Л., Куляндин Г. А., Саввин Д. В. Исследования геокриологических параметров массива горных пород для прогнозирования развития негативных криогенных процессов // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 183–192.]
9. **Panishchev S. V., Alkova E. L., and Maksimov M. S.** Assessment of excavatability index of freezable blasted rock mass, *Journal of Mining Science*, 2019, no. 3, pp. 31–37. [Панишев С. В., Алькова Е. Л., Максимов М. С. К оценке показателя трудности экскавации смерзающегося взорванного массива горных // ФТПРПИ. — 2019. — № 3. — С. 31–37.]
10. **Burakov A. M.** Geotechnological preparation of the alluvial deposit by dredging, *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: IX All-russian Scientific Practical Conference*, Yakutsk, Publishing House of the SSF, 2019, vol. 2, pp. 238–241. [Бураков А. М. Геотехнологическая подготовка россыпного месторождения при дражном способе отработки // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: IX Всерос. науч.-практ. конф. — Якутск: Изд. дом СВФУ, 2019. — Т. 2. — С. 238–241.]
11. **Suknev S. V.** Nonlocal and gradient fracture criteria for quasi-brittle materials under compression, *Physical Mesomechanics*, 2019, vol. 22, no. 6, pp. 504–513.
12. **Suknev S. V.** Fracture of quasi-brittle geomaterial with a circular hole under non-uniformly distributed compression, *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019, vol. 60, no. 6, pp. 1115–1124.
13. **Zakharov E. V. and Kurilko A. S.** Change of specific surface of rocks under cyclic freezing-thawing // *Mining informational and analytical bulletin*, 2018, no. 12, pp. 31–38. [Захаров Е. В., Курилко А. С. Изменение удельной поверхности горных пород под влиянием циклов замораживания-оттаивания // ГИАБ. — 2018. — № 12. — С. 31–38.]
14. **Vorsina E. V., Moskalenko T. V., and Mikheev V. A.** Experimental study of sorbent production in gas-steam activation of Kharanor lignite, *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2019, no. 11, pp. 152–159. [Ворсина Е. В., Москаленко Т. В., Михеев В. А. Экспериментальные исследования процесса парогазовой активации харанорского бурого угля при получении сорбентов // ГИАБ. — 2019. — № 11. — С. 152–159.]