

Геотехнологическая парадигма развития комплексного освоения недр в Арктической зоне России

К. Н. Трубецкой¹, академик,

Ю. П. Галченко², доктор технических наук,

Г. В. Калабин³, доктор технических наук,

А. Н. Прошляков⁴

ФГБУН Институт проблем комплексного освоения недр РАН

Освоение пространства и минеральных ресурсов Арктики в условиях ограничений экологического императива связано с острой необходимостью продвижения принципиально новых идей как в области комплексного освоения недр этого региона, так и в сфере развития инновационных геотехнологий разработки месторождений различных видов минерального сырья. В статье раскрыта методологическая сторона проблемы. Конкретные технологические решения находятся в процессе актуализации в соответствии с требованиями горно-геологических условий конкретных коренных и части россыпных месторождений в криолитозоне России.

Ключевые слова: криолитозона, арктические биомы, трансграничные переносы, рудные месторождения, техногенно измененные недр, биогенные принципы, экогеотехнологии, избирательная выемка, температурный ресурс, криогенная утилизация отходов, экологический эффект.

Введение

Очевидная перспектива повышения роли Арктики в развитии минерально-сырьевого комплекса страны и не менее очевидная необходимость сохранения ее уникальной природы диктуют необходимость создания и применения геотехнологий, удовлетворяющих двум условиям:

- высокие экономические показатели, соответствующие требованиям рынка;
- минимальное нарушение окружающей среды в границах уровня толерантности малопродуктивных и неустойчивых экосистем криолитозоны.

При рассмотрении проблем комплексного освоения минеральных ресурсов недр Арктики главным природным фактором при обосновании и выборе геотехнологий является отрицательная темпера-

тура горных пород в пределах разрабатываемых участков литосферы.

Именно по этому признаку при определении долгосрочных перспектив развития новых геотехнологий разработки рудных месторождений в состав Арктической зоны как географического понятия были включены территории криолитозоны со сплошным распространением многолетнемерзлых пород (рис. 1).

Многолетняя доминанта экстенсивных методов природопользования при освоении минеральных ресурсов литосферы привела к тому, что наиболее доступные по положению и геологическому строению месторождения полезных ископаемых всегда отрабатывались опережающими темпами. В результате сегодня основные перспективы развития минерально-сырьевого комплекса во все большей степени связываются с малоосвоенными и труднодоступными регионами Арктики и криолитозоны, где в силу общеизвестных зональных особенностей жизненной стратегии и динамики популяций биоты

¹ e-mail: krasavin_08@mail.ru.

² e-mail: schtrek33@mail.ru.

³ e-mail: kalabin.g@gmail.com.

⁴ e-mail: prosh2000@mail.ru.



Рис. 1. Криолитозона России

экстенсивная форма развития ресурсопотребления экологически абсолютно недопустима.

Факторы, влияющие на выбор геотехнологий подземной разработки рудных месторождений в условиях криолитозоны

Общая методология выхода из этого положения в области развития минерально-сырьевого комплекса как минеральной и энергетической основы современной цивилизации представляет собой двухуровневую систему подходов и действий.

На первом уровне глобальное антагонистическое противоречие между техно- и биосферой трансформируется в цепь локальных противоречий между единичными добывающими предприятиями и конкретными экосистемами, в границах которых они функционируют.

На втором уровне в условиях определенности свойств всех элементов рассматриваемой природно-технической системы освоения недр каждое из локальных противоречий, в свою очередь, преодолевается путем целенаправленного создания и применения экогеотехнологий, внешнее воздействие которых регламентировано условиями сохранения биоты нарушенных горными предприятиями экосистем [8].

Освоение минеральных ресурсов криолитозоны характеризуется целым рядом геологических, биологических и географических особенностей, требующих зачастую поиска нестандартных технологических, экологических и экономических решений.

Среди этих особенностей наиболее существенны следующие:

- расположение месторождений в регионах с неразвитой инфраструктурой;
 - разобщенность месторождений и удаленность их от основных транспортных магистралей;
 - низкий потенциал самовосстановления биоты малопродуктивных и неустойчивых экосистем криолитозоны;
 - суровый климат с длительным периодом отрицательных температур;
 - отрицательная температура массива горных пород.
- Структурную основу природной составляющей природно-технических систем разработки месторождений в криолитозоне составляют три основных типа фитоценозов [9]:
- тундра (включая высокогорную);
 - лесотундра;
 - темнохвойная тайга.

В зоне тундры принято различать три подзоны: на севере — арктическую тундру, южнее — типичную тундру и, наконец, кустарниковую тундру. Все тундровые биоты достаточно близки между собой. Здесь полностью отсутствует древесная растительность, а основу фитоценозов кроме мхов и лишайников составляют низкорослые психрофитные и криофитные формы цветковых растений, в том числе карликовые кустарнички и многолетние травы.

Видовое разнообразие биоты тундровых экосистем, как правило, структурировано в виде

доминирующих по площади микрогруппировок и группировок сопутствующих, распределение и размеры которых определяются температурным режимом многолетнемерзлой толщи пород, выраженным через глубину протаивания приповерхностной кор-необитаемой зоны.

Таежная (бореальная) зона располагается на севере умеренного пояса и занимает почти всю территорию той части криолитозоны, которая по условиям разработки месторождений может быть отнесена к Арктической зоне. Типичным проявлением таежного типа растительности является темнохвойная тайга, которая отличается олигодоминантностью древостоя и крайней бедностью видового состава таежной флоры, развивающейся под пологом леса.

Лесотундра по структуре фитоценоза занимает промежуточное положение, сочетая в себе как участки, занятые растительным сообществом тундры, так и участки с таежной растительностью с очевидными признаками угнетения [9].

Техногенное воздействие при работе добывающего предприятия вызывает угнетение и выпадение наиболее чувствительных видов, что нарушает структурное разнообразие экосистем, видоизменяя комбинации видов, приспособленных к самоподдержанию в устойчивых сообществах.

Известно, что условия самовосстановления биоты экосистем сохраняются при формировании структуры поверхностного комплекса по принципу равенства реального и критического индексов плотности экотонов [8; 9]:

$$\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{S_0 - S_i} = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{(1-b)S_0},$$

где l_i — протяженность границ участков техногенного разрушения биоты (земельных отводов); S_i — площадь единичного техногенного объекта, ограниченная l_i ; S_0 и b — соответственно общая площадь природно-территориального комплекса и допустимая по условиям самовосстановления доля изъятия площади его биоты.

Чем ниже устойчивость и продуктивность биоты, тем меньше величина коэффициента b . Это означает, что при освоении месторождений структура общего земельного отвода под поверхностный комплекс предприятия должна формироваться из максимального возможного числа экологических объектов, каждый из которых представляет собой группу технологических инфраструктурных элементов, объединенную по условиям их пространственного взаимодействия. Причем размер каждого экологического объекта и удаление их друг от друга должны быть соизмеримы с расстоянием естественного переноса семян видов-эпифитов [11].

Наиболее значимым экологическим фактором горного производства является отторжение

значительных по площади участков естественной биоты под хранилища твердых отходов в виде породных отвалов рудников и хвостохранилищ обогатительных фабрик. Естественная биологическая реабилитация этих площадей в криолитозоне практически невозможна, поэтому перспективы частичного или полного устранения этого вида техногенного воздействия на экосистемы Арктики требуют кардинального изменения геотехнологии разработки месторождений в направлении поиска решений, обеспечивающих замкнутый цикл обращения извлекаемого вещества литосферы.

По этим же причинам становится очевидным приоритет максимального развития вахтового метода разработки месторождений, который позволит снизить отторгаемые для селитебных целей площади естественной биоты почти наполовину. Но возможности использования этого метода напрямую зависят от численности персонала, а следовательно, от производительности применяемых технологий добычи руды.

Негативные экологические последствия связаны с необходимостью заготовки лесоматериалов. Средняя величина их удельного расхода с учетом доли в общей добыче различных вариантов систем колеблется от 0,03 до 0,1 м³/т.

Необходимость транспортирования крепежного леса на отдаленные и разрозненные предприятия снижает также и экономические показатели производства. Поэтому очевидно, что проблемы управления горным давлением при разработке месторождений в криолитозоне целесообразно решать методами, позволяющими минимизировать расход крепежного леса и объемы его доставки из других регионов.

Горные работы обычно сопровождаются интенсивным пылеобразованием и выбросами пыли в окружающую среду при проветривании выработок. Зона покрытия земной поверхности пылевыми выбросами обычно в десятки раз превышает размеры промплощадок рудников. Значение этого экологического фактора при освоении месторождений в криолитозоне многократно возрастает вследствие наличия мощных потоков трансграничного переноса пассивных загрязнений [5].

Обобщая все сказанное, можно сформулировать следующие требования к применяемой в условиях криолитозоны геотехнологии подземной разработки рудных месторождений:

- замкнутый цикл обращения добытого из литосферы твердого вещества с возвращением его невос-требованной части в выработанное пространство;
- управление горным давлением методами, исключая массовое применение лесоматериалов и обрушение налегающей толщи горных пород и позволяющими минимизировать объемы материалов, доставляемых из других регионов;
- высокая производительность добычных работ, дающая возможность снизить численность персонала

- до величины, позволяющей повсеместно перейти на вахтовый метод освоения месторождений;
- максимальная локализация технологической пыли в подземном пространстве;
- структура и размеры земельных отводов при строительстве добывающих предприятий, обеспечивающие возможность естественного самовосстановления биоты нарушаемых экосистем.

Геофизическое обоснование принципов построения новых геотехнологий

Литосферная компонента природной составляющей в условиях криолитозоны характеризуется определяющим влиянием масштаба месторождения на экологические последствия его разработки. Здесь можно выделить три варианта геологического строения эксплуатируемых коренных месторождений:

- обширные мощные залежи на глубинах от нескольких десятков до первых тысяч метров (Норильск, Кураны, Нерюнгри и т. д.);
- комплекс вертикальных трубообразных рудных образований, локализованный на ограниченной территории (Якутская алмазоносная провинция);
- маломасштабные жильные месторождения руд цветных, редких и драгоценных металлов, расчлененные практически по всей территории, занятой многолетней мерзлотой (вся территория криолитозоны).

В первых двух случаях экологические проблемы освоения запасов полезного ископаемого связаны с формированием достаточно крупных по площади зон техногенного поражения биоты. В третьем случае имеет место формирование множественных очагов техногенного поражения биоты природных экосистем на всей территории Арктической зоны.

Антропогенное вторжение в литосферу Земли с целью извлечения полезных ископаемых кардинально изменяет состояние огромных ее участков. Образуется новый литосферный объект — техногенно измененные недра. Он может быть представлен как некий объем, окруженный нетронутой литосферой. Внутри этого объема находятся зона техногенного разрушения, зона изменения геомеханического состояния пород литосферы (геофизический экотон), спровоцированного этим разрушением, а также зона техногенного нарушения подземных водоносных горизонтов [4].

Способы и закономерности формирования техногенно измененных недр не только определяют количественные, качественные и экономические показатели разработки месторождений, но и порождают детерминированный ряд геоэкологических последствий, затрагивающих состояние всех геосфер нашей планеты: литосферы, гидросферы, атмосферы, а также биосферы и антропосферы.

Согласно современным представлениям о литосфере как сплошной среде с разномасштабными неоднородностями избыточные напряжения (или их эквивалент — неупругие напряжения) на этих

неоднородностях возникают лишь при конечной скорости деформирования твердого тела и со временем самопроизвольно релаксируют [6; 7]. Уравнение для этих напряжений на неоднородностях может быть представлено, например, в следующем виде [6]:

$$\frac{d\Delta\sigma_L}{dt} = \rho c^2 \varepsilon - v \frac{\Delta\sigma_L}{L},$$

где $\Delta\sigma_L$ — избыточное напряжение на неоднородности, размером L ; c — скорость упругих волн (поперечных); ρ — плотность твердого тела; v — константа, отражающая скорость релаксации напряжений; ε — скорость деформации сдвига в твердом теле.

Главный вывод из этого уравнения состоит в том, что скорость релаксации напряжений на неоднородности прямо пропорциональна величине напряжений и обратно пропорциональна размеру неоднородности. Не уточняя пока определения избыточного напряжения, рассмотрим его изменение во времени при деформировании какого-то объема литосферы. Интеграл приведенного выше уравнения при постоянной скорости деформации начиная с момента $t = 0$ рассчитывается по формуле

$$\Delta\sigma_L = \rho c^2 \varepsilon \frac{L}{v} \left(1 - e^{-\frac{vt}{L}} \right).$$

В начальные моменты времени ($t \ll L/v$) напряжения на неоднородностях нарастают со временем по линейному закону:

$$\Delta\sigma_L = \rho c^2 \varepsilon \frac{L}{v} \left(1 - 1 + \frac{vt}{L} \right) = \rho c^2 \varepsilon t.$$

В дальнейшем рост напряжений замедляется, и на неоднородности каждого размера устанавливается свое напряжение:

$$\Delta\sigma_L = \rho c^2 \varepsilon \frac{L}{v}.$$

Чем больше размер неоднородности, тем выше напряжение на ней при заданной скорости деформации и тем меньше скорость релаксационных процессов. Если тело бесконечно велико (в нашем случае это участок литосферы, вмещающий месторождение), то размер неоднородности L_0 , на которой концентрируется напряжение, равное предельному для данного типа пород σ , определяется соотношением

$$L_0 = \frac{\sigma v}{\rho c^2 \varepsilon}.$$

Применительно к проблемам подземной разработки месторождений, которая по сути есть не что

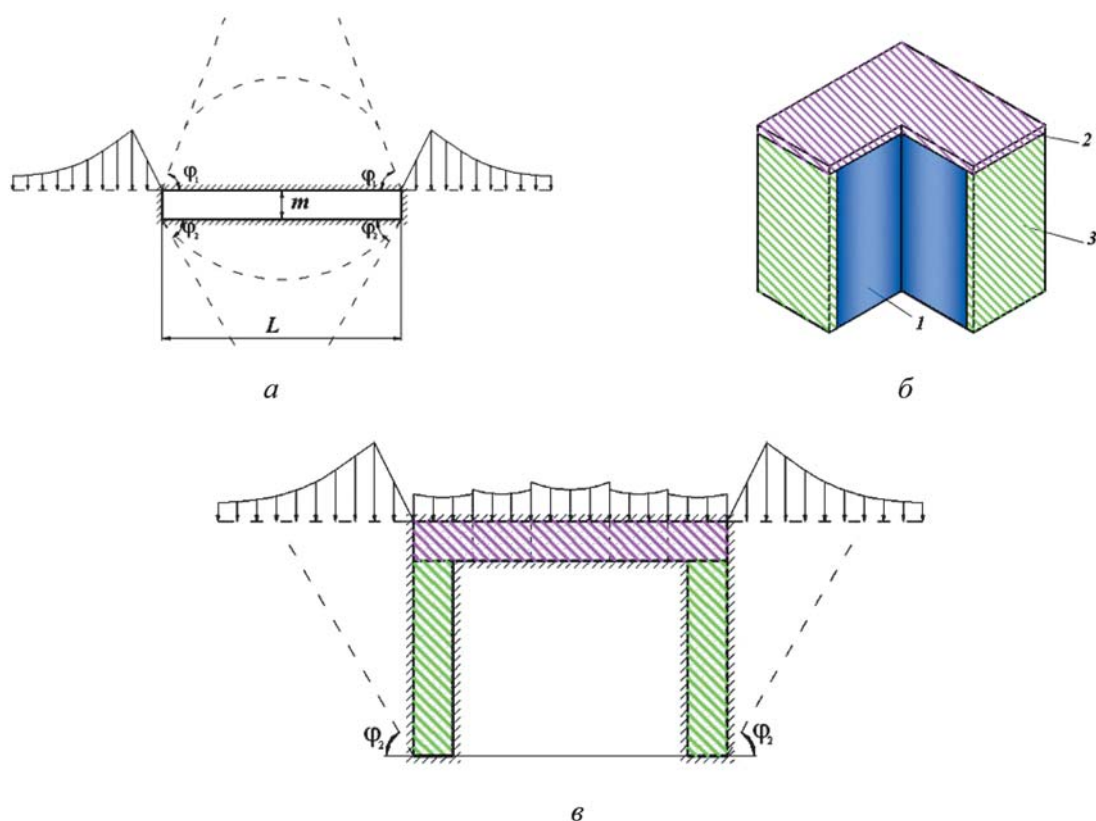


Рис. 2. Геомеханическое обоснование воздействия оконтуривающих искусственных массивов: а – влияние незаложенного защитного слоя, б – формирование защищенной зоны при возведении оконтуривающих искусственных массивов, в – схема обрабатываемого участка после возведения оконтуривающих искусственных массивов; 1 – обрабатываемый участок, 2 и 3 – соответственно горизонтальный и вертикальный оконтуривающий искусственные массивы; m – выемочная мощность, L – длина, m , φ_1 и φ_2 – углы защиты в подработанной и надработанной части массивов

иное, как формирование в литосфере антропогенных неоднородностей с уменьшенной средней плотностью и с возрастающими во времени размерами, все приведенные рассуждения означают, что при формировании достаточно крупной неоднородности (обрабатываемого участка) условия воспроизводства устойчивых динамических структур в литосфере будут определяться релаксационными процессами на внешнем контуре неоднородности [10]. Следовательно, при добыче полезного ископаемого опережающее формирование контуров техногенных неоднородностей обеспечивает устойчивость всей системы в целом.

Таким образом, сформулированный принцип превентивности трансформируется в *геофизическую идею*, лежащую в основе новой парадигмы создания геотехнологий, которая заключается в опережающем выделении зоны техногенного разрушения литосферы из общего поля изменений геофизического состояния массива за счет разделения во времени процессов добычи полезного ископаемого и процессов преодоления последствий геомеханического возмущения прилегающих участков литосферы [10].

Технико-экономическая концепция реализации геофизических принципов

При реализации этой идеи месторождение (или его часть) сначала разделяют на обрабатываемые участки путем отработки приконтурных запасов этих участков и возведения оконтуривающих искусственных массивов — верхнего и боковых (рис. 2).

Ширина боковых оконтуривающих массивов может быть постоянной (при простом контакте рудного тела с вмещающими породами или при возведении массива в руде) либо изменяющейся в сторону внешнего контура рудного тела (при сложной форме этого контура). Форма обрабатываемого участка в горизонтальном сечении может быть произвольной в зависимости от реальной морфологии обрабатываемого рудного тела.

Устойчивость оконтуривающих искусственных массивов на последующих стадиях отработки участка недр обеспечивается путем опережающего разделения общего пролета подработки на локальные пролеты посредством возведения системы разделительных искусственных массивов (рис. 3). В результате в обрабатываемом участке литосферы

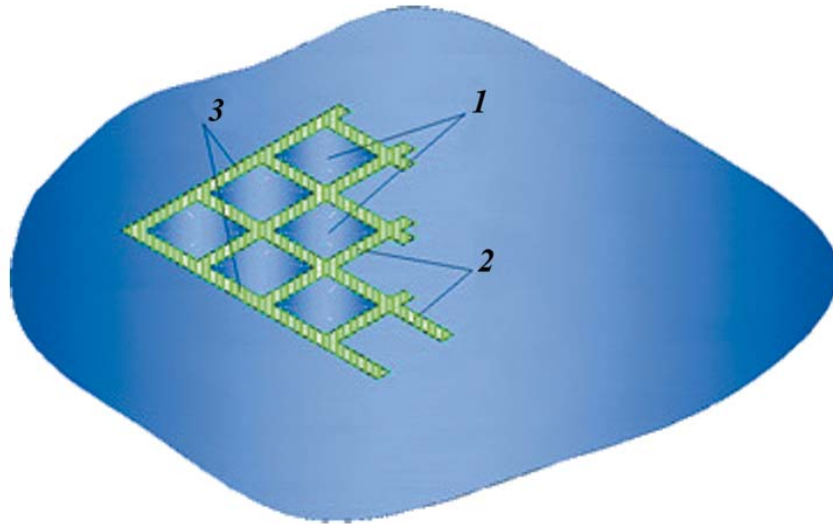


Рис. 3. Стадия образования выемочных единиц: 1 – выемочные единицы, 2 – разделительные искусственные массивы, 3 – оконтуривающие искусственные массивы

возникает пространственная искусственная «каркасная» конструкция, несущая способность которой позволит компенсировать будущие проявления горного давления при отработке основных запасов полезного ископаемого.

С геотехнологической точки зрения такая последовательность работ означает необходимость обязательного применения на разных этапах систем разработки различных классов.

Тогда геотехнологическая идея и очевидное преимущество предлагаемой концепции заключаются в том, что новые возможности повышения безопасности и производительности труда достигаются путем целенаправленной компоновки во времени и пространстве проверенных и высокопроизводительных горных технологий.

Опережающее создание пространственной системы искусственных массивов различного назначения позволяет реализовать основной принцип обеспечения экологической безопасности функционирования природно-технических систем разработки месторождений — принцип изоляции зоны техногенного разрушения, возникающей при функционировании технической компоненты системы в пределах поля естественного равновесия ее природной составляющей. Это дает возможность отработки большей части запасов месторождения в условиях полной защищенности от негативного влияния практически всех геофакторов, возникающих при масштабном техногенном вторжении в равновесные динамические структуры литосферы, и обеспечивает выбор технологии добычи руды в каждой конкретной выемочной единице только по ее локальным горнотехническим характеристикам.

Опережающее формирование контакта между отбиваемым массивом и искусственными массивами создает благоприятные условия для технологического дробления массива горных пород с соответствующим повышением количественных и качественных показателей отбойки. При этом полностью исключаются потери не отбитой руды и внешние источники ее разубоживания. Последнее возможно в данных условиях только за счет локальных колебаний показателя рудоносности обрабатываемых участков рудного тела.

После полной отработки запасов каждой выемочной единицы формируются искусственно оконтуренные устойчивые полости, пригодные для размещения большей части твердых отходов горнообогатительного производства и обеспечения тем самым гарантированной возможности эффективной реализации первого биогенного принципа создания экогеотехнологий — замкнутого цикла обращения добытого вещества литосферы [8].

Соотношение объемов руды, вынимаемых на каждом этапе отработки запасов участка рудного тела, определяется условиями устойчивости пролетов выемочных блоков l_b , их длиной b_i и толщиной вертикальных ограждающих и разделительных искусственных массивов m_b . В общем виде площадь обрабатываемого участка S_p , разбитого на N_i выемочных блоков, составит:

$$S_p = AB = \left(\sum_1^{N_a} l_b + \sum_1^{N_{a+1}} m_b \right) \left(\sum_1^{N_b} b_i + \sum_1^{N_{b+1}} m_b \right),$$

где A и B — ширина и длина обрабатываемого участка, м; a и b — ширина и длина единичного блока, м.

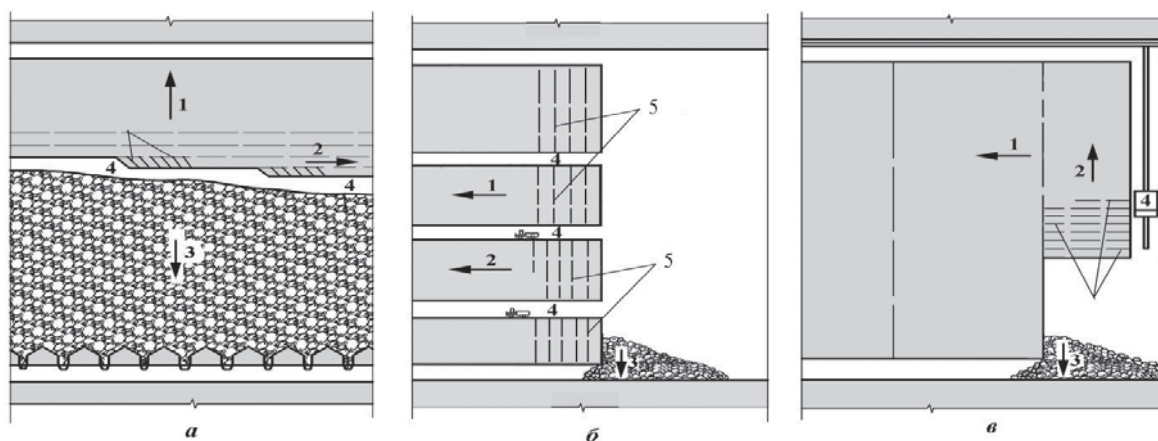


Рис. 4. Схема, поясняющая изменение принципов построения геотехнологии разработки жил при переходе от восходящей выемки по падению (а) к выемке по простиранию из горизонтальных (б) или вертикальных (в) выработок: 1 – направление очистной выемки, 2 – направление отбойки руды, 3 – доставка отбитой рудной массы, 4 – рабочие площадки, 5 – отбойные шпурсы (скважины)

Экономически обоснованный объем искусственных массивов различного назначения d_K в общем объеме выделенного обрабатываемого участка можно определить из выражения

$$d_K = \frac{Z_{\min} - Z_g}{Z_K - Z_g}, \text{ ед.},$$

где Z_{\min} — затраты на единицу добычи, обеспечивающие нулевую рентабельность, руб./ед.; Z_K и Z_g — соответственно затраты на единицу добычи на стадии отработки выемочных единиц и на стадии возведения искусственных массивов различного назначения, руб./ед.

Особенности геологического строения маломощных месторождений предопределили иную форму реализации сформулированных выше положений новой технологической парадигмы. В этом случае геофизическая идея трансформируется в положение о повороте направления движения фронта очистной выемки на 90° и переходе от восходящей выемки руды по падению рудных тел к их выемке прирезками по простиранию.

Тогда принцип превентивности реализуется в форме выноса рабочей площадки из-под отбиваемого слоя, что позволяет отказаться от ее периодического возведения в очистном пространстве и передать эти функции машинам, работающим в нарезных выработках, пройденных по падению или простиранию рудного тела, а отбойку руды вести скважинами, перпендикулярными этим выработкам. Такая схема построения геотехнологии при отработке крутопадающих жил позволяет совместить выполнение основных операций очистного цикла во времени за счет их разделения в пространстве и резко повысить производительность горных работ при сохранении главного

преимущества восходящей выемки в виде гравитационной доставки руды в блоках (рис. 4).

Важной особенностью такой геотехнологии являются малооперационность, выраженная в виде явного преобладания в общей структуре трудовых затрат одной операции — бурения скважин, улучшение эргономики за счет максимального исключения из очистного цикла работ, не поддающихся механизации, и применения принципиально нового оборудования, а также повышение безопасности очистной выемки вследствие полного вывода человека из очистного пространства в нарезные выработки.

Увеличение масштаба отбойки и линейных размеров участков рудных тел, отбиваемых за один цикл, выдвинуло на первый план проблему обеспечения полноты выемки балансовых запасов и потребовало разработки методов согласования параметров горных работ со сложной морфологией жил, которая стала основным фактором, ограничивающим выбор величины этих параметров в конкретных условиях [1].

Технологическое обеспечение замкнутого цикла обращения добытого вещества литосферы

Одной из самых сложных экологических проблем развития сырьевого комплекса в криолитозоне России является накопление огромных масс твердых отходов на земной поверхности. Известно, что кардинальное решение этой проблемы при подземном освоении недр связано с идеями замкнутого обращения твердого вещества в процессе разработки месторождений [8]. Перспективы реализации данных идей существенно возрастают за счет использования природного температурного ресурса региона, который дает возможность применить воду в качестве вяжущего материала при размещении твердых отходов горного производства

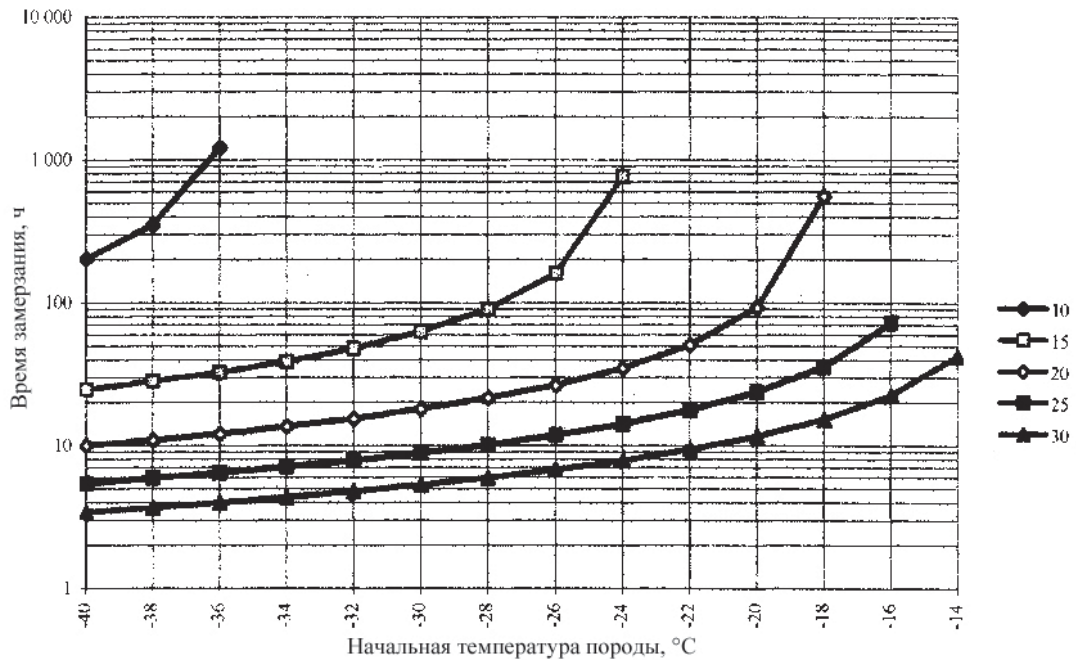


Рис. 5. Время замораживания льдопородного массива для различных соотношений объемов породы и воды

в подземном пространстве рудников, т. е. для восстановления в выработанном пространстве массива многолетнемерзлых пород, нарушенного в процессе добычи полезного ископаемого [2]. Учитывая реальную структуру твердых отходов горного и горно-обогатительного производства, можно выделить два принципиально разных способа этого восстановления:

- создание горнотехнических конструкций из дробленых пустых пород с формированием льдопородной закладки;
- восстановление массива многолетнемерзлых пород из тонкодисперсных отходов обогатительного передела.

Основными параметрами, влияющими на время замораживания льдопородного массива, являются: объем и начальная температура замораживаемой воды, температура рудничного воздуха и скорость его движения, температура горного массива, температура дробленых пород, их количество и кусковатость, удельная теплоемкость воды, льда и породы, а также скрытая теплота кристаллизации воды и конечная температура закладочного массива. Только при оптимальном соотношении всех этих параметров можно образовать монолитный искусственный целик (закладочный массив) с необходимыми прочностными свойствами за заданное время.

Время замораживания льдопородного массива определяется в этом случае из выражения [10]

$$t = \frac{v_k \rho_l L_l^2}{2\lambda_l (T_{кр}^o - T_{пов.л}^o)},$$

где v_k — скрытая теплота кристаллизации воды; L_l — толщина слоя льда; ρ_l — плотность льда; λ_l — коэффициент теплопроводности льда; $T_{пов.л}^o$ — температура льда на поверхности на контакте с водой.

Изменением соотношения объемов дробленой породы и воды определяется время, необходимое для формирования льдопородного закладочного массива в соответствии с применяемой технологией обработки месторождения и температурными условиями конкретного участка.

На рис. 5 представлены зависимости времени замораживания льдопородного массива от различных значений начальных температур породы (при предельных значениях соотношений масс породы и воды), позволяющие выбрать оптимальное время замораживания льдопородного массива необходимой прочности.

Данная технология восстановления массива мерзлых пород из крупнодисперсных отходов горного производства целиком базируется на использовании только геологической составляющей общего температурного ресурса региона.

Наиболее реальные перспективы создания и применения геотехнологий с замкнутым циклом обращения невостребованной части добытого вещества литосферы в виде тонкодисперсных отходов возникают при разработке месторождений в криолитозоне, когда ее температурный ресурс может быть использован для замораживания подаваемого в подземное пространство материала и восстановления таким образом массива многолетнемерзлых пород, нарушенного горными работами при извлечении полезного ископаемого [3].

Принципиальная схема подобной геотехнологии включает четыре основных технологических процесса, выделяемых по виду используемого температурного ресурса:

- подготовка отходов к подаче в подземное пространство, проводимая на поверхности за счет использования климатического температурного ресурса (замораживание брикетов);
- транспортирование замороженных брикетов из хвостов обогащения до закладываемого выработанного пространства;
- формирование техногенного массива, заполняющего выработанное пространство;
- восстановление массива многолетнемерзлых пород в выработанном пространстве за счет геологического температурного ресурса.

Процесс восстановления массива многолетней мерзлоты в выработанном пространстве протекает в основном при использовании геологического температурного ресурса многолетнемерзлых пород, имеющих постоянную температуру. При этом необходимо выделить три основных этапа формирования техногенного массива в выработанном пространстве:

- заполнение выработанного пространства замороженными на поверхности брикетами;
- заполнение пустот сформированного насыпного массива пульпой из текущих хвостов обогащения добытой руды;
- замерзание двухфазного массива.

Продолжительность первого этапа равна числу месяцев со средней температурой воздуха ниже критической по условиям замерзания брикетов. Остальное время занимает второй этап процесса. Третий этап не связан с температурой внешнего воздуха. Его продолжительность прямо пропорциональна температуре многолетнемерзлых пород.

Из реальной структуры температурного ресурса региона следует, что типовая геотехнология воссоздания в выработанном пространстве массива многолетней мерзлоты из отходов обогащательного предела должна иметь два этапа, отличающихся характером использования температурного ресурса:

- использование температурного ресурса массива горных пород совместно с климатическим («зимний» этап);
- использование только температурного ресурса массива горных пород («летний» этап).

Продолжительность этапов соответствует характеру распределения среднемесячных температур.

Ключевое место в перспективной геотехнологии занимает динамика процесса использования климатического температурного ресурса для подготовки отходов обогащения для возврата в выработанное пространство.

На рис. 6 видно, что время замерзания единичного брикета возрастает почти прямо пропорционально его приведенному радиусу и значительно менее заметно снижается при уменьшении температуры

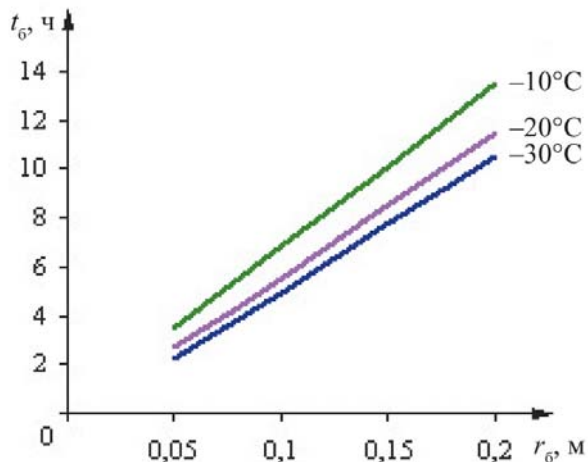


Рис. 6. Зависимость времени замерзания брикета t_0 от его размера r_0 при различной температуре T_H^o наружного воздуха

наружного воздуха. Вписать рассматриваемую операцию технологического процесса подготовки твердых отходов к возврату в выработанное пространство в принятый при отработке месторождения сменный график можно только в той части, где время замерзания брикета будет меньше продолжительности рабочей смены.

При определении продолжительности периода использования климатического температурного ресурса в качестве граничного значения принимается среднемесячная температура наружного воздуха, при которой прессованные брикеты замерзают на поверхности за одну технологическую смену работы подземного рудника (рис. 7).

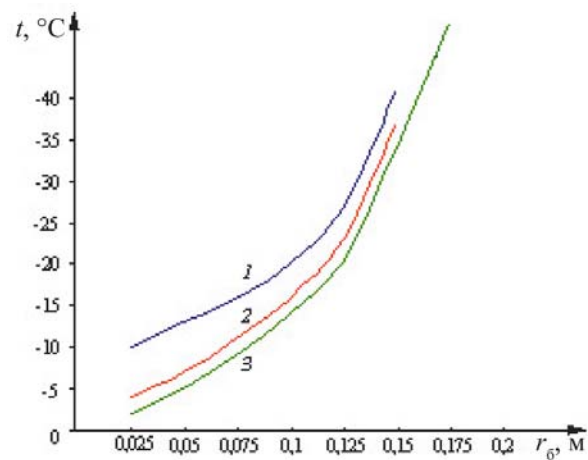


Рис. 7. Зависимость граничного значения среднемесячной температуры от размеров брикетов r_0 и их начальной (до замораживания) температуры T_{H6}^o (1 – $T_{H6}^o = 8^\circ$, 2 – $T_{H6}^o = 4^\circ$, 3 – $T_{H6}^o = 0^\circ$)

При заполнении выработанного пространства замороженными брикетами, имеющими температуру наружного воздуха, геологический температурный ресурс, соответствующий постоянной температуре вмещающих пород, существенно дополняется опосредованным использованием ресурса климатического в виде переохлажденных по сравнению с вмещающими породами закладочных брикетов (рис. 8).

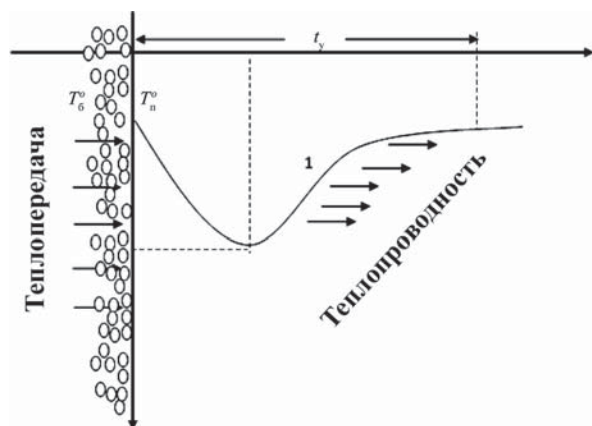


Рис. 8. Общая схема теплообмена между массивом вмещающих пород и насыпным массивом из замороженных закладочных блоков (1 — график изменения температуры вмещающих пород T_n^0 в период выравнивания температур t_y)

Процесс выравнивания температур насыпного массива и вмещающих пород происходит в два этапа. На первом из них (рис. 9) вследствие существенного

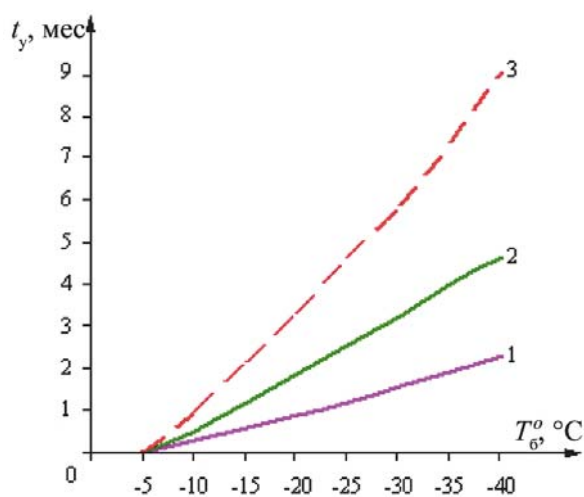


Рис. 9. Зависимость времени выравнивания температуры в блоке t_y от температуры брикетов T_0^0 и выемочной мощности M : 1 — при $M = 1$ м, 2 — при $M = 2$ м, 3 — при $M = 3,5$ м

различия в удельных величинах теплоотдачи в системе «брикеты — порода» и теплопроводности пород температура вмещающего массива будет понижаться. Продолжительность этого периода зависит от температуры наружного воздуха во время замораживания брикетов, а также от выемочной мощности в закладываемых блоках.

Все криогенные процессы, протекающие в выработанном пространстве за пределами периода выравнивания температур, происходят только за счет реализации геологического температурного ресурса.

Летняя модификация процесса подготовки отходов обогащения к возврату в выработанное пространство заключается в частичном обезвоживании текущих хвостов до предельного по условиям гидротранспорта минимума жидкой фазы и последующем их перекачивании под землю в очистные блоки, заложенные в зимний период замороженными брикетами. В результате заполнения всех пустот насыпного массива из замороженных брикетов в выработанном пространстве формируется сплошной двухфазовый закладочный массив, из которого после полного замерзания восстанавливается массив многолетнемерзлых пород. Расширение при этом свободной воды гарантирует восстановление несущей способности искусственно созданного массива.

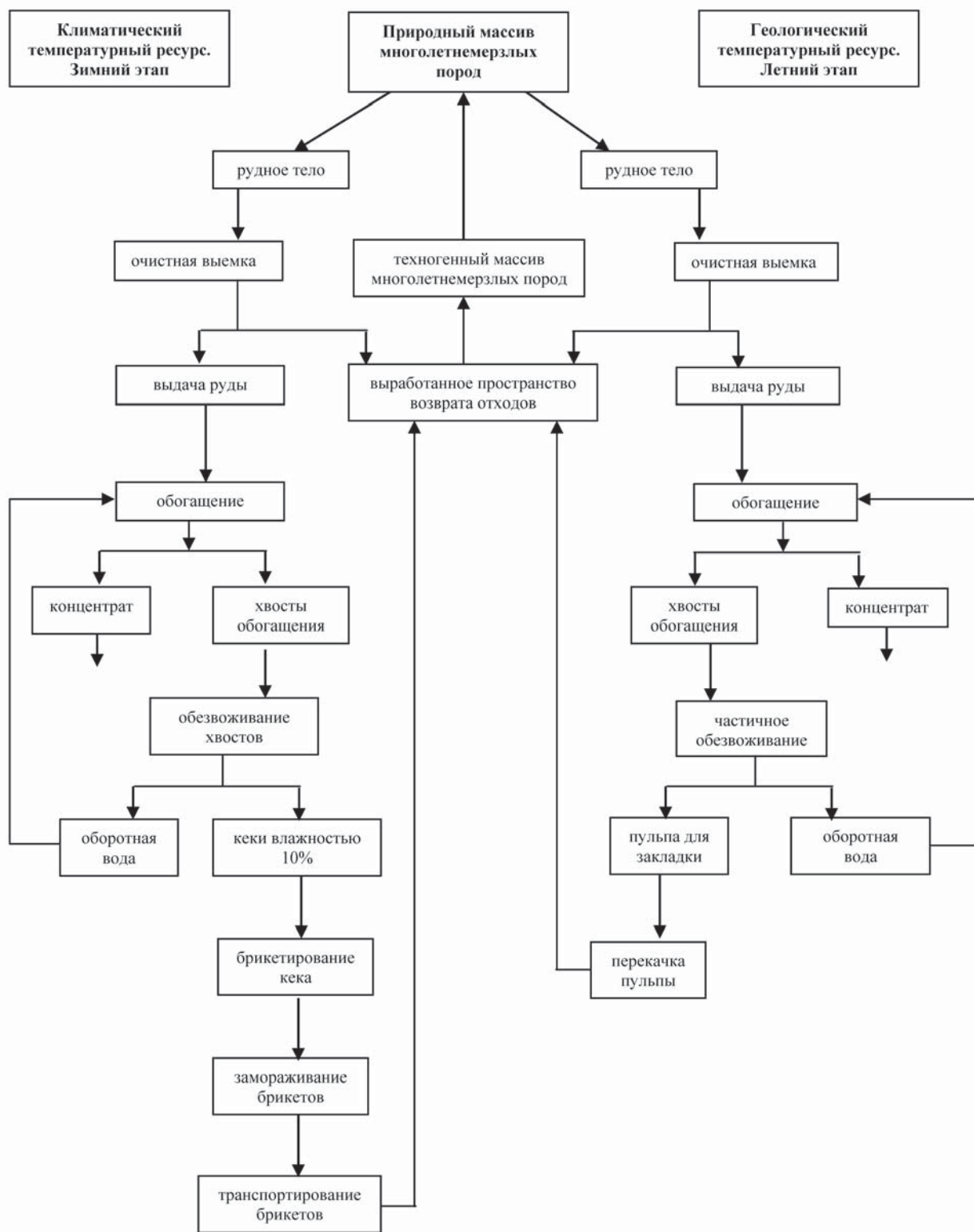
Общая технологическая схема возврата твердых отходов обогащения в подземное пространство путем воссоздания в нем массива многолетнемерзлых пород представлена на рис. 10. Как видно из общей схемы построения геотехнологии, в ее состав входят три описанных выше обязательных технологических процесса, выполняемых последовательно друг за другом.

Последовательность выполнения этих процессов остается постоянной в течение всего года, а состав и характер составляющих их операций зависят от используемого типа температурного ресурса. Исходя из сезонности его изменения, необходимо иметь по крайней мере две модификации каждого из перечисленных процессов: зимнюю, основанную на прямом использовании климатического температурного ресурса и опосредованном использовании ресурса геологического, и летнюю, основанную на прямом использовании геологического температурного ресурса и опосредованном использовании ресурса климатического.

Предложенный принцип построения технологии подготовки отходов обогащения к возврату в выработанное пространство позволяет в максимальной степени использовать особенности климата территорий, входящих в криолитозону, для решения экологических проблем освоения месторождений.

Заключение

В рамках решения фундаментальной проблемы сохранения биологического потенциала Арктики в процессе комплексного освоения ее минеральных



Изучение и освоение природных ресурсов Арктики

Рис. 10. Принципиальная схема геотехнологии размещения твердых отходов обогащения в выработанном пространстве путем воссоздания массива многолетнемерзлых пород

ресурсов впервые рассмотрены методологические вопросы построения долгосрочной перспективы развития новых геотехнологий разработки рудных месторождений на основе исследования локальных и глобальных факторов изменения экологических систем. Главная идея предлагаемого подхода заключается в том, что внутренняя структура создаваемых для условий криолитозоны геотехнологий формируется на основе закономерностей развития техногенно изменяемых недр, а внешнее воздействие регламентируется по условиям самовосстановления биоценозов природных экосистем Арктики.

Литература

1. Галченко Ю. П., Емельянов В. И., Михайлов Ю. В. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых в экосистемах криолитозоны. — Прокопьевск: Изд-во МГОУ, 2004. — 230 с.
2. Галченко Ю. П., Сабянин Г. В. Использование температурного ресурса криолитозоны для снижения экологической опасности освоения жильных месторождений золота // Золотодобывающая пром-сть. — 2009. — № 3 (33). — С. 22—26.
3. Галченко Ю. П., Сабянин Г. В. Проблемы геотехнологии жильных месторождений. — М.: Научтехлитиздат, 2011. — 408 с.
4. Галченко Ю. П., Трубецкой К. Н., Родионов В. Н. и др. Структура техногенно измененных недр при их освоении // Вестн. РАН. — 2002. — Т. 72, № 11. — С. 969—975.
5. Калабин Г. В. Экодинамика техногенных провинций. — Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2000. — 290 с.
6. Родионов В. Н., Сизов И. А., Цветков В. М. Основы геомеханики. — М.: Науч. мир, 1996. — 297 с.
7. Родионов В. Н. Очерк геомеханики. — М.: Науч. мир, 1996. — 64 с.
8. Трубецкой К. Н., Галченко Ю. П., Бурцев Л. И. Охрана окружающей среды при освоении земных недр // Вестн. РАН. — 1998. — Т. 68, № 7. — С. 629—638.
9. Экосистемы в критических состояниях / Под ред. Ю. Г. Пузаченко. — М.: Наука, 1989. — 155 с.
10. Galchenko Y. P., Trubetskoy K. N., Sabinyan G. V. Concept of Subsurface Development of Bowels of the Earth on the Basis of «Framework» Geotechnology // 21st World Mining Congress. Session 15. — Krakow, 2008. — P. 309—317.
11. Trubetskoy K. N., Galchenko Y. P. Ecological problems and the methodology of solving them in a developing technocratic society // Russian J. of Ecology. — 2011. — Vol. 42, № 2. — P. 83—91.