УДК 622:504.433

Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н)

Р.Э.ДАШКО, И.С.РОМАНОВ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Как цитировать эту статью: Дашко Р.Э. Прогнозирование горно-геологических процессов на основе анализа подземного пространства рудника Купол как многокомпонентной системы (Чукотский автономный округ, Анадырский р-н) / Р.Э.Дашко, И.С.Романов // Записки Горного института. 2021. Т. 247. С. 20-32. DOI: 10.31897/PMI.2021.1.3

Аннотация. Подземное пространство месторождения Купол анализируется как многокомпонентная система – горные породы, подземные воды, микробиота, газы (в том числе рудничная атмосфера) и несущие конструкции – металлическая крепь и торкрет-бетон (в качестве дополнительного вида крепления), а также закладочные материалы. Комплекс вмещающих пород имеет высокую дезинтегрированность за счет активной тектонической и вулканической деятельности в меловом периоде. Мощность многолетнемерзлых пород достигает 250-300 м. В 2014 г. в них было установлено наличие криопэггов с аномальной минерализацией и pH, что привело к разрушению металлических крепей и образованию вывалов. Подземные воды подмерзлотного водоносного горизонта по химическому составу хлоридно-сульфатные натриево-кальциевые с минерализацией 3-5 г/дм³. Согласно микробиологическому анализу в них присутствуют анаэробные и аэробные формы микроорганизмов, в том числе микромицеты, бактерии и актиномицеты. Деятельность микроорганизмов сопровождается генерацией сероводорода и диоксида углерода. Рассмотрены основные виды коррозии – химическая (сульфатная и уголекислотная), электрохимическая и биокоррозия. К наиболее опасной относится биокоррозия, связанная с активной деятельностью микробиоты. Прогнозирование и систематизация горно-геологических процессов выполнены с учетом наличия двух зон по глубине – многолетнемерзлых пород и ниже подошвы мерзлоты, где в настоящее время ведутся горные работы. Показана важность оценки подземного пространства как многокомпонентной среды при прогнозировании горно-геологических процессов, что может служить основой создания и развития комплексного специализированного мониторинга в сложных инженерно-геологических условиях рассматриваемого месторождения.

Ключевые слова: многокомпонентная система; подземное пространство; многолетнемерзлые породы; криопэгги; газы; микробиота; биокоррозия; безопасность

Введение. Теория и практика мирового опыта освоения и использования подземного пространства (ПП) горнопромышленных регионов и мегаполисов свидетельствуют о том, что выбор технологии освоения обычно базируется на схематическом учете пород (грунтов) в разрезе и обосновании напряженно-деформированного состояния (НДС) массива (толщи) с использованием линейной, а чаще нелинейной (упруго-пластической) задачи оценки устойчивости выработок в период их строительства и эксплуатации. Однако выполненный комплексный анализ возникновения и развития аварийных и предаварийных ситуаций при решении поставленной проблемы в европейских странах и странах юго-восточной Азии диктует необходимость принципиального изменения такой концепции, как не отвечающей сложности реальных условий при решении задач повышения безопасности и эксплуатационной надежности, а также снижения риска при добыче полезного ископаемого (ПИ) подземным способом, либо освоению ПП в мегаполисах и крупных городах [5, 18].

Подземное пространство следует анализировать как многокомпонентную систему, в которой горные породы либо грунты (первый компонент) рассматриваются как вмещающая среда для подземных вод (второй компонент), которые характеризуются непостоянством гидродинамического режима, сложным химическим составом, изменчивостью физико-химических и биохимических условий в процессе производства подземных горных работ и эксплуатации подземных сооружений. Необходимо учитывать наличие и активную деятельность подземных микроорганизмов (третий компонент), которая должна рассматриваться с позиции ее влияния на породы, подземные воды, а также конструкционные материалы. К четвертому компоненту ПП относятся газы различного генезиса – биохимические (продукт деятельности микроорганизмов, прежде всего, в анаэробной среде),

а также глубинные и каталитические. К пятому компоненту системы, который испытывает воздействие всех составляющих ПП, должна быть отнесена крепь подземных горных выработок. Обоснование выбора крепления в практике ведения горных работ обычно производится в зависимости от степени дезинтегрированности пород, их способности к развитию деформации толщи и формированию гравитационных процессов, типа и размеров выработки, ее глубины и ориентации в пространстве, а также срока службы.

В практике проектирования и эксплуатации подземных выработок обычно не уделяется должного внимания агрессивности воздействия подземных вод и газов различного генезиса, полностью игнорируется деятельность подземных микроорганизмов по отношению к материалам крепи.

Вопросами безопасности ведения горных работ в 21 в. в Санкт-Петербургском горном университете занимались: А.Н.Шабаров, Ю.И.Кутепов, Н.А.Кутепова, В.Л.Трушко, В.П.Зубов, А.Г.Протосеня и др., в том числе проблемами устойчивости подземных горных выработок на больших глубинах, оптимизацией систем разработки для повышения надежности при создании проектов эксплуатации новых месторождений [17, 34, 35], геодинамического мониторинга [19], последствиям проходки горных выработок в обводненных массивах при угрозе прорывов подземных вод [20, 21].

Методология. Примером объекта, где был использован и успешно зарекомендовал себя подход к ПП как многокомпонентной системе в горной отрасли, служит Яковлевский рудник Белгородской группы месторождений КМА [10, 13, 15]. В течение 17 лет прогнозирование и управление опасными горно-геологическими процессами велось на основе анализа многокомпонентности подземной среды, при этом влияние подземных вод и специфика их химического и биохимического состава, а также физико-химические условия водной среды имели принципиальное значение при оценке безопасности ведения горных работ [11, 28]. Определение величины окислительно-восстановительного потенциала E_h , mV и кислотно-щелочных условий pH водоносных горизонтов проводилось непосредственно в подземных выработках. Изучение микробиологии и биохимии подземных вод было реализовано для трех основных водоносных горизонтов, что позволило оценить негативное воздействие микробиоты на закладку выработанного пространства из легких бетонов, а также причины преждевременного разрушения различных типов крепления, в том числе арочной крепи. На Яковлевском руднике впервые было определено негативное воздействие биохимических газов, таких как диоксид углерода и сероводород (продукт жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий), а также воздействие глубинного газа – радона, который способствовал активизации микробной деятельности и соответственно биокоррозионных процессов. Характер разрушения материалов крепления под действием богатого биоценоза с участием железовосстанавливающих бактерий исследован с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) (рис.1).

Комплексация методов исследований (СЭМ и рентгенофазового анализа РФА) позволила установить характер коррозии металлического крепления путем образования новых железистых минералов: лепидокрокита ($FeOOH$) и гетита ($\alpha-FeOOH$) под действием богатого биоценоза в подземных водах [4]. Образование оксигидрооксидов железа значительно ускоряет процессы коррозии, а увеличение объема вызывает напряжения в коррозионных слоях на металле, что приводит к возникновению трещин и прочих повреждений. Основные разрушения арочной крепи вызывают железовосстанавливающие бактерии за счет восстановления железа $Fe^0 \rightarrow Fe^{2+}$ и последующего ее выноса, что значительно ослабляет структуру металла и вызывает пластические деформации крепи под действием относительно невысоких величин горного давления.

Рис.1. Изъеденная поверхность металла (фото Д.Ю.Власова)

Рис.2. Взаимосвязь компонентов подземного пространства

Использование опыта оценки ПП как многокомпонентной системы на Яковлевском руднике дает возможность выполнить на той же основе прогнозирование горно-геологических процессов в подземных выработках месторождения Купол (рис.2), которое разрабатывается в толще многолетнемерзлых грунтов и приурочено к зоне Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса (ОЧВП). Отметим необходимость использования современных стратегий в технологических инновациях горнодобывающего сектора экономики [22]. Золото-серебряное месторождение Купол разрабатывается российским предприятием ОА «Чукотская горно-геологическая компания», входящим в группу канадской компании Kinross Gold Corporation.

Обсуждение. В разрезе месторождения прослеживается комплекс осадочных, вулканогенно-осадочных, вулканогенных и эффузивных пород верхних отделов меловой системы (K_2^2 - K_2^3). Они представлены лавами флюидалных афировых риолитов желтовато-серой окраски и их туфами с явным преобладанием последних, которые залегают согласно на подстилающей средней толще верхнего мела. В составе толщи преобладают туфы, кластолавы и лавы риолитов и трахириолитов, реже – игнимбриты риолитового состава, андезиты, дациты и их туфы. Изучение петрографического состава руд в данном регионе отражены в следующих работах [1, 2, 7, 8, 23].

Месторождение Купол расположено на сочленении Средне-Кайемравеевского разлома меридионального простираения с Крестовско-Саламихинским разломом глубинного заложения 1-го порядка (рис.3) [9, 16, 26]. Породы по всей глубине разработки относятся к интенсивно трещиноватым согласно инженерно-геологической классификации: модуль трещиноватости по результатам бурения достигает 6-10 трещин на 1 м, расстояния между трещинами составляют 0,1-0,65 м [14]. Категория трещиноватости пород с помощью акустического показателя A_1 на руднике Купол не определялась.

По результатам проведенных ранее исследований вмещающих горных пород были предложены в качестве основного вида крепления на руднике трубчатые фрикционные анкера с металлической сеткой, а на участках, подверженных интенсивному вывалообразованию, торкрет-бетон, полимерные смеси или трос-анкера. Опасность гравитационных процессов (обвалов, вывалов и др.) усугубляется производством буровзрывных работ при проходке выработок и добыче полезного ископаемого. Формирование вывалов чаще всего происходит по контактам трещин тектонических разломов, которые были зафиксированы при проведении специализированной съемки в подземных выработках: к наиболее опасным относятся участки с крупноблочной структурой массива, обычно приуроченные к зонам разломов (рис.4).

Рис.5. Водопроявление из технологических скважин анкерного крепления в Северной зоне рудника на гор. +200 м, видны образования гидрооксидов железа (фото И.С.Романова 30.02.2020)

нием заполнителя и др. В качестве примеров можно привести результаты наблюдений за водопроявлениями: трещинно-поровая проницаемость характерна для пепловых туфов андезитов, излив вод из них происходит по малораскрытым трещинам; трещинная проницаемость характерна для массивов плотных пород со слабой трещиноватостью – риолиты, базальты, андезиты; трещинно-жильная проницаемость свойственна туфам разного состава с высокой степенью трещиноватости – сосредоточенный излив вод происходит по зияющим раскрытым трещинам. Прогнозирование прорывов подмерзлотных вод в горные выработки практически не проводится, хотя еще на стадии изысканий было установлено, что подмерзлотный горизонт относится к напорным, верхним водупором которого служит мощная толща многолетнемерзлых пород, достигающая на руднике Купол 250-300 м.

В настоящее время основная часть подготовительных и очистных работ находится ниже подошвы мерзлоты и соответственно повсеместное проявление подмерзлотных вод должно оцениваться с позиции уровня их опасности и вероятности затопления подземных горных выработок: из-за высокой обводненности забоя, при заданной техническим регламентом скорости продвижения забоя за цикл 4,2 м наблюдается уменьшение этого показателя в два раза. Такой показатель достигается применением современных средств механизации: бурение взрывных шпуров производится самоходной буровой установкой (СБУ) SandvikDD 420-40С с длиной буровой штанги 4915 мм; зарядание взрывных скважин механизированным способом с использованием пневмозарядчика Anfo42-01R, установленного на самоходное шасси и оборудованного гидравлическим подъемником. В качестве ВМ применяются гранулированные ВВ на основе аммиачной селитры; уборка взорванной горной массы производится погрузо-доставочной машиной САТ-1700 с объемом ковша 6,6 м³; крепление горной выработки реализуется СБУ для установки анкерной крепи SandvikDS 410-С, SandvikDS 411-С. СБУ оборудованы стрелой с буровым модулем для бурения шпуров и установки фрикционных анкеров и стрелой для захвата и установки сварной сетки. Величина продвижения забоя за цикл в объеме 4,2 м на предприятии определялась, исходя из технико-экономических показателей с учетом минимальной стоимости 1 м проходки горной выработки и производительности горного оборудования. При применении вышеперечисленных средств механизации полный цикл проходческих работ на месторождении занимает две смены

По результатам проведенной гидрогеологической съемки в 2014 г. в горных выработках, на горизонте + 440 м (глубина 68 м) в толще мерзлых породах было установлено наличие криопэггов, имеющих хлоридно-сульфатный, кальциево-магнийевый состав, аномальную минерализацию 445, 27 г/дм³, и весьма низкие значения pH, равные 1,96. В зоне влияния криопэггов с высокой кислотностью наблюдалась интенсивная коррозия металлических конструкций – анкеров и сетки, что вызвало обрушение выработки на протяжении 40-50 м. Разрушенные анкера представляли «частокол» из обломков охристого цвета. Такие же цвета отмечались и для разорванной сетки рабицы. Наличие криопэггов установлено в Якутии, в тундровой зоне Колымской низменности на побережье Восточно-Сибирского моря и др. [3, 24, 27].

В настоящее время основной фронт развития горных работ сосредоточен ниже зоны многолетнемерзлых пород, где наблюдается активное проявление подмерзлотных вод с температурой 1-2 °С и минерализацией 3-5 г/дм³ [12] (рис.5).

В большинстве случаев интенсивное поступление подмерзлотных вод в горную выработку связано с характером трещиноватости пород – степенью раскрытия трещин, их протяженностью, нали-

продолжительностью 11 ч, что является самым оптимальным вариантом для предприятия. Кроме того, необходимо учитывать коррозионную способность подземных вод по отношению к материалам крепления – металлам (трубчатые фрикционные анкера, металлическая сетка и трос-анкера), торкрет- и полимербетонам.

Коррозионная способность подземных вод в горных выработках должна анализироваться по следующим позициям:

- окислительно-восстановительные и кислотнo-щелочные условия по величине E_h , mV (окислительно-восстановительные потенциал) и pH, которые должны замеряться *in situ* с помощью селективных электродов;
- химический состав подземных вод по расширенному списку, включая показатели содержания легкоокисляемой органики (перманганатная окисляемость) и общее количество органических компонентов – химическое потребление кислорода (ХПК), определяющие величину E_h , mV;
- микробиологическая и биохимическая специфика подземных вод, которая оценивается по величине БПК₅ (биологическое потребление кислорода в течение 5 дней), а также с помощью посевов на селективные среды и генно-молекулярного анализа.

Такие исследования были выполнены впервые для условий рудника Купол (таб.1).

Таблица 1

Химический состав подземных вод подмерзлотного водоносного горизонта

Определяемые показатели	Результаты исследования	Нормативные документы
Натрий, мг/дм ³	318	ФР.1.31.2011.10615
Калий, мг/дм ³	7,2	ФР.1.31.2011.10615
Кальций, мг/дм ³	336	ФР.1.31.2011.10615
Магний, мг/дм ³	137	ФР.1.31.2011.10615
Аммоний – ион, мг/дм ³	0,11	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10
Железо общее, мг/дм ³	0,40	ФР.1.31.2011.10615
Гидрокарбонат-ион, мг/дм ³	169	ГОСТ 31957-2012
Хлорид-ион, мг/дм ³	85	ПНД Ф 14.1:2:3.96-97
Сероводород, мг/дм ³	<0,002	ПНД Ф 14.1:2:4.178-02
Сульфат-ион, мг/дм ³	1770	ПНД Ф 14.1:2:159-2000
Нитрат-ион, мг/дм ³	<0,1	ПНД Ф 14.1:2:4.4-95
Кремниевая кислота (по Si), мг/дм ³	<0,05	НДП 10.1:2:3.100-08
ХПК, мгО ₂ /дм ³	14	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97
Перманганатная окисляемость, мгО ₂ /дм ³	2,6	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99
БПК ₅ , мгО ₂ /дм	2,3	ПНД Ф 14.1:2:3.123-97
Водородный показатель (полевые замеры), ед.рН	7,2 (7,0)	ПНД Ф 14.1:2:3.121-97
Сухой остаток, мг/дм ³	2770	ПНД Ф 14.1:2:3.261-10
Жесткость общая, °Ж	28	ГОСТ 31954-2012
Углекислота свободная, мг/дм ³	11	ФР.1.31.2005.01580
Нефтепродукты, мг/дм ³	0,017	ПНД Ф 14.1:2:4.128-98

Примечание. Химический анализ воды был выполнен в лаборатории ООО «Центр экоаналитических услуг «ОПЫТ» 03.06.2020 г.

Высокое содержание сульфатов в воде связано с окислением сульфидов (основных минералов, в парагенезисе с которыми содержится золото и серебро), наличием тионовых бактерий, вырабатывающих серную кислоту, и биохимического сероводорода. Кроме того, в подземных водах присутствуют щелочные (Na^+) и щелочно-земельные элементы (Ca^{2+} и Mg^{2+}), причем последние определяют ее высокую жесткость, достигающую 28 °Ж. Однако, величина pH свидетельствует о нейтральной среде, что вызвано подкислением вод за счет сульфатной составляющей и биохимических процессов генерации H_2S .

Подмерзлотный водоносный горизонт относится к водным системам с активной микробной деятельностью на месторождениях Купол и Майское, что доказано микробиологическими исследованиями, которые выполнялись в 2019-2020 гг. в Санкт-Петербургском государственном университете под руководством и при непосредственном участии профессора Д.Ю.Власова. Следует подчеркнуть, что окислительно-восстановительные условия в подмерзлотном водоносном горизонте с затрудненным водообменом за счет наличия регионального водоупора – толщи многолетнемерзлых пород обычно характеризуются отрицательными значениями E_h . Подземные воды на

Яковлевском месторождении имели величину E_h , равную $(-78 \div -85) \text{ mV}$, замеренную на горизонте -425 м . Бескислородные условия в водоносных горизонтах определяют наличие гетеротрофных анаэробных микроорганизмов – сульфатредуцирующих бактерий и железовосстанавливающих. Важно, что железобактерии относятся к психрофильным группам микроорганизмов, которые хорошо развиваются при 4°C и более низких температурах [29]. Как известно, сульфатредуцирующие бактерии (мезофильные формы микроорганизмов) генерируют образованию сероводорода и рассматриваются как толерантные к низким температурам.

Изучение третьего компонента – подземной микробиоты на руднике было начато в связи с тем, что особенности развития коррозии металлических крепей на руднике Купол подобны характеру их разрушения на Яковлевском руднике КМА, где была установлена биокоррозионная природа разрушения крепей и бетонов закладки. Такие же исследования проводились и на месторождении Майское, расположенном в 300 км от рудника Купол. Были отобраны пробы подземных вод, материалов разрушенного металлического крепления, деревянной забутовки и глинки трения. Проба на рудниках Купол и Майское отбирались с обязательным соблюдением правил стерильности. Определение групп, видов, родов и численности микроорганизмов проводилось с помощью посевов на питательные жидкие и твердые среды, и микроскопических исследований.

В результате анализа были установлены микромицеты, бактерии и актиномицеты. Доминирующий род микромицетов в подземной воде – *Aspergillus*, а в пробах разрушенных материалов крепи – *Penicillium*, *Aspergillus*, *Trichoderma*, *Cladosporium*, которые играют существенную роль в процессе разрушения крепежных материалов. Среди выявленных микромицетов преобладают виды, которые были привнесены человеком в пространство рудника, а также поступают с потоком вентиляционного воздуха. Виды рода *Penicillium*, способные развиваться при пониженных температурах, могли находиться в мерзлоте и адаптироваться в условиях мерзлой толщи. Это род может быть отнесен к психрофилам.

Бактериологический анализ показал присутствие широкого спектра бактерий. Численность аэробных органотрофных бактерий варьирует в пределах $1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^7$ КОЕ в 1 мл воды или 1 г породы. Выделена группа психрофильных микроорганизмов представлена в основном железобактериями – железовосстанавливающими и железоокисляющими, а также мезофильными группами, которые проявили толерантность к низким температурам. Среди бактерий преобладающими морфотипами были слизистые колонии различной окраски, которые чаще всего относятся к железомокисляющим формам. В пробах металлических конструкций отмечено также присутствие тионовых бактерий, которые генерируют серную кислоту и вызывают коррозию металла в аэробной среде. В качестве питательных веществ психрофилы используют адаптированные к холоду ферменты (белки), что дает им дополнительный субстрат для роста и развития, а при более низких температурах – для поддержания жизни.

Первые исследования микроорганизмов, которые были обнаружены в многолетнемерзлых породах и в ископаемых льдах, были начаты известными российскими микробиологами В.М.Омелянским в Якутии и Б.Л.Исаченко на Дальнем Востоке в 1911 и 1912 г. соответственно. Большой объем микробиологических исследований был выполнен на полярных станциях в Антарктиде американскими и российскими исследователями в 70-90-х годах 20 в. Выполненные экспериментальные работы (1985-1993) Д.Г.Звягинцевым, Д.А.Гиличинским, Г.М.Хлебниковой и др. показали, что в мерзлой толще пород с температурой -12°C может содержаться до 10^8 кл. микроорганизмов в 1 г. Выделенные микроорганизмы большей частью относились к психрофильным группам, 95 % этих клеток не росли при температуре выше 30° , среди них были выделены сульфатредуцирующие и метаногенерирующие бактерии, анаэробные актиномицеты.

В 21 в. микробиологические исследования в разрезах мерзлоты значительно расширились. По результатам исследований институтов РАН, МГУ им. Ломоносова в Арктике, тундровой зоне Колымской низменности у побережья Восточно-Сибирского моря, в водонасыщенных горизонтах по оврагам Варандей, в районе оз. Якутское Колымской низменности были установлены различные формы микроорганизмов (от единиц до сотен тысяч КОЕ в 1 г воздушно-сухого грунта или 1 мл минерализованной воды) [6, 25, 31-33]. В настоящее время в горных выработках следует изучать деятельность аборигенных форм микроорганизмов (в толще мерзлых пород, в криопэгах и подмерзлотных водах), а также привнесенных микроорганизмов. Деятельность микроорганизмов должна рассматриваться, прежде всего, с позиции развития биокоррозионных процессов в креплениях конструктивных материалах крепей.

Четвертый компонент – газы, был изначально обнаружен при отборе проб подмерзлотных вод по характерному запаху сероводорода, что было подтверждено лабораторными исследованиями. Низкое значение сероводорода (H_2S) в пробе связано с высокой скоростью окисления этого газа, что сопровождается повышением содержания иона SO_4^{2-} . Наличие сероводорода служит показателем наличия анаэробной среды в подмерзлотной воде. Продуктом дыхания микроорганизмов служит диоксид углерода (CO_2), величина которого достигала 300 мг/дм^3 в условиях Яковлевского рудника. Эти газы агрессивны по отношению к конструкционным материалам – CO_2 к бетонам, H_2S – к металлам и бетонам.

Как отмечалось ранее, в местах разгрузки подмерзлотных вод наблюдается активная коррозия конструктивных элементов металлического крепления. Необходимо учитывать анаэробные условия в подземных водах, что предполагает протекание электрохимических процессов, развитие которых приводит к утончению металлических конструкций за счет восстановления железа $Fe^0 \rightarrow Fe^{2+}$. Высокое содержание сульфат-иона предполагает возможность проявления сульфатной коррозии в бетонах, сопровождающейся образованием гидросульфатоалюмината кальция ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 3H_2O$). Известно, что генерация этого цементоподобного минерала в виде кристаллогидратов способствует значительному увеличению объема материала за счет кристаллизационного давления более 10 МПа, что приводит к дезинтеграции бетона.

На руднике Купол основной вид крепления трещиноватых пород – трубчатые фрикционные анкеры в паре с металлической сеткой. При визуальном осмотре крепления было отмечено, что на всех участках крепь подвержена активной коррозии (рис.6). Этот факт заставил более детально проанализировать генезис коррозии и ее развитие: на предприятие крепь поставляется новой, а коррозия развивается буквально за считанные дни. Об активности биокоррозии свидетельствуют выполненные наблюдения (рис.7). Часть материала новой анкерной крепи складировалась в непосредственной близости к проходческому забою. На фотографиях видны точечные проявления коррозии, вызванные капеежом подмерзлотных вод в течение 4 ч. Образование слизистого налета на металле вызывается деятельностью железобактерии *Gallionella ferruginea*. Помимо коррозии металлического крепления, присутствует также биокоррозия торкрет-бетона [30].

Скорость развития биокоррозии обычно на порядок выше химической коррозии, что при отсутствии специализированного мониторинга может привести к формированию вывалов большого объема.

На основе анализа подземного пространства как многокомпонентной среды выполнено прогнозирование и систематизация горно-геологических процессов на руднике Купол, наблюдения и контроль за которыми должны быть включены в систему комплексного мониторинга на действу-

Рис.6. Коррозия металлических пластин
Северного участка месторождения Купол, гор. +400 м
(фото И.С.Романова 05.12.2019)

Рис.7. Проявление биокоррозии
на новых трубчатых фрикционных анкерах
(фото И.С.Романова 15.03.2020)

ющем горнодобывающем предприятии в сложных инженерно-геологических условиях, что будет способствовать повышению безопасности ведения горных работ.

Систематизация горно-геологических процессов выполнена для двух зон: первая – в пределах гор. +525 м - +300-250 м, зона многолетнемерзлых пород; вторая – гор. +300 м - +250 м ниже подошвы мерзлоты. Систематизация ведется по семи параметрам (табл.2).

Результаты. Прогнозирование опасных горно-геологических процессов на руднике Купол проведено на основе анализа ПП как многокомпонентной системы: горные породы, подземные воды, микробиота, газы и конструкционные материалы крепей, которые находятся в тесной связи друг с другом. Изменение одного из компонентов влечет за собой нарушение в работе всей системы снижение уровня безопасной эксплуатации месторождения.

Особенности положения месторождения Купол в узле тектонических разломов предопределило его формирование в условиях активной тектонической деятельности и протекания гидротермальных процессов в верхнемеловое время, специфику строения рудного тела и высокую степень дезинтегрированности различных петрографических типов вмещающих горных пород. Сложные горно-геологические условия диктуют необходимость использования в качестве основного крепления трубчатые фрикционные анкера в паре с металлической сеткой, а на особо сложных участках дополнительно трос-анкера и (или) торкретбетон, либо полимербетон.

Месторождение расположено в зоне развития многолетнемерзлых пород мощность на 250-300 м. В толще мерзлоты на отметке +440 м выявлены криопэги с аномально высокой минерализацией и чрезвычайно низким значением pH. Воздействие криопэгов на металлическую крепь привело к ее быстрому разрушению и формированию вывалов пород в кровле. Подмерзлотный водоносный горизонт характеризуется напорно-безнапорным режимом и может быть отнесен к водным системам с затрудненным водообменом, что предполагает наличие восстановительной (бескислородной) среды с величиной окислительно-восстановительного потенциала $E_h < 0$ (по аналогии с водоносными горизонтами Яковлевского рудника КМА). Подземные воды хлоридно-сульфатные натриево-кальциевые, солоноватые с минерализацией 3-5 г/дм³ имеют высокую жесткость за счет присутствия щелочно-земельных элементов, но нейтральную реакцию воды.

Экспериментально доказано, что подземные воды служат основным источником поступления микроорганизмов, среди которых были выделены микромицеты и железобактерии, при этом последние относятся к психрофилам. Среди железобактерий установлены аэробные формы железooksисляющие и анаэробные (железовосстанавливающие), что имеет принципиальное значение при рассмотрении коррозии металлических крепей. Зафиксировано наличие мезофильных форм микроорганизмов – сульфатредуцирующих (анаэробных) и тионовых (аэробных), которые рассматриваются как толерантные по отношению к низким температурам в подземной среде. Микробиологические исследования, выполненные в криопэгах и мерзлых грунтах в 20-21 вв. институтами РАН, МГУ и др., подтверждают наличие различных физиологических групп микроорганизмов не только психрофильных форм, но и мезофилов, которые устойчиво развиваются при низких температурах.

Деятельность сульфатредуцирующих бактерий сопровождается генерацией сероводорода, что устанавливается по отчетливому запаху при разгрузке подземерзлотных вод в горные выработки. Как известно, этот газ легко окисляется, однако его присутствие было зафиксировано при анализе химического состава подмерзлотных вод. Деятельность микроорганизмов сопровождается также образованием CO₂, который рассматривается как продукт их дыхания. Наличие H₂S опасно для бетонов и металлов, принимая во внимание, что этот легко растворимый газ приводит к снижению pH ниже 4.

Коррозионные процессы крепей необходимо рассматривать как опасные. Согласно выполненным исследованиям по своей природе они могут быть подразделены на химическую коррозию, к которой относится сульфатная и уголекислотная, биокоррозия и электрохимическая. Наиболее опасна биокоррозия, скорость протекания которой на порядок выше химической коррозии. Этот вид коррозии происходит за счет метаболитов микроорганизмов – кислот, газов, а также ферментов (энзимов) и непосредственной деятельности клеток микробиоты, образующих биопленки на поверхности крепей. Необходимо также анализировать высокую вероятность электрохимических процессов стали, приводящих к ионизации атомов металла ($Fe^0 \rightarrow Fe^{2+}$) в восстановительных условиях и утоньшению конструкций крепи.

Таблица 2

Систематизация горно-геологических процессов в подземных выработках рудника Купол
в зоне многолетнемерзлых пород и вне ее

Генетический тип процесса	Уровень опасности	Наименование процесса	Основные факторы, определяющие развитие процесса	Масштаб проявления	Развитие во времени	Негативные последствия процесса
1	2	3	4	5	6	7
Зона ниже подошвы многолетнемерзлых пород (ниже гор. +300 м - +250 м)						
Эндемичный (природный)	Высокий	Избыточные тектонические напряжения	Структурно-тектонические особенности района в зоне альпийской складчатости и активных современных движений	На всех горизонтах ниже абсолютной отметки +250 м в подмерзлотной толще	Постоянное	Возможность развития горных ударов в наименее трещиноватых породах, разрушение крепей в условиях выполнения расчетов без учета избыточных напряжений, деформации бортов выработок, «стреляние» горных пород
		Гравитационные процессы в кровле и бортах выработок: обвалы, вывалы различных объемов	Особенности геологического строения: ослабленные участки туфов и секущих даек в зонах тектонических разломов	Повсеместное в рудном теле	Часы	Нарушение устойчивости кровли, стабильности ведения горных работ, повышение риска травматизма, материальные затраты на ликвидацию последствий
Экзотенные (природно-техногенные)	Высокий	Формирование локальных куполов в андезитах	Интенсивная тектоническая трещиноватость и разрушение анкерной крепи	Локальное	Часы, дни	
		Водопроявление подмерзлотных вод	Разгрузка напорного водоносного горизонта в зонах активной трещиноватости	Локальное в зонах вмещающих породах	Дни, недели	
		Развитие сульфатной агрессивности подмерзлотных вод по отношению к бетонам	Высокие значения содержания сульфат-ионов в подмерзлотных водах	Локальное затопление выработок	Постоянное	Негативное влияние на скорость ведения горнопроходческих работ
		Коррозия металлической крепи	Присутствие микробиоты и психрофильных групп бактерий, в том числе железобактерий и железобактериальных видов, а также сульфатредуцирующих	Локальное, в зонах разгрузки подмерзлотных вод	Дни, недели	Интенсификация гравитационных процессов на участках разрушения
		Коррозия торкрет-бетона	Сульфатная агрессивность подземных вод и биокоррозионные процессы при деятельности сульфатредуцирующих бактерий	Локальное	Месяцы, годы	Преждевременный износ и прогрессирующее разрушение крепи
		Биохимическая агрессивность подмерзлотных вод	Химический состав вод как источник питательных и энергетических субстратов для развития микроорганизмов	Повсеместно в подземных водах	Постоянно	Активное развитие биокоррозии конструктивных материалов в горных выработках на участках водопроветания

Окончание табл. 2

Генетический тип процесса	Уровень опасности	Наименование процесса	Основные факторы, определяющие развитие процесса	Масштаб проявления	Развитие во времени	Негативные последствия процесса
1	2	3	4	5	6	7
Зона многолетнемерзлых пород (выше гор. +300 м - +250 м)						
Экзогенные (природно-техногенные)	Высокий и весьма высокий	Наличие локальных кризгов с аномальной минерализацией и низким значением pH<2	Отдельные участки в зоне многолетнемерзлых пород	Локальные	Сутки	Полное разрушение крепления в течение короткого времени и обрушение кровли пород
		Вывалы	Дезинтеграция рудных тел в узлах тектонических разломов при интенсивной трещиноватости пород	Локальный	Часы	Местное нарушение устойчивости забоя и кровли выработок
		Деформации оседания кровли и бортов выработок при ведении очистных работ	Нарушение технологии режима закладочных работ: отставание от скорости ведения очистных работ	Локальный	1-7 дней	Локальное смещение блоков пород в кровле и бортах выработок
	Средний и низкий	Усиление дезинтеграции (трещиноватости) пород в кровле и бортах выработок	Ведение буровзрывных горнопроходческих работ	Узколокальный	Часы	Интенсификация вывалов пород в кровле и бортах горных выработок
		Растепление многолетнемерзлых пород	Поступление теплого воздуха при вентиляции выработок в летний период	Локальный	Конец июня, июль, начало августа	Снижение прочности трещиноватой толщи горных пород в кровле и бортах выработок
		Коррозия анкерной крепи и металлической сетки	Воздействие психрофильных форм микроорганизмов	На всех горизонтах	Месяцы, годы	Вероятность формирования вывалов большого объема
		Коррозия торкрет-бетонов	Воздействие психрофильных форм микроорганизмов	На всех горизонтах	Месяцы, годы	Интенсификация процессов выветривания горных пород в кровле и бортах выработок, вероятность опасных гравитационных процессов

Проведенный анализ и составленная систематизация опасных горно-геологических процессов на руднике Купол могут быть использованы как основа для создания и развития комплексного специализированного мониторинга в качестве инструмента контроля и наблюдения, при этом возникает возможность управления безопасностью ведения горных работ, сложность которых будет только расти по мере увеличения глубины разработки в подмерзлотной толще с высокой степенью обводнения выработок и коррозионной способностью подземных вод.

ЛИТЕРАТУРА

1. Au-Ag эпitherмальное месторождение двойное (п-ов Чукотка, Россия) / А.В.Волков, Н.Е.Савва, Е.Е.Колова и др. // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 6. С. 590-609. DOI: 10.1134/S0016777018060060
2. Алексеев В.И. Термобарические условия кристаллизации гранитов северного массива (Чукотка) по данным изучения полевых шпатов // Записки Горного института. 2009. Т. 183. С. 160-166
3. Алексеев В.Р. Криопэги – жидкая мерзлота // Наука и техника Якутии. 2014. № 2 (27). С. 64-74.
4. Алексеев И.В. Развитие комплексного инженерно-геологического и микробиологического мониторинга на Яковлевском руднике для повышения безопасности ведения очистных работ под неосушенными водоносными горизонтами: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук / Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2015. 20 с.
5. Брандль Х. Разрушение глубокого котлована в условиях городской застройки // Развитие городов и геотехническое строительство. 2008. № 12. С.170-179.
6. Брушков А.В. Криобиология и микробиология мерзлых пород // Материалы Пятой конференции геокриологов России, 14-17 июня 2016, Москва, Россия. М.: Университетская книга, 2016. С. 201-209.
7. Волков А.В. Перспективы развития добычи золота в Чукотском автономном округе / А.В.Волков, А.Л.Галямов, А.А.Сидоров // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4(28). С. 83-97. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-4-83-97
8. Вулканогенные пояса окраинноморской литосферы северо-востока России и их рудоносность / А.А.Сидоров, А.В.Волков, А.Д.Чехов и др. // Вулканология и сейсмология. 2011. № 6. С. 21-35.
9. Глухов А.Н. Региональная геологическая позиция, структура и минералого-геохимическая позиция месторождения Купол // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2008. № 3. С. 34-45
10. Гусев В.Н. Основные принципы организации и развития гидрогеомеханического мониторинга в подземных выработках Яковлевского рудника / В.Н.Гусев, Р.Э.Дашко, Н.С.Петров // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 149-158.
11. Дашко Р.Э. Комплексный мониторинг подземных вод на Яковлевском месторождении богатых железных руд и его роль в повышении безопасности ведения горных работ в условиях неосушенных водоносных горизонтов / Р.Э.Дашко, Е.Н.Ковалева // Записки Горного института. 2016. Т. 190. С. 78-85.
12. Дашко Р.Э. Мерзлотно-гидрогеологический фактор при анализе и оценке устойчивости выработок и безопасности ведения горных работ на золото-серебряном месторождении «Купол» (ЧАО, Анадырский р-н) / Р.Э.Дашко, И.С.Романов // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2020. № 4. С. 21-28. DOI: 10.31857/S0869780920040037
13. Дашко Р.Э. Микробная деятельность в подземных выработках и ее влияние на свойства богатых железных руд и конструктивных материалов / Р.Э.Дашко, А.В.Волкова, Д.Ю.Власов // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 165-174.
14. Дашко Р.Э. Оценка устойчивости вмещающих горных пород месторождения Купол на основе анализа их основных физико-механических свойств (Чукотский автономный округ, Анадырский район) / Р.Э.Дашко, И.С.Романов // Арктика и Антарктика. 2020. № 3. С. 115-127. DOI: 10.7256/2453-8922.2020.3.32222
15. Дашко Р.Э. Формирование и развитие горно-геологических процессов в зависимости от изменения инженерно-геологических и гидрогеологических условий на Яковлевском руднике / Р.Э.Дашко, Е.Н.Феллер // Записки Горного института. 2016. Т. 199. С. 151-160.
16. Золоторудные месторождения России / Ред. М.М.Константинов. М.: Акварель, 2010. 349 с.
17. Зубов В.П. Концепция отработки Яковлевского железорудного месторождения на участках богатых железных руд / В.П.Зубов, А.А.Антонов // Записки Горного института. 2006. Т. 168. С. 203-210.
18. Колыбин И.В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях // Развитие городов и геотехническое строительство. 2008. №12. С.90-124.
19. Концепция комплексного геодинамического мониторинга на подземных горных работах / А.Н.Шабаров, С.В.Цирель, К.В.Морозов, И.Ю.Рассказов // Горный журнал. 2017. № 9. С. 59-64. DOI: 10.17580/gzh.2017.09.11
20. Кутепова Н.А. Инженерно-геологическое обеспечение безопасности производства горных работ в водонасыщенных массивах / Н.А.Кутепова, Ю.И.Кутепов, А.Н.Шабаров // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 197-202.
21. Кутепова Н.А. Мониторинг гидрогеомеханических процессов при затоплении шахт Анжеро-Судженска / Н.А.Кутепова, Ю.И.Кутепов, А.Н.Шабаров // Записки Горного института. 2012. Т. 197. С. 215-220.
22. Литвиненко В.С. Инновационное развитие минерально-сырьевого сектора / В.С.Литвиненко, И.Б.Сергеев // Проблемы прогнозирования. 2019. № 6 (177). С. 60-72.
23. Месторождения стратегических металлов арктической зоны / Н.С.Бортников, К.В.Лобанов, А.В.Волков и др. // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57. № 6. С. 479-500. DOI: 10.7868/S0016777015060027
24. Микробиологический анализ криопэггов Варандейского полуострова на побережье Баренцева моря / С.А.Печерицына, В.А.Щербакова, А.Л.Холодов и др. // Микробиология. 2007. Т. 76. № 5. С. 694-701.
25. Распределение микроорганизмов в мерзлых грунтах / В.П.Мельников, В.В.Рогов, А.Н.Курчатова и др. // Криосфера Земли. 2011. Т. 15. № 4. С. 86-90.
26. Савва Н.Е. К проблеме генезиса сульфидов и селенидов золота и серебра на месторождении Купол (Чукотка, Россия) / Н.Е.Савва, Г.А.Пальянова, М.А.Бянкин // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 5. С. 597-609.

27. Структура комплексов микромицетов в многолетнемерзлых грунтах и криопэгах Арктики / С.М.Озерная, Г.А.Кочкина, Н.Е.Иванушкина и др. // Микробиология. 2008. Т. 77. № 4. С. 542-550.
28. Трушко В.Л. Геомеханические и гидрогеологические проблемы освоения Яковлевского месторождения / В.Л.Трушко, А.Г.Протосеня, Р.Э.Дашко // Записки Горного института. 2016. Т. 185. С. 9-18.
29. Шлегель Г. Общая микробиология. М: Мир, 1987. 567 с.
30. A comprehensive study on the risk of biocorrosion of building materials / A.Łowińska-Kluge, D.Horbik, A.Zgoła-Grzeškowiak, E.Stanis, Z.A.Górski // Corrosion Engineering, Science and Technology. 2017. Vol. 52. Iss. 1. P. 13-21. DOI: 10.1080/1478422X.2016.1174326
31. Brouchka A. Permafrost Bacteria in Biotechnology: Biomedical Applications. Psychrophiles / A.Brouchkov, V.Melnikov, L.Kalenova // From Biodiversity to Biotechnology. 2017. P. 541-554. DOI: 10.1007/978-3-319-57057-0-23
32. Gilichinsky D. Microbial Life in Permafrost: A Historical Review / D.Gilichinsky, S.Wagener // Permafrost and Periglacial Processes. 1995. Vol. 6. Iss. 3. P. 243-250. DOI: 10.1002/ppp.3430060305
- Prokaryotic community in Pleistocene ice wedges of Mammoth Mountain / A.Rakitin, A.Beletsky, A.Mardanov et al. // Extremophiles. 2020. Vol 24. P. 93-105. DOI: 10.1007/s00792-019-01138-z
33. Protosenya A.G. Foliation of rock mass around mine workings in mining rockburst-hazardous deposits / A.G.Protosenya, V.L.Trushko, V.V.Karpenko // Journal of Mining Science. 2004. Vol. 40. Iss. 2. P. 113-122. DOI: 10.1023/B:JOMI.0000047853.75177.30
34. Trushko V.L. Prediction of the geomechanically safe parameters of the stopes during the rich iron ores development under the complex mining and geological conditions. / V.L.Trushko, A.G.Protosenya, V.I.Ochkurov // International Journal of Applied Engineering Research. 2016. Vol. 11. Iss. 22. P. 11095-11103.

Авторы: Р.Э.Дашко, д-р геол.-минер. наук, профессор, regda2002@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2469-0910> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), И.С.Романов, аспирант, ivan.romanov.russia.spb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8809-4157> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 21.01.2021.

Статья принята к публикации 01.02.2021.