

геоинформационных систем, интегрирующих данные самого разного типа, полученных в ходе систем мониторинга, относится к прорывным технологиям по предотвращению природных и техногенных катастроф. В связи с этим хотелось бы подчеркнуть большую роль геоинформационных систем, разрабатываемых в Горном институте КНЦ РАН (С. В. Лукичёв и др.) и Кемеровском филиале Института вычислительных технологий СО РАН (В. П. Потапов и др.).

Монография является значительным вкладом в решение ключевых проблем обеспечения безопасного недропользования в России, отраженных в критической для РФ «Технологии

предупреждения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

В заключение следует отметить, что магистральный путь горных наук в долгосрочной стратегии их развития по научному обеспечению горного дела и общего недропользования не только в России, но и в мире, адекватно отражен в статье академика Н. Н. Мельникова с его коллегами — директорами академических институтов горного профиля РАН еще в 2007 г. [1]. Со временем сформулированные здесь проблемы становятся все более актуальными и требующими решения.

**Библиографический список**

1. Мельников Н. Н., Опарин В. Н., Новопашии М. Д., Яковлев В. Л., Мамаев Ю. А., Потапов В. П. О фундаментальных проблемах освоения месторождений полезных ископаемых России и основных направлениях развития горных наук // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды : сб. тр. конф. — Новосибирск : Изд-во ИГД СО РАН, 2007. Т. 1. С. 5–23.
2. Опарин В. Н., Козырев А. А., Панин В. И., Савченко С. Н., Каспарьян Э. В. и др. Деструкция земной коры и процессы самоорганизации в областях сильного техногенного воздействия. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. — 632 с.
3. Опарин В. Н., Багаев С. Н., Маловичко А. А., Яковлев В. Л., Еременко А. А. и др. Методы и системы сейсмодеформационного мониторинга техногенных землетрясений и горных ударов : в 2 т. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009.
4. Опарин В. Н., Журавков М. А., Потапов В. П., Каленицкий А. А., Еманов А. А. и др. Геомеханические поля и процессы: экспериментально-аналитические исследования формирования и развития очаговых зон катастрофических событий в горнотехнических и природных системах. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2018. Т. 1. — 549 с.; 2019. Т. 2. — 546 с.
5. Техногенная сейсмичность при горных работах: модели очагов, прогноз, профилактика : сб. тр. конф. / под ред. Н. Н. Мельникова. — Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2004. Ч. 1, 2. — 422 с.
6. Мельников Н. Н., Епимахов Ю. А., Абрамов Н. Н. Научные основы интенсификации возведения большепролетных подземных сооружений в скальном массиве. — Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2008. — 226 с.
7. Мельников Н. Н., Конухин В. П., Наумов В. А., Амосов П. В., Гусак С. А. и др. Научные и инженерные аспекты безопасного хранения и захоронения радиационно опасных материалов на европейском севере России. — Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2010. — 305 с.
8. Мельников Н. Н., Гусак С. А., Амосов П. В., Наумов В. А., Наумов А. В. и др. Исследования по обоснованию методологии создания подземных комплексов для размещения атомных станций малой мощности в условиях Арктики // Арктика. Экология и экономика. 2018. № 3(31). С. 123–136.
9. Мельников Н. Н., Амосов П. В., Климин С. Г., Новожилова Н. В. Экологические аспекты безопасности подземной атомной станции малой мощности в условиях Арктики. — Апатиты — Ярославль : ООО «Принтхаус-Ярославль», 2018. — 170 с.
10. Мельников Н. Н., Калашник А. И. Шельфовые нефтегазовые разработки: геомеханические аспекты. — Апатиты : Изд-во КНЦ РАН, 2009. — 140 с.
11. Адушкин В. В., Опарин В. Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия — к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // ФТПРПИ. 2012. № 2. Ч. I. С. 3–27; Там же. 2013. № 2. Ч. II. С. 3–46; Там же. 2014. № 4. Ч. III. С. 10–38; Там же. 2016. № 1. Ч. IV. С. 3–49. **ГЖ**

УДК 622.271.7:574

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ ОСВОЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ\*

**К. Н. ТРУБЕЦКОЙ**, главный научный сотрудник, академик РАН  
**В. Н. ЗАХАРОВ**, директор института, чл.-корр. РАН  
**Ю. П. ГАЛЧЕНКО**, ведущий научный сотрудник, проф., д-р техн. наук, schtrek33@mail.ru  
**Г. В. КАЛАБИН**, главный научный сотрудник, проф., д-р техн. наук

Институт проблем комплексного освоения недр  
 им. академика Н. В. Мельникова РАН, Москва, Россия

### Введение

Научное наследие академика Н. Н. Мельникова в полной мере отражает широкий диапазон интересов ученого и в той или иной мере охватывает почти весь круг вопросов, изучаемых горными науками.

Значительное место в его работах занимают крупномасштабные исследования в области подземного строительства специальных объектов государственного значения, а также хранения и захоронения радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива.

В память об академике РАН Николае Николаевиче Мельникове, творческое наследие которого связано с проблемами освоения минеральных ресурсов Субарктики, рассмотрены основополагающие позиции экологической стратегии освоения минеральных ресурсов криолитозоны нашей страны в части технологического обеспечения ее реализации. Показано, что основным направлением является создание и развитие природоподобных горных технологий, значение которых особенно велико при освоении минеральных ресурсов новых районов и территорий, которые в геологическом плане отождествляются с криолитозонной — мерзлой частью литосферы, характеризующейся отрицательной температурой горных пород, где климатическая составляющая является фактором, определяющим выбор и применение горных технологий. Выполненные в этом направлении исследования позволили впервые дать предметное определение понятия криогеоресурса литосферных блоков как возобновляемого источника энергии солнечного излучения, при котором энергетическую ценность имеет не само излучение, а его недостаток.

**Ключевые слова:** экологическая стратегия, горная технология, минеральные ресурсы, криолитозона, природоподобные технологии, методология, биосистемы, технические системы, криогеоресурс, геологическая и климатическая компоненты, методика определения.

**DOI:** 10.17580/gzh.2019.06.04

\* Выполнено в рамках гранта РФФИ «Ресурсы Арктики» (договор № 18-05-70019/18).

Большой научный интерес представляли его нестандартные идеи по использованию минеральных ресурсов Луны, в первую очередь изотопа гелия-3 – неисчерпаемого источника энергии, потенциала предприятий оборонного комплекса для развития горнодобывающего комплекса страны путем организации отечественного производства горного оборудования и тем самым решения проблемы импортозамещения.

Н. Н. Мельников считал одной из важнейших проблем негативные последствия крупномасштабного вторжения человека в биосферу в процессе освоения недр. Поэтому в Горном институте Кольского научного центра РАН серьезное развитие получили исследования, связанные с решением экологических проблем территорий размещения горнодобывающих предприятий Кольского полуострова. Он понимал, что сложную проблему не решить одними призывами и рассказами об устрашающих тенденциях ухудшения состояния окружающей среды; нужны новые подходы и в первую очередь технологического толка. В результате под его руководством была сформулирована Экологическая стратегия горнодобывающей отрасли, которая предусматривает создание инновационных технологий повышения эффективности добычи и переработки минерального сырья и снижения техногенной нагрузки за счет уменьшения объемов вскрыши на карьерах, сокращения отходов производства и повышения извлечения полезных компонентов, переработки техногенных месторождений и, наконец, восстановления нарушенных экосистем [1].

#### **Общеметодологические подходы**

Содержательная структура этой стратегии охватывает весь традиционный для современного состояния геозологии круг вопросов. При этом основное внимание сосредоточено на способах преодоления экологических последствий освоения недр в постэксплуатационный период. Это соответствовало мировым тенденциям [2–7] и действующим представлениям о недропользовании как междисциплинарной науке, разрабатывающей общие принципы и методы получения, сохранения и восстановления природных ресурсов. Особое место в этом ряду занимает горнодобывающая промышленность, предприятия которой извлекают невозобновляемые минеральные ресурсы из литосферы в количествах, соизмеримых с годовым приростом биомассы сухопутных экосистем, и скоростью роста объемов, опережающей темпы увеличения народонаселения Земли. При этом принято считать, что самое главное в рациональном недропользовании – это экономия ресурсов. Поэтому политика недропользования предполагает прежде всего снижение потерь при добыче, обогащении, транспортировании и переработке полезных ископаемых. Как следствие, в области изучения и освоения недр одним из основополагающих нормативных документов считается «Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых», в котором в качестве единого критерия оптимальности решения всех задач проблемы оптимального освоения недр используется только экономический показатель – максимальное значение прибыли по отработке запасов месторождений. В действующих и разрабатываемых документах по регламентации полноты и качества извлечения полезного

ископаемого при разработке месторождений, кроме упоминания термина «рациональное использование недр», конкретных задач по снижению негативного воздействия на окружающую среду не ставится.

Вместе с тем бурное развитие экологического кризиса современной цивилизации и беспрецедентное ускорение роста потребления минеральных ресурсов сделали необходимой корректировку самой парадигмы взаимодействия человека и природы в сторону замещения экономического императива экологическим.

Поэтому в обобщенном понятии «рациональное природопользование» отражено представление о комплексном освоении недр, обязательным элементом которого явилось требование о минимальных экологических последствиях при добыче полезных ископаемых [8].

Понимание этой необходимости и нашло свое отражение в организованных Н. Н. Мельниковым исследованиях по такому актуальному для горной промышленности научному направлению, как создание основ строительства глубоких карьеров нового поколения с вертикальными откосами. На базе разработанной концепции научно обоснован переход на циклично-поточную технологию ведения горных работ, обеспечивающую минимальные экологические последствия от хранения пород вскрыши в границах природных биомов за счет геофизически обоснованных максимальных углов наклона борта карьера [9]. Не развитием, а, скорее, параллельным откликом на удачно сформулированную позицию, которая имеет перспективу трансформации в новое научное направление, является опубликованная в 2003 г. работа ИПКОН РАН по обоснованию принципиально нового научного направления в геотехнологии – создание природоподобных горных технологий [10]. В отличие от принятых за рубежом подходов к данной проблеме, основанных на поисках путей копирования тех или иных процессов, существующих в живой природе [11, 12], предложенная в ИПКОН РАН методология основана на воспроизводстве в техносфере системных решений, обеспечивающих экологическую эффективность функционирования сложных биологических сообществ [13].

#### **Результаты исследований**

Выполненные в последние годы исследования показали, что только природоподобная функциональная структура горной технологии может снизить уровень неизбежного экологического ущерба до величины, обусловленной самим фактом техногенного изменения недр, при полном сохранении потенциала самовосстановления естественной сукцессии фитоценозов нарушенных природных экосистем [13].

В рамках этого нового научного направления развита общая теория создания природоподобных горных технологий и определены основные направления структурной и функциональной конвергенции горных и биологических наук при обновлении технологической парадигмы развития минерально-сырьевого комплекса. На стыке этих наук впервые обоснована и сформулирована концепция создания для условий разработки твердых полезных ископаемых конвергентных горных технологий, функциональная

структура которых построена с учетом принципов функционирования биологических систем на основе метода гомеостатического регулирования отношений между антагонистами путем управления противоречиями (рис. 1).

Из рисунка видно, что первые три принципа формирования природоподобной горной технологии создают новый облик экологически сбалансированной горнотехнической системы разработки месторождения. Четвертый и пятый принципы относятся к внутреннему развитию структуры более высокого иерархического уровня – природно-технической системы освоения недр. Они регламентируют взаимодействие составляющих эту систему компонентов в соответствии с требованиями концепции устойчивого развития и экологического императива.

Н. Н. Мельников понимал, что естественные науки эффективно развиваются в регионах, где в силу географического положения и геологических процессов размещены основные объекты исследований – месторождения полезных ископаемых и многочисленные горнодобывающие предприятия со своей спецификой горно-геологических и климатических условий. Поэтому в его научной и научно-организационной деятельности большое место занимали проблемы функционирования горнопромышленных центров именно в Мурманской области.

Эти исследования являются своеобразным предвидением безальтернативного смещения в средне- и долгосрочной перспективе центра тяжести развития минерально-сырьевого комплекса в труднодоступные и малоосвоенные регионы зоны многолетней мерзлоты, которая занимает почти 68 % территории нашей страны. В горнотехническом плане эта тенденция означает, что при комплексном освоении минеральных ресурсов в биологически неустойчивых экосистемах криолитозоны обязательным становится оптимальный баланс между стремлением получить максимум прибыли и необходимостью сохранения природного потенциала, обеспечивающего самовосстановление естественной биоты.

Конечно, наибольшие ожидаемые экологические и аварийные риски связаны с разработкой месторождений углеводородного сырья на континентальном шельфе и материке. Однако очевидная перспектива повышения роли криолитозоны в развитии минерально-сырьевого комплекса страны, в первую очередь твердых полезных ископаемых, требует сохранения ее уникальной и легкоранимой природы.

Это означает, что выбор принципиально новых направлений развития горных технологий, обеспечивающих рациональное

недропользование в части его экономической составляющей, ставится в зависимость не только от технико-экономических показателей, но и от возможности сохранения биологического разнообразия экосистем Арктики, а также и традиционных укладов жизни народов Севера. Поэтому решение проблемы по созданию научных основ детерминированного развития компонентов природно-технических систем освоения минеральных ресурсов литосферы с учетом ограничений экологического императива должно базироваться на применении природоподобных горных технологий.

При рассмотрении этой проблемы для условий разработки месторождений криолитозоны в качестве вынужденных «антагонистов» выступают биота арктических экосистем и техническая система по извлечению из литосферы необходимого минерального сырья, которые путем применения гомеостатических механизмов управления противоречиями объединяются в единую природно-техническую систему освоения недр.

Важнейшим фактором, оказывающим влияние на принятие технологических решений и формирование поверхностного комплекса при строительстве и эксплуатации добывающего предприятия в зоне многолетней мерзлоты, является крайне ограниченная возможность самовосстановления биогеоценозов нарушаемых экосистем вследствие их низкой продуктивности и устойчивости. В этих условиях, когда негативное влияние геотехнологии не может быть скомпенсировано запасом устойчивости нарушаемой биоты, функциональная структура горной технологии должна обеспечивать минимизацию размеров зон полного поражения естественной биоты с сохранением для зоны дистанционного техногенного поражения требований по ограничению уровня воздействия диапазоном толерантности видов-эдификаторов фитоценоза естественной биоты.

При наличии подобных ограничений одним из наиболее эффективных путей получения необходимых результатов является использование возобновляемых природных источников энергии (см. рис. 1). Возможности использования таких источников рассматривали ранее на уровне решения локальных задач при подземной разработке рудных и особенно россыпных месторождений в криолитозоне [14]. Однако значимость этой проблемы при комплексном освоении недр была впервые системно рассмотрена в работах ИПКОН РАН [15].

Одним из определяющих требований при использовании возобновляемой энергии криолитозоны является сохранение температурного поля многолетней мерзлоты при масштабном

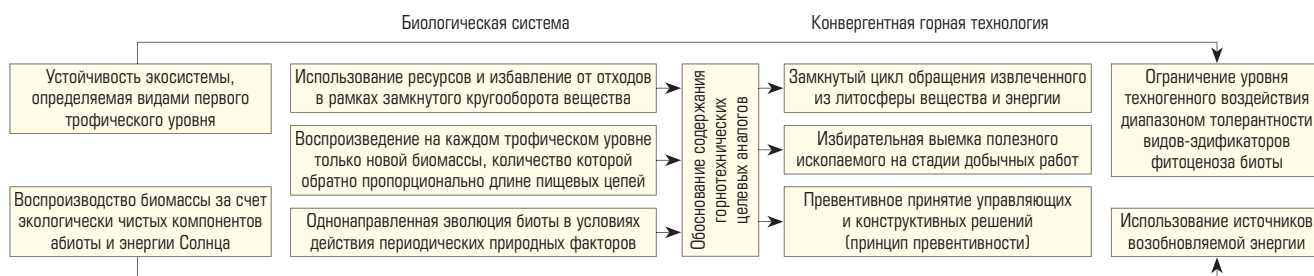


Рис. 1. Биотехнологические принципы создания конвергентных горных технологий разработки рудных месторождений

изменении условий теплообмена с атмосферой в процессе ведения горных работ. Выполненные в этом направлении исследования позволили впервые дать предметное определение понятия криогеоресурса литосферных блоков как возобновляемого источника энергии солнечного излучения, при котором энергетическую ценность имеет не само излучение, а его недостаток.

В энергетическом плане этот ресурс представляет собой интегральное единство двух контактирующих элементов: энергии текущих сезонных минимумов солнечной радиации в виде периода отрицательных температур наружного воздуха и энергии низких среднегодовых температур прошлых периодов в виде постоянной отрицательной температуры многолетнемерзлых массивов.

В технологическом отношении под криогеоресурсом понимается количественная мера дополнительной устойчивости вмещающих пород и новых возможностей выполнения определенных технологических процессов в рамках применяемой при разработке месторождения горной технологии, основанных на использовании замерзшей воды при релаксации выработанного пространства литосферы посредством воссоздания в нем искусственного льдопородного массива из отходов горно-обогатительного передела.

Геологическая предопределенность географического положения каждого месторождения позволяет представить геосферную структуру этого ресурса в виде двух составляющих: изменяющегося во времени климатического ресурса атмосферы, определяемого годовыми колебаниями температуры наружного воздуха (рис. 2, 3) и постоянного для данного месторождения геологического ресурса, пропорционального температуре многолетнемерзлого горного массива в пределах обрабатываемого участка литосферы.

При разработке месторождений известное уравнение сохранения энергии применяется для некоторого отрезка времени  $t$ , кратного продолжительности технологического цикла. Тогда закон сохранения энергии выразится уравнением

$$\int_{t_1}^{t_2} dt \int_S q_n dS = \int_{t_1}^{t_2} dt \int_V \frac{\partial q}{\partial t} dV,$$

где  $q_n$  – тепловой поток по нормали через поверхность  $S$ , ограничивающую объем  $V$ .

При расчете региональной части общего криогеоресурса логично определить его климатическую  $P_K$  и геологическую  $P_G$  составляющие, Дж/м<sup>3</sup>:  $P_K = c_v \rho_v T_v$ ;  $P_G = c_n \rho_n T_n$ , где  $c_v$  и  $c_n$ ;  $\rho_v$  и  $\rho_n$ ;  $T_v$  и  $T_n$  – теплоемкость, плотность и температура воздуха и горных пород соответственно.

Величина геологической составляющей для каждого конкретного месторождения, когда температура вмещающей толщи в пределах обрабатываемого участка может считаться постоянной, полностью зависит от геологического строения и свойств массива горных пород (рис. 4).

Наиболее существенным фактором, влияющим на величину геологической составляющей криогеоресурса, можно считать льдистость породного массива. Это свойство принято измерять коэффициентом льдистости  $K_{лд}$ , который определяется как отношение объема льда  $V_{л}$  в массиве к объему горной породы  $V_n$ :

$$K_{лд} = V_{л}/V_n.$$

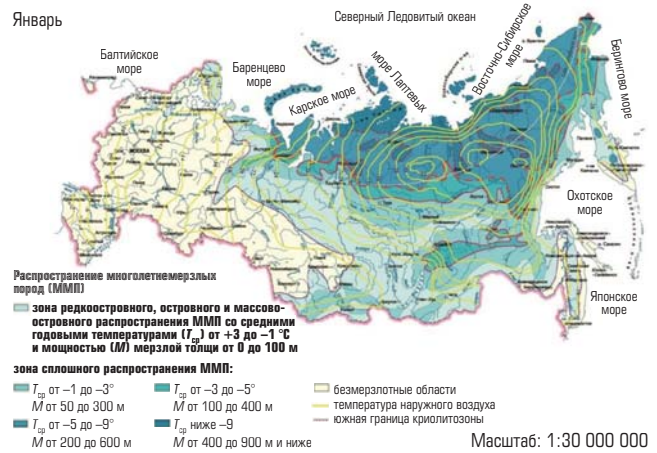


Рис. 2. Климатическая составляющая криогеоресурса

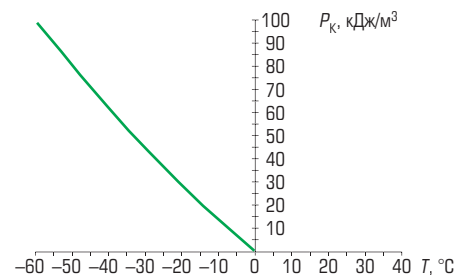


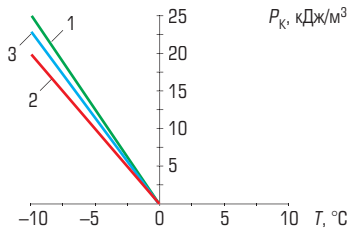
Рис. 3. Зависимость климатической составляющей криогеоресурса  $P_K$  от температуры воздуха  $T$



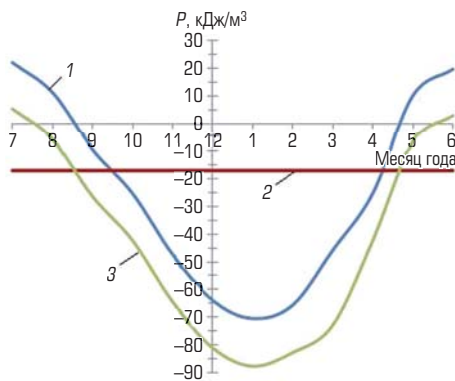
Рис. 4. Геологическая компонента криогеоресурса

При объеме льда более 40 % общего объема породы массив считается льдистым. Размеры ледяных прослоек в мерзлых породах изменяются в довольно широком диапазоне. При толщине ледяных прослоек менее 0,5 м лед рассматривается как включение, т. е. как компонент мерзлой полиминеральной горной породы [14]. В этом случае лед является текстурообразующим. При значительных размерах прослоек льда (линзах, пластах) массив рассматривается как льдопородный (рис. 5).

С учетом этой особенности строения многолетнемерзлых массивов величина геологической составляющей криогеоресурса определяется из выражения:



**Рис. 5. Зависимость геологической составляющей криогеоресурса  $P_g$  от температуры многолетней мерзлоты и плотности горной породы  $\rho_p$ , не содержащей внутрипородных льдов: 1, 2, 3 –  $\rho_p$  равно 3; 2,7 и 2,4 соответственно**



**Рис. 6. Распределение криогеоресурса Кючусского жильного месторождения в течение года:**

1 – климатическая составляющая; 2 – геологическая составляющая; 3 – интегральная величина

$$P_g = \frac{(c_n + c_l K_{лд})(\rho_n + \rho_l K_{лд})}{k(1 + K_{лд})^2} T,$$

где  $c_n$  и  $\rho_n$  – теплоемкость и плотность подземных льдов различного строения соответственно.

Общий региональный криогеоресурс месторождения определяется путем интегрального соединения его климатической и геологической составляющих для региона его размещения и геологического строения (рис. 6).

В целом предлагаемая дополнительная характеристика условий разработки месторождения позволит прогнозировать возможность и целесообразность применения геотехнологий, использующих криогеоресурс для решения тех или иных задач. При этом не трудно представить себе такую аналогичную по значению дополнительную характеристику применяемой геотехнологии, как удельная криоёмкость технологии  $P_T$ , Дж/м<sup>3</sup>:

$$P_T = c_T \rho_T \Delta T_T,$$

где  $c_T$  – удельная теплоемкость вещества, использованного при криогенной технологии;  $\rho_T$  – плотность этого вещества;  $\Delta T_T$  – диапазон изменения температуры вещества в процессе применения криогенной технологии.

Сопоставив эту характеристику предполагаемой геотехнологии с общей величиной криогеоресурса региона, можно принять оптимальные технические решения по выбору горной технологии

или ее элементов, а также оценить область возможного применения.

Возможность использования криогеоресурса на практике в каждом конкретном случае определяется видом полезного ископаемого и геологическим типом месторождения, а также его положением относительно магистральных транспортных путей в регионах [16, 17]. Основным экологический эффект при этом выражается в предотвращении распространения биомы арктических пустынь в виде техногенных новообразований для складирования твердых отходов в другие биомы Арктики.

### Заключение

Ценность научного наследия академика Н. Н. Мельникова определяется не только его завершенными теоретическими, экспериментальными и конструкторскими разработками в области хранения и захоронения радиоактивных отходов, освоения рудных месторождений Субарктики и экологии горного производства, но и предвидением целого ряда перспективных направлений развития геотехнологии. Одним из таких направлений является создание и развитие природоподобных горных технологий, значение которых особенно велико и применительно к освоению минеральных ресурсов новых районов и территорий, которые в геологическом плане отождествляются с криолитозонной – мерзлой частью литосферы, характеризующейся отрицательной температурой горных пород, где климатическая составляющая является фактором, определяющим выбор и применение горных технологий.


С одной стороны, этот фактор осложняет общие условия освоения месторождений, включая условия жизни и работы человека, а с другой – отрицательные температуры массива горных пород повышают его устойчивость и упрощают решение технологических вопросов. Отрицательные температуры также можно рассматривать как дополнительный природный ресурс, открывающий возможности для создания новых, более безопасных, эффективных и экологичных геотехнологий подземного освоения рудных месторождений.

Выполненные в этом направлении исследования позволили впервые дать предметное определение понятия криогеоресурса литосферных блоков как возобновляемого источника энергии солнечного излучения, при котором энергетическую ценность имеет не само излучение, а его недостаток.

В технологическом отношении под криогеоресурсом понимается количественная мера дополнительной устойчивости вмещающих пород и новых возможностей выполнения определенных технологических процессов в рамках применяемой при разработке месторождения горной технологии, основанных на использовании замерзшей воды при релаксации выработанного пространства литосферы посредством воссоздания в нем искусственного льдопородного массива из отходов горно-обогатительного передела. Впервые, исходя из закона сохранения энергии, получены аналитические зависимости для расчета концентраций тепловой энергии в региональной части общего криогеоресурса  $P_o$ , который интегрально объединяет в себе климатическую  $P_k$  и геологическую  $P_g$  составляющие.

Библиографический список

1. Мельников Н. Н. Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли – формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов : сб. докл. Всероссийской науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов. – Апатиты – СПб. : Реноме, 2014. С. 9–26.
2. Castilla-Gómez J., Herrera-Herbert J. Environmental analysis of mining operations: Dynamic tools for impact assessment // *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 76. P. 87–96.
3. Naeth M. A., Wilkinson S. R. Establishment of Restoration Trajectories for Upland Tundra Communities on Diamond Mine Wastes in the Canadian Arctic // *Restoration Ecology*. 2014. Vol. 22. No. 4. P. 534–543.
4. Freytag K., Pulz K. The New Federal Nature Conservation Act from the perspective of mining projects // *World of Mining – Surface & Underground*. 2010. Vol. 62(4). P. 214–221.
5. Perti R., Stein W., Dahmen D., Buschhüt K. Sustainable follow-up use of recultivated surfaces // *World of Mining – Surface & Underground*. 2013. Vol. 65(2). P. 92–101.
6. Wellmer F.-W., Becker-Platen J. Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: a review // *International Journal of Earth Sciences*. 2002. Vol. 91. Iss. 5. P. 723–745.
7. Sala S., Ciuffo B., Nijkamp P. A systemic framework for sustainability assessment // *Ecological Economics*. 2015. Vol. 119. P. 314–325.
8. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / под ред. К. Н. Трубецкого. – М. : Изд-во АГН, 1997. – 478 с.

9. Мельников Н. Н. Открытые горные работы – глубокие карьеры // Глубокие карьеры : сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Апатиты, 2012. С. 13–18.
10. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Бурцев Л. И. Экологические проблемы освоения недр при устойчивом развитии природы и общества. – М. : Научтехлитиздат, 2003. – 261 с.
11. Reddy P. D., Iyer S., Sasikumar M. FATHOM: TEL environment to develop divergent and convergent thinking skills in software design // *Proceedings of the 17th International Conference on Advanced Learning Technologies*. – Timisoara, 2017. P. 414–418.
12. Rumana Pathan, Ulfa Khwaja, Deepti Reddy, Venkatesh V. Teaching and Learning of Divergent & Convergent Thinking Skills using DCT // *Proceedings of the 8th International Conference on Technology for Education*. – Mumbai, 2016. P. 54–61.
13. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П. Геоэкология освоения недр Земли и экогеотехнологии разработки месторождений. – М. : Научтехлитиздат, 2015. – 359 с.
14. Ельчанинов Е. А. Проблемы управления термодинамическими процессами в зоне влияния горных работ. – М. : Наука, 1989. – 236 с.
15. Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В. Возобновляемые источники энергии как георесурс в системе техногенного преобразования недр // *Горный журнал*. 2015. № 9. С. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.16
16. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2016 и 2017 годах : Государственный доклад. – М. : ООО «Минерал-Инфо», 2018. – 370 с.
17. Научно-технические проблемы освоения Арктики / под ред. Н. П. Лаверова, В. И. Васильева, А. А. Макошко. – М. : Наука, 2015. – 490 с. 

«GORNYI ZHURNAL», 2019, № 6, pp. 39–44  
DOI: 10.17580/gzh.2019.06.04

Technological backup for ecological strategy of mineral mining in the permafrost zone

Information about authors

**K. N. Trubetsky**<sup>1</sup>, Chief Researcher, Academician of the Russian Academy of Sciences  
**V. N. Zakharov**<sup>1</sup>, Director, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences  
**Yu. P. Galchenko**<sup>1</sup>, Leading Researcher, Professor, Doctor of Engineering Sciences, schtrek33@mail.ru  
**G. V. Kalabin**<sup>1</sup>, Chief Researcher, Professor, Doctor of Engineering Sciences

<sup>1</sup>Melnikov Research Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Reserves, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract

Academician Melnikov's creative innovative heritage is the accomplished theoretical and experimental R&D projects in the fields of radioactive waste storage, subarctic mineral mining and mining ecology. Melnikov had denoted a variety of promising trends in advancement in geotechnology. One of such trends is naturelike mining technologies which are of primary concern in development of mineral resources in new areas which are geologically identified as permafrost, i.e. frozen part of lithosphere, featuring negative temperature of rock mass. The climate in such areas is a governing factor in selection and use of mining technologies.

On the one hand, this factor complicates general conditions of mining, including life and work of human beings; on the other hand, negative temperature improves stability of rocks and facilitates handling of technological problems. Furthermore, subzero temperatures can be assumed an additional natural source for creation of new, more secure, efficient and ecology-friendly technologies of underground ore mining.

The related research has for the first time provided an ostensive definition for cryo-georesource of lithosphere as a renewable source of solar energy taken not from the solar emission but from its deficiency.

Technologically, a cryo-georesource is a quantitative measure of extra rock mass stability and new capabilities of mining technologies based on the use of frozen water for relaxation of mined-out voids by means of frozen backfill prepared from frost-bound mining and processing waste. On the strength of the energy conservation law, analytical relations are for the first time obtained for calculating heat energy concentration in the regional part of the general cryo-georesource, integrating the climate and geology components.

The study was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Arctic Resources Grant No. 18–05–70019/18.

(To the memory of Academician N. N. Melnikov. Development of mineral resources and the Arctic).

**Keywords:** ecological strategy, mining technology, mineral resources, permafrost zone, nature-like technologies, methodology, biosystems, technical systems, cryo-georesource, climate and geology components, determination procedure.

References

1. Melnikov N. N. Ecological strategy of development in the mining industry. *Ecological Strategy of Mining Industry – New Outlook on Resource Development : Proceedings of the All-Russian Scientific-Technical Conference with International Participation*. Apatity – Saint-Petersburg : Renome, 2014. pp. 9–26.
2. Castilla-Gómez J., Herrera-Herbert J. Environmental analysis of mining operations: Dynamic tools for impact assessment. *Minerals Engineering*. 2015. Vol. 76. pp. 87–96.
3. Naeth M. A., Wilkinson S. R. Establishment of Restoration Trajectories for Upland Tundra Communities on Diamond Mine Wastes in the Canadian Arctic. *Restoration Ecology*. 2014. Vol. 22, No. 4. pp. 534–543.
4. Freytag K., Pulz K. The New Federal Nature Conservation Act from the perspective of mining projects. *World of Mining – Surface & Underground*. 2010. Vol. 62(4). pp. 214–221.
5. Perti R., Stein W., Dahmen D., Buschhüt K. Sustainable follow-up use of recultivated surfaces. *World of Mining – Surface & Underground*. 2013. Vol. 65(2). pp. 92–101.
6. Wellmer F.-W., Becker-Platen J. Sustainable development and the exploitation of mineral and energy resources: a review. *International Journal of Earth Sciences*. 2002. Vol. 91, Iss. 5. pp. 723–745.
7. Sala S., Ciuffo B., Nijkamp P. A systemic framework for sustainability assessment. *Ecological Economics*. 2015. Vol. 119. pp. 314–325.
8. Trubetsky K. N. (Ed.). Mining sciences. Development and conservation of mineral resources of the Earth. Moscow : Izdatelstvo AGN, 1997. 478 p.
9. Melnikov N. N. Open pit mining – deep pits. *Deep Surface Mines : Proceedings of All-Russian Scientific-Technical Conference with International Participation*. Apatity, 2012. pp. 13–18.
10. Trubetsky K. N., Galchenko Yu. P., Burtsev L. I. Ecological problems of soils' mastering with sustainable development of nature and society. Moscow : Nauchtekhlitizdat, 2003. 261 p.
11. Reddy P. D., Iyer S., Sasikumar M. FATHOM: TEL environment to develop divergent and convergent thinking skills in software design. *Proceedings of the 17th International Conference on Advanced Learning Technologies*. Timisoara, 2017. pp. 414–418.
12. Rumana Pathan, Ulfa Khwaja, Deepti Reddy, Venkatesh V. Teaching and Learning of Divergent & Convergent Thinking Skills using DCT. *Proceedings of the 8th International Conference on Technology for Education*. Mumbai, 2016. pp. 54–61.
13. Trubetsky K. N., Galchenko Yu. P. Earth soils mastering geocology and deposit mining ecogeotechnologies. Moscow : Nauchtekhlitizdat, 2015. 359 p.
14. Elchaninov E. A. Problems of geodynamic control in the influence zone of mining. Moscow : Nauka, 1989. 236 p.
15. Kaplunov D. R., Rylnikova M. V. Renewable energy sources as a georesource in the system of technology-induced transformation in the Earth's interior. *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 9. pp. 72–75. DOI: 10.17580/gzh.2015.09.16
16. About the state and use of mineral resources of Russian Federation in 2016 and 2017 : state report. Moscow : Mineral-Info, 2018. 370 p.
17. Laverov N. P., Vasileva V. I., Makosko A. A. (Eds.). Scientific and technological challenges in the Arctic development. Moscow : Nauka, 2015. 490 p.