



**М.М. Шац**  
канд. геогр. наук  
СО РАН  
Институт мерзлотоведения  
им. П.И. Мельникова<sup>1</sup>  
ведущий научный сотрудник  
mmshatz@mail.ru

# Эколого-геокриологическая специфика при недропользовании на Севере Сибири

<sup>1</sup>Россия, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36

*Все расширяющиеся масштабы горнодобывающей отрасли на Севере Сибири требуют решения разнообразных эколого-геокриологических проблем. Одной из важнейших является учет условий недропользования, включающих как природные условия территорий деятельности отрасли, способ и стадию добычи, так и характеристику степени преобразования геосистем при освоении. Показана специфика, связанная со своеобразными свойствами слагающих большую часть территории мерзлых толщ льдонасыщенных горных пород, что в значительной степени усложняет условия освоения месторождений и требует использования специфических подходов. На примере различных объектов недропользования показана целесообразность и необходимость подобной оценки и возможность на её основе разработать системы природоохранных и компенсирующих мероприятий. Их реализация позволит значительно уменьшить негативные последствия освоения месторождений*

**Ключевые слова:** степень преобразования геосистем; эколого-геокриологическая специфика месторождений; геоэкологические последствия

**И**з широкого комплекса техногенных факторов для характеризуемого региона ведущими являются горнодобывающая и селитебная деятельность. Именно районы горнодобывающей отрасли и урбанизированные территории являются в настоящее время сосредоточением геоэкологических проблем. Сибирь – северный регион, большую часть которого слагают мерзлые толщи горных пород, одни из наименее устойчивых компонентов природной среды, в процессе своей трансформации резко меняющие состав и свойства. Это явление может сопровождаться фазовыми переходами находящихся в них вод и может привести к утрате прочности и монолитности толщи горных пород. Территория развития многолетнемерзлых пород (ММП), обычно называемая криолитозоной, является специфической составляющей природной среды Сибири. Это верхний слой земной коры, характеризующийся преобладанием отрицательной температуры пород и наличием подземных льдов различного генезиса. Ее мощность достигает глубины до 1,5 км и более, а территория развития составляет около 65% площади РФ.

Несмотря на низкую населённость, для России это стратегически важные территории, где залегают более 30% разведанных запасов нефти, примерно 60% – природного газа, а также каменный уголь и торф, богатые месторождения цветных металлов, золота и алмазов. Природные богатства Сибири необходимо вовлекать в хозяйственный оборот, поэтому на мёрзлых грунтах для их освоения возникают города и посёлки.

В результате активного освоения месторождений полезных ископаемых происходят масштабные изменения во всех компонентах природной среды Сибирского региона. Наиболее очевидно они проявились в трансформации мёрзлых грунтов на территориях горнодобывающей отрасли в Восточной и Западной Сибири. Основными причинами ухудшения свойств ММП стало загрязнение грунтов легкорастворимыми солями  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$ ,  $\text{MgCl}_2$ , которые попадают в них в результате оседания выбросов в атмосферу предприятий добывающей и перерабатывающей промышленности и частых утечек из трубопроводов различного назначения. Поверхностное и глубинное засоление многолетнемерзлых грунтов ведёт к их переходу из твёрдого мёрзлого в пластично-мёрзлое и немёрзлое состояние.

Городские территории, на которых находятся участки с отрицательно мёрзлыми талыми грунтами, неизбежно затапливаются и заболачиваются, а расположенные на них фундаменты

и опорные конструкции сооружений разрушаются. Сибирские города, исполняющие роль плацдармов освоения природных ресурсов, теряют огромные жилые площади, а объекты их транспортной и коммунальной инфраструктур требуют постоянного ремонта. Эта проблема в данной статье не рассматривается.

В то же время отметим значимость фактора, получившего название «глобальное потепление» и оказывающего влияние на состояние объектов горнодобывающей отрасли. Так, за последние 10 лет у 250 крупных сооружений в Норильском промышленном районе выявлены существенные деформации, связанные с ухудшением мерзлотных условий. Примерно 100 объектов находятся в аварийном состоянии, около 40 девяти- и пятиэтажных жилых домов, возведённых в 60–80-е годы, снесены или подлежат сносу [11]. Деформировано почти 60% зданий и сооружений в Игарке, Диксоне, Вилюйске, 100% зданий и сооружений в национальных посёлках Таймырского округа, около 40% зданий и сооружений в Воркуте. В Якутске с начала 1970-х годов более 300 зданий получили серьёзные повреждения в результате просадок оттаявшего грунта [11]. Если техногенная «оттепель» продолжится, придётся вновь укреплять или отстраивать многие жилые дома и промышленные предприятия, это же касается автомобильных и железных дорог. Проблема причин глобального потепления и его последствий сложна сама по себе и освещена в специальной публикации [16].

Показательно, что анализ изменения температуры воздуха, в основе которого лежали данные наблюдений, проведённых в разных регионах Сибири, не даёт оснований для констатации существенного потепления климата и его последствий. Это позволяет отметить, что фиксируемая деградация ММП вызвана не столько потеплением внешнего климата, сколько нарушениями правил ведения хозяйственной деятельности на горнодобывающих территориях.

Наряду с ухудшением свойств ММП, негативные последствия включают развитие криогенных процессов и повышение температуры пород в локальных очагах под горнодобывающими объектами и вблизи них, образование многочисленных техногенных таликовых зон, увеличение глубин сезонного оттаивания грунтов, обводнение верхних горизонтов пород и заболачивание поверхности (*рис. 1*), считающиеся одним из наиболее неблагоприятных факторов, влияющих на потерю устойчивости грунтов оснований и несущих конструкций. К числу основных проблем разработки месторождений Севера относятся суровые при-



**Рис. 1.**  
Мари на месторождении Талакан в Якутии (фото М.М. Шаца)

родные условия, в том числе развитие ММП и обусловленная ими дегазация мерзлых толщ. Развитые на Севере ММП сдерживают вертикальную миграцию и выход на поверхность углеводородов, и это играет негативную роль, происходит их накопление, рост давления и субвертикальное движение. Автор придерживается представлений М.К. Гавриловой [4], считающей, что криолитозона обладает рядом признаков (морфология компонентов, их свойства в том числе температура и др.), в совокупности позволяющих считать мерзлую толщу горных пород объектом, характеризующимся «климатичностью». Кроме того, энергетичность и масштабность процессов недропользования по степени воздействия на ММП сопоставима с последствиями климатических флуктуаций.

Основная цель проводимых исследований – уточнение основных факторов преобразования ММП при недропользовании, оценка степени, масштабов и последствий их влияния на геосистемы региона, тематическое и пространственное расширение баз данных геокриологической и геоэкологической информации для ряда важнейших промышленных объектов и сооружений Севера Сибири, а также их собственное состояние и надежность.

#### **Общие положения подхода**

Комплексный подход к оценке геоэкологической обстановки территорий интенсивного недропользования позволяет не только выявить центры и очаги поражения природной среды, но и оценить специфику последствий их деятельности, т.е. масштабы и степень ее преобразования. Стало возможным предложить ряд специальных компенсационных мероприятий по уменьшению ущерба и проследить за их реализацией и эффективностью.

Во временном плане в общем периоде освоения месторождения и их эксплуатации, можно выделить три геоэкологических этапа.

**Первый** из них включает проблемы, связанные с организацией природоохранных работ на стадиях изысканий и проектирования природно-техногенных комплексов. **Второй** этап объединяет проблемы, возникающие при производстве горно-строительных работ. **Третий** этап связан с трудностями, возникающими на стадии эксплуатации месторождений полезных ископаемых в конкретных инженерно-геологических условиях. На каждом из перечисленных этапов возникающие природоохранные проблемы должны решаться в трех направлениях. С одной стороны – с точки зрения воздействия

объектов на окружающую среду, с другой – изучается реакция самой среды на внешнее для нее техногенное воздействие. И, наконец, третьим аспектом является изучение воздействия на месторождение внешних по отношению к нему объектов.

Следует отметить, что уже на подготовительных стадиях изысканий и проектирования определенных месторождений полезных ископаемых необходимо предусмотреть:

- размещение объектов с учетом экологической значимости природных комплексов осваиваемой территории;
- использование соответствующих технологий, обеспечивающих минимальный ущерб природной среде;
- проведение специальных природоохранных и компенсационных мероприятий.

При проектировании размещения объектов недропользования следует учитывать существующие комплексные и частные схемы охраны природы, в том числе имеющиеся и планируемые охраняемые территории (акватории) обитания особо ценных видов флоры и фауны, памятников природы, культуры и т.д.

Основные вопросы охраны окружающей среды на стадии создания объектов недропользования в области развития ММП должны быть дополнительно увязаны с решением следующих задач:

- выбор вариантов проложения трасс и мест размещения площадных объектов, в т.ч. строительного и иного назначения;
- обоснование выбора мест расположения карьеров строительных материалов и устройства подъездных дорог;
- выбор конструкций и технологии возведения земляного полотна и иных оснований;
- рекультивация нарушенных в процессе обустройства территорий.

При предварительной оценке участков вероятного размещения месторождения, а также площадок и трасс строительства и их баз, необходимо учитывать внешние признаки вероятного развития негативных экзогенных процессов. В частности, особо следует избегать районы вблизи оврагов, а также территории с явным проявлением пучения, термо- и обычного карста, широкого развития бугристых торфяников и т.д.

Основные объекты и транспортную сеть следует размещать на заведомо устойчивых к техногенным воздействиям участках:

- с близкими к поверхности, либо выходящими на нее скальными или крупнообломочными породами;

- относительно ровных, хорошо дренированных, сложенных слабо льдистыми грунтами.

На стадии строительных работ выравнивание поверхности необходимо проводить в начале зимы после промерзания грунтов на глубину не менее 30–40 см. При этом для передвижения технологического транспорта с минимальным ущербом для поверхности следует подсыпать грунт, а при высоте снега менее 20 см – уплотнить его.

Для предотвращения активизации криогенных процессов следует категорически избегать плоских, а особенно полого наклонных крутизной более 3° поверхностей, подстилаемых высоко льдистыми грунтами. К минимуму должно быть сведено воздействие на почвенно-растительный покров – естественный регулятор гидротермического режима грунтов. Технология и сроки производства строительных работ должны строго соответствовать требованиям Строительных норм и правил. При невозможности избежать техногенного воздействия на поверхность, следует провести ряд относительно несложных мероприятий:

- верховья оврагов засыпать крупнообломочным грунтом, строительным мусором и т.д., предусмотрев при этом соответствующий водоотвод;
- для предупреждения термокарста и термоэрозии сохранять почвенно-растительный покров, а при нарушении – восстанавливать его в минимальные сроки;
- имеющиеся западины, воронки и провалы «залечивать» – засыпать минеральным грунтом.

Преобразованные при строительстве участки и трассы после завершения работ следует рекультивировать. Все временные сооружения при этом должны быть демонтированы, строительные отходы убраны. Обязательны раскорчевка пней, выравнивание поверхности, при возможности оголенные участки следует покрыть дерново-моховым слоем, засеять травой или закрепить биологически. Выполнение упомянутых правил позволит уменьшить серьезные негативные последствия освоения территорий, сложенных ММП.

Из производственного опыта известно, что низкотемпературный режим горных пород и подземных вод в «вечной мерзлоте», как и весь комплекс ее природных условий, чаще оказывают весьма неблагоприятное влияние на все процессы горного производства. Это связано с высокой плотностью и вязкостью мерзлых пород, предопределяющих повышенную энергоемкость их разрушения и высокую степень пылеобразования при бурении и взрывных работах. Кроме того, для месторождений, залега-

ющих в ММП, характерны слабая устойчивость мерзлых и талых пород в зоне перехода в подмерзлотные зоны на границе нулевой изотермы и значительное ухудшение горнотехнических условий на нижних горизонтах рудника. При этом специфические гидрогеологические условия с разрывами сплошности мерзлых пород требуют учета проявления горного давления наряду с гидростатическим напором подземных вод.

Запыленность рудничного воздуха в шахтах и рудниках в криолитозоне нередко в сотни раз превышает санитарные нормы [5]. Изыскание эффективных средств борьбы с пылью осложняется недостаточной изученностью особенностей пылеобразования, естественного пылеосаждения, а также связи этих процессов с тепловым режимом выработок, пройденных по многолетнемерзлым породам.

#### **Влияние горнодобывающей отрасли на эколого-геокриологическую обстановку**

В процессе добычи и переработки полезных ископаемых оказывает влияние на большинство компонентов природной среды. При этом залежи полезных ископаемых переводятся в другие формы химических соединений. Например, горючие полезные ископаемые (нефть, уголь, газ, торф) постепенно исчерпываются и переходят в конечном итоге в углекислый газ и карбонаты. Кроме того, полезные компоненты перераспределяются по поверхности земли, рассеивая, как правило, бывшие геологические аккумуляции.

В настоящее время на каждого жителя Земли ежегодно добывается около 20 т сырьевых ресурсов, из которых лишь несколько процентов переходят в конечный продукт, а остальная масса превращается в отходы. Отмечаются значительные потери полезных компонентов (до 50–60%) при добыче полезных ископаемых, обогащении и переработке. При подземной добыче потери угля составляют 30–40%, при открытой – 10%. При добыче железных руд открытым способом потери составляют 3–5%, при подземном извлечении вольфрамо-молибденовых руд – 10–12%, при открытой – 3–5%. При разработке ртутных и золоторудных месторождений потери могут достигать 30% [9].

Большинство месторождений полезных ископаемых являются комплексными и содержат несколько компонентов, извлечение которых экономически выгодно. В месторождениях нефти попутными компонентами являются газ, сера, йод, бром, бор, в газовых месторождениях – сера, азот, гелий. Наибольшей комплексностью характеризуются руды цветных металлов. Месторождения калийных солей содержат обычно сильвин, карналлит и галит. Наиболее интен-

сивной дальнейшей переработке подвергается сильвин. Потери сильвина составляют 25–40%, потери карналлита – 70–80%, галита – 90% [9].

Как было показано ранее в публикациях по проблеме оценки геоэкологических последствий освоения Севера [3, 7], при любых вариантах природопользования необходимо уже на начальном этапе освоения оценить фоновое (естественное или близкое к нему) состояние природной среды. В дальнейшем это позволит сопоставить его с планируемыми вмешательствами и прогнозировать ожидаемую негативную динамику природной среды, предусматривая соответствующие меры для её уменьшения.

При этом наиболее удобной для последующего использования специалистами различных отраслей формой представления тематических материалов являются базы данных геоэкологической информации. В последнее время в отношении законченного для периода их составления виде представлены базы данных для месторождений полезных ископаемых Западно-Якутской алмазной провинции и Южной Якутии [12, 13].

При этом необходимо отметить, что наряду с техногенезом, значительное влияние на свойства являющихся литогенной основой всех северных геосистем многолетнемерзлых пород, состояние и надёжность размещённых на них объектов различной ведомственной принадлежности, оказывают изменения климата, специфика которых была показана в специальных работах [16].

Анализ работ, посвящённых исследованиям преобразования природных комплексов Севера показывает, что при разработке различных месторождений каждый производственный этап недропользования сопровождается воздействием как непосредственно на геосистемы в зоне прямого контакта с их элементами, так и через транзитные пути далеко за пределы горного отвода. При этом воздействию в различной степени подвергаются все элементы природно-техногенного комплекса: атмосферный воздух, биологические, водные и остальные наземные объекты, недра. Наибольший урон на природную среду наносится при открытом способе разработки месторождений минеральных ресурсов, происходят выбросы значительного объёма в атмосферный воздух, сброс загрязняющих веществ в водные объекты, масштабное уничтожение почвенно-растительного покрова, занятие земель под отвалы пустых пород и другие негативные события.

Все геоэкологические факторы, совместное воздействие которых определяет степень и масштабы последствий преобразования экосистем,



**Рис. 2.**  
Термоэрозионное оврагообразование в Якутии (фото И.В. Дорофеева)

условно можно разделить на две основные группы. В первую очередь, это естественные или близкие к ним природные условия, присущие данной территории, в пределах которой собственно и происходит процесс недропользования. Во-вторых, это факторы, обусловленные применяемыми методами, приемами и технологиями процесса извлечения, обогащения и транспортировки полезного ископаемого, его свойствами и специфическими характеристиками, в частности геологическими и горнотехническими условиями. Обычно при исследованиях природной среды криолитозоны подчеркивается ее экстремальность по условиям жизнедеятельности, которая накладывает отпечаток на все виды природопользования в регионе.

Природно-географические особенности криолитозоны оказывают огромное влияние на состояние экосистем Севера, на их чувствительность и устойчивость к техногенному воздействию, на способность к самовосстановлению. Для северных территорий характерны особые условия воздухообмена, которые выражены как частые штилевые явления в зимний период,

преобладание малых скоростей ветров, высокая повторяемость приземных инверсий воздуха, вертикальная температурная стратификация, туманы. Так по сочетанию этих неблагоприятных метеорологических условий большая часть территории Якутии относится к районам высокого и очень высокого потенциала загрязнения атмосферного воздуха [4], что снижает способность рассеивания атмосферным воздухом примесей и способствует его загрязнению даже при сравнительно небольших объемах выбросов вредных веществ различными источниками (автотранспорт, горная и строительная техника, отопительные системы, промышленные предприятия и сооружения, буровзрывные работы и т.д.). Данное обстоятельство требует применения в практике недропользования в Якутии специально разработанных с учетом климатических условий региона мероприятий по снижению запыленности воздуха при горных работах. Многолетняя мерзлота оказывает существенное влияние на ландшафты и их геоэкологическое состояние, что во многом определяется характером проявления криогенных процессов – тер-

мокарста, солифлюкции, мерзлотного пучения и т.д. Функционирование ландшафтов зависит от состояния и свойств ММП – льдистости отложений, температуры горных пород, мощности сезонно-талого и защитного слоев.

Многие исследователи отмечают, что в зависимости от характера освоения территории и техногенного воздействия, ландшафтных особенностей криогенных экосистем одинаковое нарушение поверхности в одних условиях вызывает повышение температуры многолетне-мерзлых пород и проявление или усиление термокарста, термоэрозии и солифлюкции, а в других – понижение температуры пород и проявления процессов пучения, морозобойного трещинообразования, наледей.

Естественными особенностями многолетне-мерзлых пород, которые во многом влияют на степень воздействия горных работ на преобразование ландшафтов, являются их отрицательная температура и наличие цементирующей замерзшей воды, которые содержатся в породах в виде микроскопических частиц или могут быть представлены массивами повторно-жильных льдов (ПЖЛ). Данные особенности ММП наиболее ярко проявляются на россыпных месторождениях, расположенных в тундровой зоне и лесотундровой полосе, где мощность ПЖЛ местами может достигать десятков метров.

В зонах распространения ПЖЛ или льдистых пород при проходке траншей, руслоотводных каналов, карьеров и т.д. линейный рост термоэрозионных образований (оврагов) достигает до 50–100 м/год (рис. 2). Льдистость ММП, равно как и температура мерзлых пород, должны учитываться при всех стадиях развития недропользования в зоне распространения мерзлоты.

При развитии процессов, связанных с нарушениями почвенного покрова, грунтов в результате морозной сортировки, происходит поступление мелко диспергированных продуктов разрушения в поверхностные водотоки, вызывая их загрязнение взвесями и различными химическими веществами. При ведении горных работ в криолитозоне следует особо учитывать, что наряду с многолетнемерзлыми там широко развиты участки или даже районы талых пород, обычно называемые таликами. Талики наблюдаются в районах разработок россыпных и угольных месторождений Северной и Южной Якутии. Эти явления в основном приурочены к обводненным горизонтам пород под днищами русел рек или озер. Таким образом, многолетняя мерзлота выступает ведущим природным фактором, активно влияющим на развитие как биотических процессов, так и последствий техногенного воз-

действия. В конечном счете криогенная составляющая северных территорий предопределяет всю геоэкологическую обстановку при ее освоении.

Из множества геоэкологических показателей самых различных месторождений полезных ископаемых к наиболее влияющим на выбор способа и параметров системы разработки месторождений, применяемой технологии, техники можно отнести геоэкологические характеристики (морфология, свойства и строение мерзлых толщ), рельеф местности (горный, равнинный), горно-геологические показатели: глубину залегания, мощность продуктивного тела (слоя, пласта, жилы и т.д.), угол наклона, форму рудного тела, содержание полезного компонента.

### **Специфика эколого-геоэкологических последствий при освоении месторождений различными способами**

Основная цель разработки месторождений полезных ископаемых – обеспечение сырьём, необходимым для промышленного производства и других целей, в последнее время дополняется требованиями возможно более полного извлечения выемки полезных компонентов из недр при оптимальных затратах, максимальном использовании попутных компонентов и эффективной системе сохранения окружающей среды.

К основным способам разработки месторождений полезных ископаемых относятся открытый и подземный, а их сопровождают дополнительные типы работ. Так, открытую разработку месторождений выполняют скважинный методом с созданием системы разведочных и эксплуатационных буровых скважин. Особый вид разработки – морские буровые скважины – связаны с работами ниже уровня моря. Традиционно открытый и подземный способ применялись для добычи твёрдых полезных ископаемых, скважинный – для жидких и газообразных полезных ископаемых. В прошлом веке получил развитие шахтный, осуществляемый с помощью системы подземных горных выработок и карьерный, осуществляемый с помощью системы открытых горных выработок метод.

С середины XX в. возрастают объёмы добычи твёрдых полезных ископаемых через скважины, ведётся добыча высоковязких нефтей открытым и шахтным способами, перспективной является шахтная добыча тяжёлых нефтей из ранее отработанных скважинами месторождений, высокоминерализованная морская вода становится объектом промышленной переработки для извлечения ценных минералов.

Открытая разработка месторождений, благодаря высокой степени извлечения полезных

ископаемых, возможности достижения большей производственной мощности предприятия, повышению производительности труда в несколько раз), снижению себестоимости добычи, улучшению условий труда получила в нашей стране преимущественное, по сравнению с шахтной добычей, развитие и обеспечивает свыше 75% производства минерального сырья. В то же время этот вид добычи сопряжен с рядом технологических проблем. При разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом на большую глубину возникают трудности, затрагивающие практически все стороны горного производства и отрасли его обеспечивающие.

Особенно остро эти проблемы возникают при разработке кимберлитовых месторождений Якутии, находящихся в крайне суровых природных условиях, когда воздействию подвергаются все компоненты природной среды, и возникают широкомасштабные последствия в виде нарушения поверхностных геосистем разной степени. По неофициальным данным, за время добычи якутских алмазов открытым способом вывезено около 350 млн м<sup>3</sup> породы на \$17 млрд [1, 2]. До настоящего времени в Якутской алмазонной провинции открытым способом разрабатывались кимберлитовые трубки до глубины 500–600 м, в перспективе – 800–900 м. Горными работами вскрыты подмерзлотные напорные пластовые воды, насыщенные различными газами: метаном, гомологами метана, сероводородом, а также радиоактивными аэрозолями, оказывающими пагубное влияние на людей и окружающую среду.

Анализ объективных закономерностей развития открытых горных работ свидетельствует о том [5], что объемы вскрышных работ в контуре кимберлитового карьера на каждые 100 м погружения при глубине 600 м возрастают от 2,07 до 6 раз, а себестоимость вскрышных работ – от 1,53 до 6,53 раза. С глубиной резко сокращаются параметры рабочей зоны карьера, что ухудшает показатели использования горнотранспортного оборудования. Уникальность горнотехнических условий кимберлитовых карьеров, обусловленная в значительной степени спецификой вмещающих ММП, выдвинула крупную проблему разработки данных месторождений и потребовала поиска новых технических решений, направленных на повышение эффективности открытого способа в экстремальных условиях Севера [8]. Недооценка этих положений приводит к самым серьезным последствиям. Таким образом, создание технологических основ разработки глубоких кимберлитовых карьеров в многолетнемерзлых породах является крупной научной

и прикладной проблемой, имеющей важное народнохозяйственное значение.

При всех своих достоинствах открытые разработки имеют очевидные недостатки, главным образом геоэкологического характера. При их проведении нарушаются, а порой и выводятся из хозяйственного оборота огромные площади земель различного назначения. Так, при современных масштабах открытых горных работ площадь нарушаемых земель составляет [8] 200–250 га на 1 млн м<sup>3</sup> площади развития полезных ископаемых. За 60 лет разработки россыпных месторождений Якутии нарушено свыше 150 000 га при ежегодном приросте 3000–4000 га, а восстановлено менее 1,5–2%. При существующей технологии ведения вскрышных работ рекультивация нарушенных земель производится отдельно и требует огромных средств на ее проведение. Это уже привело к формированию огромных массивов нарушенных земель и настоятельно требует разработки специальных технологий ведения горных работ, предусматривающих увеличение площадей рекультивируемых нарушенных геосистем.

Подземная разработка месторождений полезных ископаемых представляет их добычу из глубоких горизонтов горных пород с умеренными нарушениями поверхностных геосистем посредством создания системы соответствующих горных выработок. В процессе подземной разработки месторождений обычно выделяют 3 стадии: вскрытие, подготовку и очистную выемку. Основные виды горных выработок при подземной отработке: шахтные стволы и штольни, открывающие доступ ко всему полезному компоненту или его части с поверхности, и обеспечивающие возможность проведения подготовительных выработок и очистной выемки в предусмотренных объемах, при максимальной выемке. Шахтная отработка зависит от вида и условий залегания полезных ископаемых, которые определяют средствами и способом добычи, организацией и режимом работы горного предприятия. В единой структуре шахт можно выделить взаимосвязанные в пространстве и во времени участки: ведения очистных работ; работ по воспроизводству фронта очистной выемки; работ, связанных с шахтным транспортом, вентиляцией шахты, дегазацией, водоотливом, энергообеспечением и др. Деятельность шахт в условиях разработки залежей, опасных по газу, внезапным выбросам и выделением в шахтную атмосферу взрывоопасных или токсичных газов, определяет особый режим работы подземного предприятия.

Еще одним видом горных работ является буровая проходка с помощью горных выработок



преимущественно круглого сечения (диаметр 59–1000 мм), образуемых в результате вскрытия горных пород при помощи специального оборудования, работающего по вращательному принципу. Скважины делят на мелкие, глубиной до 2000 м, из них подавляющее большинство до нескольких сотен метров, средние – до 4500, глубокие – до 6000, сверхглубокие – свыше 6000 м. По положению основного ствола и конфигурации буровые скважины разделяют на вертикальные, горизонтальные, наклонные; неразветвлённые, разветвлённые; одиночные и кустовые, а по назначению на исследовательские, предназначенные для изучения земных толщ, эксплуатационные для разработки, строительные – для создания различных сооружений (мостов, причалов, свайных фундаментов и оснований, подземных хранилищ для жидкостей и газов, водоводов) и др. Геоэкологические последствия подземного способа добычи гораздо менее масштабны, хотя при неразумном хозяйствовании – значительны.

Для большинства действующих горнодобывающих предприятий с открытым способом разработки глубокозалегающих месторождений руд черных и цветных металлов, горно-химического сырья, угля, алмазов решение проблемы освоения глубоких горизонтов может идти несколькими путями. Среди них – вскрытие глубоких горизонтов с использованием крутых углов откоса уступов и бортов карьеров; применение специальной горной и транспортной техники; переход на подземные горные работы с возможным использованием транспортного комплекса открытых горных работ; модернизация устаревшего оборудования и т.д.; комбинированная разработка глубоких горизонтов с одновременным ведением открытых и подземных горных работ.

Примечательно, что в РФ морских скважин гораздо меньше, чем в Мексиканском заливе США, и их число сохраняется. За ними ведется геотехнический мониторинг. На суше в РФ ситуация гораздо хуже, и тысячи скважин, пробуренных в 60–80-е годы находятся в неважном состоянии, что составляет 60–70% от их общего числа для каждого месторождения [11]. К сожалению, нередко причинами аварий являются не только технические, но и человеческие факторы.

#### **Специфика эколого-геокриологических последствий освоения месторождений различных видов полезных ископаемых**

Очевидная связь существует между спецификой эколого-геокриологических последствий освоения у месторождений различных видов полезных ископаемых. Так, последнее время на самых крупных алмазоносных месторождениях Якутии

исчерпаны возможности открытого способа отработки, и горно-обогатительные комбинаты переходят на подземную добычу. С глубиной горнотехнические условия на многих трубках сильно усложняются, что связано как с изменением форм залегания рудных тел, так и гидрогеологических, газодинамических и других параметров отработки месторождений – это усложняет как технологию разработки, так и ее экологические последствия. Однако геологическая разведка показала, что алмазы залегают и на глубине более километра. Поэтому сейчас добыча алмазов приостановлена и строятся подземные шахты [1, 2].

Форма алмазоносных кимберлитовых трубчатых тел Якутии, обуславливающая большинство технологических решений, меняется в зависимости от размера эрозионного среза, типа канала и числа фаз внедрения кимберлитовых пород. Различают относительно выдержанные, простые по форме сечения одноканальные трубки взрыва: овальные, округлые, близкие к изометричным с крутым углом падения, которые в прикорневой части имеют грушевидную форму (трубки «Мир», «Интернациональная», «Дачная»). Другую группу составляют трубки сложной – сдвоенной, гантелевидной формой сечения с расходящимися на глубине каналами – трубки «Новинка», «Удачная», «Сибирская», «Юбилейная». Очень сложные формы имеют сильно вытянутые, линзовидные, дайкообразные с раздутыми горизонтальными сечениями трубки с каналами трещинного и смещенными трещинного и центрального типа кимберлитовые тела – трубки «Заполярная», «Якутская», «Сытыканская», «Айхал» [14, 15].

Добыча алмазов, из которых после огранки изготавливают ценнейшие бриллианты на базе подземных рудников является сложнейшей технологической проблемой и в данной работе не рассматривается, как и аспекты, связанные с извлечением золота.

Исследования по созданию технологии подземной разработки урана в районе месторождений Эльконского рудного поля в Южной Якутии начаты в 2007 г. [6]. Было установлено, что эффективная отработка месторождений урана должна быть основана на решении новых, нетрадиционных задач при проектировании и реализации всех технологических процессов подземной добычи и определяться следующими факторами:

– резко континентальным климатом с высоким перепадом температур, оказывающим значительное влияние на формирование криолитозоны и возможность управления тепловым режимом шахт в зоне пониженных температур

горного массива от +8... + 10 °С до -5...7 °С. По данным Института мерзлотоведения СО РАН, глубина распространения пониженных температур горного массива этом районе превышает 600 м от поверхности и достигает глубины 800–1000 м. В связи с этим возникает проблема пылеподавления и обеспечения безопасности радоновыделения в условиях пониженных температур, необходимость обеспечения экологической безопасности поверхностных и подземных водных ресурсов;

- высоким уровнем сейсмичности, более 7 баллов, указывающим на высокий уровень концентрации тектонических напряжений, определяющих напряженно-деформированное состояние массива, изменения которого необходимо учитывать при проходке шахтных стволов, подготовительных и очистных выработок и на весь период эксплуатации горного предприятия;
- приуроченностью оруднения к тектоническим разломам, затрудняющей обеспечение безопасности и эффективности ведения горных работ.

Обеспечение радиационной безопасности в горных выработках Эльгинского горста требует постоянного уточнения исходных данных для расчетов, совершенствования методической базы, поиска оптимальных технических и технологических решений. Наряду с этим большое значение приобретают методы борьбы с пылеобразованием.

Значительный интерес представляет тот факт, что добыча ценных руд в зоне многолетней мерзлоты подземным способом в значительной степени ведется по проектам 30–40-летней давности с большими потерями руды и разубоживанием во всеухудшающихся горнотехнических и горно-геологических условиях [14, 15]. Повысить уровень производства с одновременным сокращением нерентабельных предприятий можно только за счет внедрения систем разработки, позволяющих значительно снизить потери и разубоживание ценных руд при их добыче с одновременным увеличением производительности предприятий. Для целей разрешения этой проблемы из существующих систем разработки более всего подходят системы подземной добычи полезных ископаемых с закладкой выработанного пространства. Однако пока очень мало месторождений в условиях ММП разрабатывается таким образом. Это связано с его трудоемкостью, необходимостью строительства дорогостоящих закладочных комплексов и трубопроводов, дефицитом вяжущих материалов (цемент и проч.), резким подорожанием материалов, услуг, транспорта, высокой себестоимостью закладочных работ, отсутствием техно-

логий, адаптированных к местным условиям, отрицательным влиянием местных природных условий.

Приведенные данные свидетельствуют, что мерзлые горные породы в естественных условиях находятся в состоянии термодинамического равновесия. Однако при строительстве шахт и карьеров под влиянием многих причин это равновесие часто нарушается, возникают и развиваются разнообразные геологические процессы и явления, выражающиеся в разрушении, деформациях, перемещении и сдвигении масс горных пород различных объемов. В подземных выработках и карьерах они приводят к различным видам водопритокков, фильтрационных деформаций, а в районах распространения многолетней мерзлоты – к явлениям мерзлотного генезиса [10]. Также возникают фильтрационные деформации и явления мерзлотного характера, вызывающие местные смещения горных масс. Их природа и механизм при различных видах подземных выработок и откосах карьеров часто весьма сложны, а их всестороннее изучение, знание закономерностей развития, разработки методов прогноза и управления ими – важнейшие задачи инженерной геологии месторождений полезных ископаемых. Разнообразные геологические проблемы, связанные с освоением месторождений полезных ископаемых, изучают и оценивают в инженерном аспекте, а прогноз изменений геологических условий составляют в связи со строительством сооружений: шахт, карьеров и др. и проведением инженерных мероприятий. При этом объектом инженерно-геологических исследований, в зависимости от стадии освоения, должны быть: отдельные участки, шахтные и карьерные поля и их части и, наконец, площади их влияния.

Таким образом, для надежного освоения месторождений полезных ископаемых в многолетнемерзлых породах необходимо разработать новые технологии, создавать передовые технологии, повышать культуру добычи полезных ископаемых, разрабатывать единые точки зрения на последствия освоения, создавать научно-обоснованные системы природоохранной техники и компенсирующих мероприятий.

За последнее время на российском Севере открыты и частично эксплуатируются сотни месторождений полезных ископаемых. В бассейне Северного Ледовитого океана добыча ведется всего на 13 месторождениях: 9 – в США в море Бофорта на северном склоне Аляски; 2 – в Норвегии в юго-западной части Баренцева моря; 2 – в РФ в Печерском море и Тазовской губе Карского моря. Из этих месторождений извлечены углеводороды в суммарном объеме 21 млрд т

в нефтяном эквиваленте, 86% из них добыто в РФ [11].

### **Выводы**

Комплексный подход к оценке последствий недропользования в криолитозоне позволяет выявить основные факторы нарушения природной среды и предложить ряд специальных компенсационных мероприятий по уменьшению ущерба, а также проследить за их реализацией и эффективностью. На всех стадиях процесса горного производства следует обращать самое пристальное внимание на его специфику, связанную с уникальностью свойств осваиваемого объекта – сезонно- и многолетнемерзлых толщ горных пород.

Таким образом, современное освоение криолитозоны, использование ее ресурсов невозможны без системной оценки совокупного влияния на нее как климатических изменений, так и развивающихся крупных промышленных объектов. Их взаимосвязь в сочетании с оценкой последствий социально-экономических, экологических, историко-культурологических и медико-биологических процессов представляет собой сложную задачу, требующую глубокого

системного подхода и имеющую фундаментальное, социальное и региональное значение.

К сожалению, катастрофы и аварии при разработке месторождений полезных ископаемых на Севере неизбежны и происходят во всех странах, однако именно там их последствия наиболее губительны и масштабны. Возможны серьезные имиджевые и экономические потери и последствия.

Одним из новых подходов размещения рудодоподготовительных объектов является их максимальное приближение к местам выемки. К основному направлению инновационного совершенствования процессов горного производства следует отнести техническое перевооружение и модернизацию геотехники, обеспечивающей энерго- и ресурсосбережение при ведении горных работ в условиях криолитозоны.

Таким образом, являющиеся объектом недропользования мерзлые толщи горных пород, из которых извлекаются полезные компоненты, по своей комплексности и динамичности, наличием ответной реакции на внешнее воздействие, безусловно могут быть отнесены к важнейшим компонентам природной среды, по масштабности сопоставимыми с климатом. **■**

---

### **Литература**

1. Андросов А.Д. Особенности ведения горных работ в сложных гидрогеологических условиях глубоких карьеров Якутии //Колыма. 1988. № 10. С. 3–5.
2. Андросов А.Д., Саввинов К.Е. Основные закономерности развития сверхглубокого кимберлитового карьера при многоэтапной отработке // Колыма. 1992. № 4. С. 20–22.
3. Браун Дж., Граве Н.А. Нарушение поверхности и ее защита при освоении Севера. Новосибирск: Наука.1981. 88 с.
4. Гаврилова М.К. Климаты холодных регионов Земли. Якутск: Изд-во СО РАН. 1998. 206 с.
5. Иванов В.В. Геоэкологические особенности освоения месторождений полезных ископаемых Якутии //Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 8-1. С. 59–62.
6. Камнев Е.Н., Морозов В.Н., Белов С.В., Колесников И.Ю., Лукишов Б., Татаринов В.Н. К разработке месторождений урана в зонах активного тектогенеза / Уран России. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ. 2008. С. 16–25.
7. Мельников П.И., Граве Н.А., Шац М.М., Шумилов Ю.В. Проблемы мониторинга криолитозоны //Известия АН. Серия География. 1987. № 5. С. 103–108.
8. Михайлов Ю.В., Емельянов В.И., Галченко Ю.П. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых в экосистемах криолитозоны. Прокопьевск. 2004. 193 с.
9. Ткач С.М. Методические и геотехнологические аспекты повышения эффективности освоения рудных и россыпных месторождений Якутии. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения СО РАН. 2006. 284 с.
10. Трумбачев В.Ф., Кусов А.Е., Заровняев Б.Н. Исследование методом фотомеханики распределения напряжений внутри крупногабаритных блоков в процессе их перемещения во внутренний отвал //Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1992.
11. Богоявленский В.И. Угрозы из глубины: мерзлота ошибок не прощает //Редкие земли. Доступно на: <http://areearth.ru/ru/pub/20180123/03679.html> (обращение 29.04.2020).
12. Шац М.М., Галкин А.Ф. База данных № 0220409730 «Опасные и потенциально опасные геотехнические объекты алмазной провинции РС (Я)». Электронная база данных. Государственный регистр баз данных РФ. Свидетельство № 9045 от 03.06.2004.
13. Шац М.М., Галкин А.Ф. База данных № 0220611149 «Опасные и потенциально опасные геотехнические объекты Южной Якутии». Электронная база данных. Государственный регистр баз данных РФ. Свидетельство № 10443 от 26.06.2006.
14. Яковлев В.Л., Корнилов С.В. и др. Научное обоснование и разработка новых методов эффективного и экологически безопасного освоения природных и техногенных месторождений Урала //Проблемы минералогии России. М.: Изд-во ГЦ РАН. 2012. С. 471–486.
15. Яковлев К.Л., Андросов А.Д., Шукин В. Е. и др. Технология разработки глубоких карьеров Севера в условиях мерзлоты и агрессивных вод // Материалы международного симпозиума «Проблемы открытой разработки глубоких карьеров». Удачный, 1991. С. 45–51.
16. Shatz M.M., Skachkov Yu.B. Key trends and implications for contemporary climate dynamics of the north //Climate and nature, no. 1(4), 2017, pp. 19-31.

M.M. Shatz, PhD, Leading Researcher of Institute of Permafrost Studies<sup>1</sup>, Siberian Branch of RAS, mmshatz@mail.ru

<sup>1</sup>36 Frozen str., Yakutsk, 677010, Russia

## Specific Ecological and Geocryological Character of Subsoil Use in the North of Siberia

**Abstract.** The increasing scale of mining industry in the north of Siberia requires addressing a variety of environmental and geocryological issues. One of the most important among them is to account for the conditions of subsoil use, which include natural conditions of the areas of industry activities, development method and phase, and also characteristics of the degree of geosystems transformation during the development. Specific character associated with the original properties of the frozen ice-saturated rocks composing the most part of the territory is shown, which considerably complicates the conditions of field development and requires original approaches. Advisability of and need in this evaluation, and possibility to work out the environmental and remedial measures on its base are shown by the example of different of subsoil assets. Compliance with these measures will considerably reduce the negative effect of field development.

**Keywords:** degree of geosystem transformation; ecological and geocryological specific character of fields; geoeological consequences.

### References

- Androsov A.D. *Osobennosti vedeniia gornyykh rabot v slozhnykh gidrogeologicheskikh usloviakh glubokikh kar'erov Iakutii* [Features of mining in difficult hydrogeological conditions of the deep quarries of Yakutia]. *Kolyma* [Kolyma], 1988, no. 10, pp. 3–5.
- Androsov A.D., Savvinov K.E. *Osnovnye zakonomernosti razvitiia sverkhglubokogo kimberlitovogo kar'era pri mnogoetapnoi otrabotke* [The main patterns of development of an ultra-deep kimberlite quarry during multi-stage mining]. *Kolyma* [Kolyma], 1992, no. 4, pp. 20–22.
- Braun Dzh., Grave N.A. *Narushenie poverkhnosti i ee zashchita pri osvoenii Severa* [Violation of the surface and its protection during the development of the North]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981, 88 p.
- Gavrilova M.K. *Klimaty kholodnykh regionov Zemli* [Climates of the cold regions of the Earth]. Yakutsk, SO RAS Publ., 1998, 206 p.
- Ivanov V.V. *Geoekologicheskie osobennosti osvoeniia mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh Iakutii* [Geoeological features of the development of mineral deposits in Yakutia]. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research], 2013, no. 8-1, pp. 59–62.
- Kamnev E.N., Morozov V.N., Belov S.V., Kolesnikov I.Iu., Lukishov B., Tatarinov V.N. *K razrabotke mestorozhdenii urana v zonakh aktivnogo tektogeneza* [To the development of uranium deposits in areas of active tectogenesis]. *Uran Rossii* [Uranium of Russia], 2008, pp. 16–25.
- Mel'nikov P.I., Grave N.A., Shats M.M., Shumilov Iu.V. *Problemy monitoringa kriolitozony* [Problems of monitoring the permafrost zone]. *Izvestiia AN. Seriya Geografiia* [Izvestiya AN. Series Geography], 1987, no. 5, pp. 103–108.
- Mikhailov Iu.V., Emel'ianov V.I., Galchenko Iu.P. *Podzemnaia razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh v ekosistemakh kriolitozony* [Underground mining of mineral deposits in cryolithozone ecosystems]. Prokopyevsk, 2004, 193 p.
- Tkach S.M. *Metodicheskie i geotekhnologicheskie aspekty povysheniia effektivnosti osvoeniia rudnykh i rossypanykh mestorozhdenii Iakutii* [Methodological and geotechnological aspects of increasing the efficiency of the development of ore and placer deposits in Yakutia]. Yakutsk, Publishing house of the Institute of permafrost SB RAS, 2006, 284 p.
- Trumbachev V.F., Kusov A.E., Zarovniaev B.N. *Issledovanie metodom fotomekhaniki raspredeleniia napriazhenii vnutri krupnogabaritnykh blokov v protsesse ikh peremeshcheniia vo vnutrennii otval* [The study by the method of photomechanics of the distribution of stresses inside large blocks in the process of moving them to the internal dump]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physicotechnical problems of mining], 1992.
- Bogoiavlenskii V.I. *Ugrozy iz glubiny: merzlota oshibok ne proshchaet* [Threats from the depths: permafrost does not forgive mistakes]. *Redkie zemli* [Terres Rares]. Available at: <http://areearth.ru/ru/pub/20180123/03679.html> (accessed 29 April 2020).
- Shats M.M., Galkin A.F. *Baza dannykh № 0220409730 «Opasnye i potentsial'no opasnye geotekhnicheskie ob'ekty almaznoi provintsii RS (Ia)»*. *Elektronnaia baza dannykh. Gosudarstvennyi registr baz dannykh RF. Svidetel'stvo № 9045 ot 03.06.2004* [Database No. 0220409730 "Dangerous and potentially dangerous geotechnical objects of the diamond province of RS (Y)". Electronic database. State Register of Databases of the Russian Federation. Certificate No. 9045 of June 3, 2004.].
- Shats M.M., Galkin A.F. *Baza dannykh № 0220611149 «Opasnye i potentsial'no opasnye geotekhnicheskie ob'ekty luzhnoi Iakutii»*. *Elektronnaia baza dannykh. Gosudarstvennyi registr baz dannykh RF. Svidetel'stvo № 10443 ot 26.06.2006* [Database No. 0220611149 "Dangerous and potentially dangerous geotechnical objects of South Yakutia". Electronic database. State Register of Databases of the Russian Federation. Certificate No. 10443 dated 06/26/2006.].
- Iakovlev V.L., Kornilkov S.V. i dr. *Nauchnoe obosnovanie i razrabotka novykh metodov effektivnogo i ekologicheskii bezopasnogo osvoeniia prirodnykh i tekhnogenykh mestorozhdenii Urala* [Scientific substantiation and development of new methods for the efficient and environmentally safe development of natural and technogenic deposits in the Urals]. *Problemy mineragenii Rossii* [Problems of Minerageny of Russia]. Moscow, GTS RAS Publ., 2012, pp. 471–486.
- Iakovlev K.L., Androsov A.D., Shchukin V. E. i dr. *Tekhnologiya razrabotki glubokikh kar'erov Severa v usloviakh merzloty i agressivnykh vod* [Technology for the development of deep open pits of the North in conditions of permafrost and aggressive waters]. Proceedings «*Problemy otkrytoi razrabotki glubokikh kar'erov*» [Problems of open pit mining of deep open pits]. Udachny, 1991, pp. 45–51.
- Shatz M.M., Skachkov Yu.B. Key trends and implications for contemporary climate dynamics of the north // *Climate and nature*, no. 1(4), 2017, pp. 19–31.