

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 553.3/.4:556:622

МЕРЗЛОТНО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКТОР ПРИ АНАЛИЗЕ И ОЦЕНКЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВЫРАБОТОК И БЕЗОПАСНОСТИ ВЕДЕНИЯ ГОРНЫХ РАБОТ НА ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ “КУПОЛ” (ЧАО, Анадырский р-н)

© 2020 г. Р. Э. Дашко^{1,*}, И. С. Романов^{1,**}

¹ Санкт-Петербургский горный университет, 21 линия Васильевского острова, 2, Санкт-Петербург, 199106 Россия

*E-mail: regda2002@mail.ru

**E-mail: ivan.romanov.russia.spb@gmail.com

Поступила в редакцию 19.02.2020 г.

После доработки 22.03.2020 г.

Принята к публикации 22.03.2020 г.

Приведена оценка мерзлотно-гидрогеологических условий месторождения “Купол”, которое условно поделено на две зоны по глубине: многолетнемерзлая толща горных пород, которая в данном регионе имеет повсеместное распространение, и породы ниже подошвы многолетнемерзлых пород, в которых на настоящее время сконцентрированы основные горные работы одноименного рудника. Выделены основные проблемы по каждой из зон, на которые необходимо сосредоточить дальнейшие исследования. Проанализированы результаты, полученные ранее по проявлению криопэгов в толще мерзлых пород. Дальнейшие исследования будут проводиться с учетом их воздействия на различные виды крепления. Горные работы ведутся в зоне проявления подмерзлотного водоносного горизонта. Исследован химический состав и влияние подмерзлотных вод на крепление горных выработок. Установлена агрессивность подземных вод по отношению к конструкционным элементам крепления. Повсеместно фиксируется коррозия металлических элементов крепления и их частичное разрушение, вызванное наличием психрофильных микроорганизмов, которые поступают с подземными водами, обеспечивающими наличие питательных и энергетических субстратов для микробиоты.

Ключевые слова: мерзлотно-гидрогеологические условия, многолетнемерзлые породы, крепление, криопэги, подземные воды, коррозия, психрофилы

DOI: 10.31857/S0869780920040037

ВВЕДЕНИЕ

Месторождение “Купол” было открыто в 1995 г. Имрвеевским геохимическим отрядом под руководством В.В. Загоскина, а в 2007 г. началось его промышленное освоение (рис. 1).

В разрезе рассматриваемого района прослеживается комплекс осадочных, вулканогенно-осадочных, вулканогенных и эффузивных пород меловой системы, подразделенной на нижний и верхний отделы. Породы месторождения “Купол”, приуроченного к Каймравеевскому рудному узлу, отнесены к средней и верхней толще верхнего мела (K_2^2 – K_2^3) (рис. 2). Среднее содержание золота в рудных телах месторождения составляет 10–25 г/т, серебра 80–270 г/т. Запасы и ресурсы месторождения, классифицированные в соответствии с международными стандартами,

составляют 188 т Au и 2377 т Ag (данные компании Kinross Gold по состоянию на 01.10.2007 г.) [4, 2].

В силу специфики структурно-тектонической обстановки прослеживается высокая степень дезинтеграции пород, обусловленная наличием разрывных нарушений, складчатости, слоистости и трещиноватости различного генезиса.

Месторождение приурочено к зоне многолетнемерзлых пород (ММП), мощность которых на рассматриваемом участке варьируется в пределах 250–300 м. Поскольку глубина отработки месторождения достигает и превышает 500 м, то горные выработки в настоящее время проходятся в зоне ниже подошвы ММП.

Пространственно Охотско-Чукотский вулканогенный пояс совпадает с водоразделом Северного Ледовитого и Тихого океанов [5]. При веде-

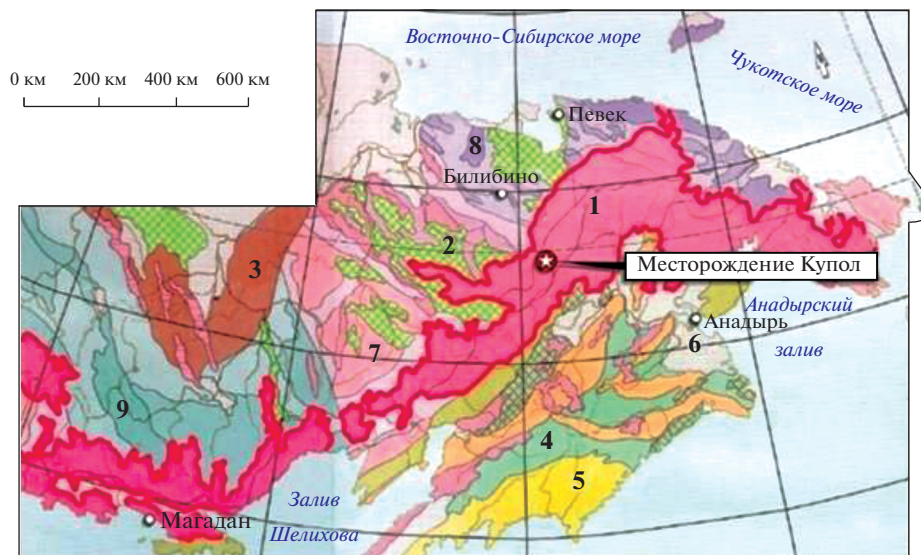


Рис. 1. Положение месторождения в пределах Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (по О.Х. Цопанову, 1994). 1 – Охотско-Чукотский вулканогенный пояс; 2 – скальные, полускальные грунты (магматические, метаморфические и осадочные); 3 – девонская система (средний-верхний отделы); 4 – меловая система (Кампанский ярус); 5 – неогеновая система (плиоцен); 6 – каменноугольная система (верхний отдел)-пермская система; 7 – архей (древнее $2500 \pm \pm$ млн лет); 8 – триасовая система (нижний и средний отделы); 9 – кембрийская система (нерасчлененные отложения).

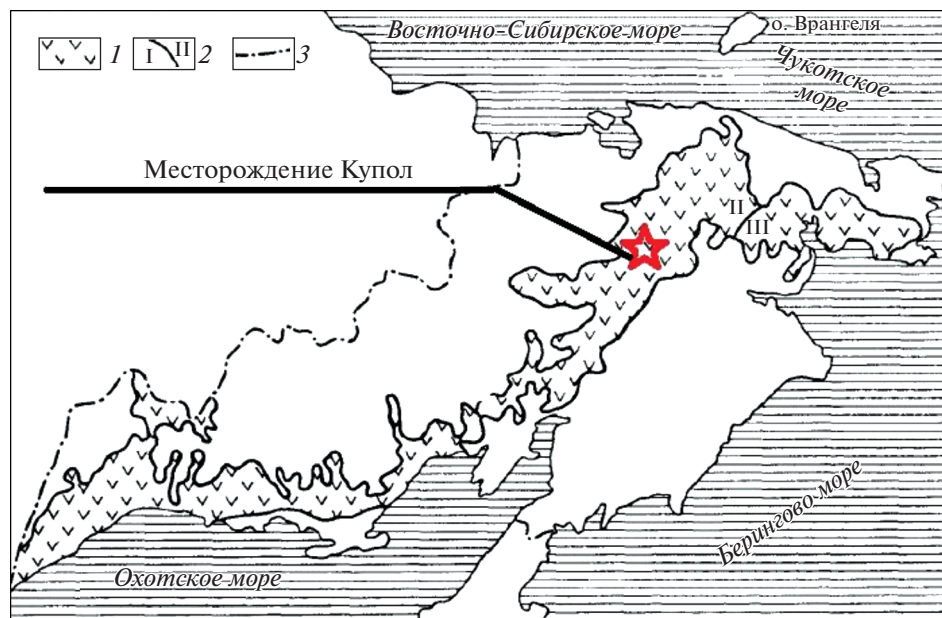


Рис. 2. Районы распространения водоносного комплекса эффузивных пород мелового возраста [3]. 1 – водоносный комплекс эффузивных пород мелового возраста; 2 – граница систем вулканогенных супербассейнов и их номера: I – Приохотская, II – Эвено-Чаунская, III – Восточно-Чукотская, 3 – граница описываемой территории.

нии горных работ принципиальное значение имеет криогенный массив эффузивных и интрузивных пород (K_2), к которому приурочены криопэги, и локально-водоносная (подмерзлотная)

зона трещиноватости вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород (ЛВЗТ, K_2).

По результатам специализированной съемки в горных выработках, на горизонте +440 м от по-

верхности (глубина 68 м) было установлено наличие криопэггов, имеющих аномальную минерализацию 445.27 г/дм^3 , по химическому составу они хлоридно-сульфатные, кальциево-магниевого с весьма низким значением рН 1.96.

Как показали результаты исследований, высокая минерализация криопэггов была установлена в Восточной Сибири, при этом они прослеживаются как в толще ММП, так и ниже ее подошвы. Криопэги формируются при вымораживании пород за счет концентрации солей, растворенных в подземных водах [1].

В настоящее время на месторождении не осуществляется контроль подземных вод, прежде всего, подмерзлотных. На руднике специальные гидрогеологические исследования не проводятся, и отсутствует система мониторинга за их проявлениями.

В большинстве случаев интенсивное поступление воды в горную выработку связано с характером трещиноватости пород — степенью раскрытия трещин, их протяженностью, наличием заполнителя и др. В качестве примеров можно привести результаты наблюдений за водопроявлениями:

- трещинно-поровая проницаемость характерна для пепловых туфов, которые в геологическом описании обозначены как туфы андезитов. Излив вод происходит по всей поверхности и слабо раскрытым трещинам (рис. 3);
- трещинная проницаемость характерна для массивов плотных пород со слабой трещиноватостью — дайки, выполненные риолитами, базальтами, андезитами (рис. 4);
- трещинно-жильная проницаемость свойственна туфам разного состава с высокой степенью трещиноватости; излив вод происходит в основном по зияющим раскрытым трещинам (рис. 5).

В настоящее время на глубине ведения горнопроходческих работ (500 м) наблюдается частичное затопление забоя, что снижает скорость работ: при заданной паспортной величине проходки за один цикл 4.2 м, фактически этот показатель за счет обводнения уменьшается в 2 раза (рис. 6).

Теория и практика ведения горных работ показывает, что подземные воды могут оказывать существенное воздействие как на формирование и изменение напряженно-деформированного состояния массива, особенно при напорных режимах подземных вод, так и на их коррозионную способность по отношению к конструкционным материалам крепления.

Особое внимание следует уделить химическому составу подземных вод и их агрессивности по отношению к конструкционным материалам крепи. На месторождении “Купол” в силу высокой



Рис. 3. Концентрация стока анкером крепления при трещинно-поровой проницаемости пород.



Рис. 4. Породы с трещинной проницаемостью.



Рис. 5. Трещинно-жильная проницаемость в туфах.



Рис. 6. Разгрузка подмерзлотных вод на горизонте +0 м (Северный участок месторождения “Купол”).

степени дезинтеграции пород, о чем говорилось выше, применяются такие виды крепления, как трубчатые фрикционные анкера в паре с металлической сеткой, торкрет бетон и трос-анкера.

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПОДМЕРЗЛОТНОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА МАТЕРИАЛЫ КРЕПИ

Химический состав подмерзлотных вод — сульфатно-гидрокарбонатный, либо сульфатно-хлоридный натриево-кальциевый с повышенной минерализацией 3–5 г/дм³ (табл. 1).

Повышенное содержание сульфатов объясняется окислением сульфидов, которые присутствуют в рудном теле. Повышенные содержания кальция и магния связаны с выщелачиванием подземными водами не только вмещающих горных пород, но и торкрет бетона, который широко используется в качестве вторичного крепления трещиноватых горных выработок.

Обращает на себя внимание также высокая жесткость воды, которая определяется присутствием щелочноземельных и щелочных ионов. Такая жесткость предполагает значение рН > 8. Однако полевые замеры этого показателя в водопрооявлениях в горных выработках свидетельствуют о наличии нейтральной обстановки (рН 7.0). Обычно снижение щелочности наблюдается за счет содержания в воде органических кислот биогенного и абиогенного генезиса. Выполненные

Таблица 1. Химический состав подземных вод подмерзлотного водоносного горизонта (данные аналитической лаборатории ВНИИ 1, г. Магадан, от 30.10.2014 г.)

№ п/п	Определяемые показатели	Ед. изм	Номер пробы, содержание компонентов				Шифр методики
			2106	2107	2108	2109	
			ПСР 925-270 + 10	ВН NU-NE8-100	Спир. съезд INU 924-250	СКВ-3384	
1	Натрий	мг/дм ³	560	458	547	538	РЭ НИТАСНИ – Z6100 ПНД Ф 14.1:2.95-97 ПНД Ф 14.1:2.95-97 ПНД Ф 14.1.1-95 ПНД Ф 14.1:2.4.139-98 ПНД Ф 14.1:2.99-97 ПНД Ф 14.1:2.111-97 ПНД Ф 14.1:2.108-97 ПНД Ф 14.1:2.4-95 ПНД Ф 14.1:2.3-95 ПНД Ф 14.1:2.112-97 РХА ПВС, 1977 ПНД Ф 14.1:2.98-97 ПНФ 14.1:2.3:4.121-97 ПНД Ф 14.1:2.114-97 ПНД Ф 14.1:2.114-97
2	Калий	мг/дм ³	1.58	4.57	0.55	9.9	
3	Кальций	мг/дм ³	348	270	318	407	
4	Магний	мг/дм ³	66.4	69.5	53.17	175	
5	Аммоний-ион	мг/дм ³	0.1	0.05	0.05	0.1	
6	Железо общее	мг/дм ³	0.01	0.05	0.01	0.05	
7	Гидрокарбонат-ион	мг/дм ³	50	170	44	150	
8	Хлорид-ион	мг/дм ³	115	125	125	106	
9	Сульфат-ион	мг/дм ³	1961	1569	1818	2370	
10	Нитрат-ион	мг/дм ³	0.02	0.02	0.05	0.02	
11	Нитрит-ион	мг/дм ³	0.02	0.02	0.05	0.02	
12	Фосфат-ион	мг/дм ³	0.05	0.05	0.05	0.05	
13	Кремниевая кислота (по Si)	мг/дм ³	7.27	7.0	7.5	5.18	
14	Жесткость общая	⁰ Ж	22.8	19.1	20.2	34.7	
15	рН	ед. рН	7.28	7.67	7.21	7.59	
16	Сухой остаток	мг/дм ³	3980	3232	3680	4718	
17	Взвешенные вещества	мг/дм ³	22	42	20	138	

Таблица 2. Химический состав подземных вод подмерзлотного водоносного горизонта (данные ООО ЦЭУ “ОПЫТ”, г. Санкт-Петербург, от 14.11.2019 г.)

№ п/п	Определяемые показатели	Ед. изм	Результаты исследования		НД на методы исследований
1	Натрий	мг/дм ³	408	516	ФР.1.31.2011.10615
2	Калий	мг/дм ³	20	22	ФР.1.31.2011.10615
3	Кальций	мг/дм ³	348	157	ФР.1.31.2011.10615
4	Магний	мг/дм ³	37	56	ФР.1.31.2011.10615
5	Аммоний -ион	мг/дм ³	20	7.4	ПНД Ф 14.1:2:4.262-10
6	Железо общее	мг/дм ³	0.14	0.19	ФР.1.31.2011.10615
7	Гидрокарбонат-ион	мг/дм ³	270	202	ГОСТ 31957-2012
8	Хлорид-ион	мг/дм ³	185	185	ПНД Ф 14.1:2:3.96-97
9	Сульфат-ион	мг/дм ³	1224	1233	ПНД Ф 14.1:2.159-2000
10	Нитрат-ион	мг/дм ³	295	94	ПНД Ф 14.1:2:4.4-95
11	Кремниевая кислота (по Si)	мг/дм ³	5.3	2.2	НДП 10.1:2:3.100-08
12	Жесткость общая	⁰ Ж	20.4	12.4	ГОСТ 31954-2012
13	ХПК	мгО/дм ³	138	77	ПНД Ф 14.1:2:3.100-97
14	Перманганатная окисляемость	мг/дм ³	45	20	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99
15	БПК ₅	мг/дм ³	38	14	ПНД Ф 14.1:2:3.123-97
16	рН	ед.рН	9.0	7.6	ПНД Ф 14.1:2:3.121-97
17	Сухой остаток	мг/дм ³	2771	2490	ПНД Ф 14.1:2:3.261-10

лабораторные исследования химического состава подмерзлотных вод по расширенному списку определяемых компонентов доказал присутствие органических соединений по величине перманганатной окисляемости, а также химическому потреблению кислорода (ХПК) (табл. 2).

Необходимо учесть, что пробы воды были привезены в Санкт-Петербург с перерывом между отбором и лабораторными исследованиями в 37 сут. Еще ранее нами было установлено, что содержание легко окисляемой органики при стоянии пробы 4–5 сут может снижаться на порядок, что не отмечается существующими регламентами на проведение химических анализов, следовательно, величина перманганатной окисляемости может быть повышена до 90 мг/дм³, и, соответственно, возрастает значение ХПК – общее содержание органики. Подмерзлотный водоносный комплекс относится к области затрудненного водообмена, что в сочетании с повышенным содержанием органики предполагает наличие восстановительной (бескислородной) среды с величиной окислительно-восстановительного потенциала $E_h < 0$.

В зонах проявления криопэгов следует учитывать их высокую агрессивность по отношению к металлическим конструкциям при их аномально высокой минерализации. Восстановительная

среда в подмерзлотных водах предполагает развитие определенных видов коррозии металлов – электрохимических процессов $Fe^0 \rightarrow Fe^{2+}$, которые приводят к утончению металлических конструкций (трубчатых фрикционных анкеров и металлической сетки) в зонах разгрузки подземных вод. Анализ химического состава подземных вод подмерзлотного горизонта свидетельствует о их коррозионной способности по отношению к бетонам и цементным растворам по содержанию сульфат-иона и соответственно о возможности развития наиболее опасной химической коррозии – сульфатной.

Как известно, разрушение цементов, содержащих алюминаты кальция, происходит с образованием гидросульфоалюмината кальция $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O$ (этtringита). Генерация этого цементоподобного минерала в форме кристаллогидрата сопровождается значительным увеличением объема, что приводит к возникновению кристаллизационного давления в толще бетона и его дезинтеграции. Дальнейшее разрушение фрагментов бетонов сопровождается выносом Ca^{2+} , Mg^{2+} в условиях нейтральной среды подземных вод. Интенсивность выноса усиливается при наличии хлоридов и образовании хорошо растворимых солей $CaCl_2$, $MgCl_2$.

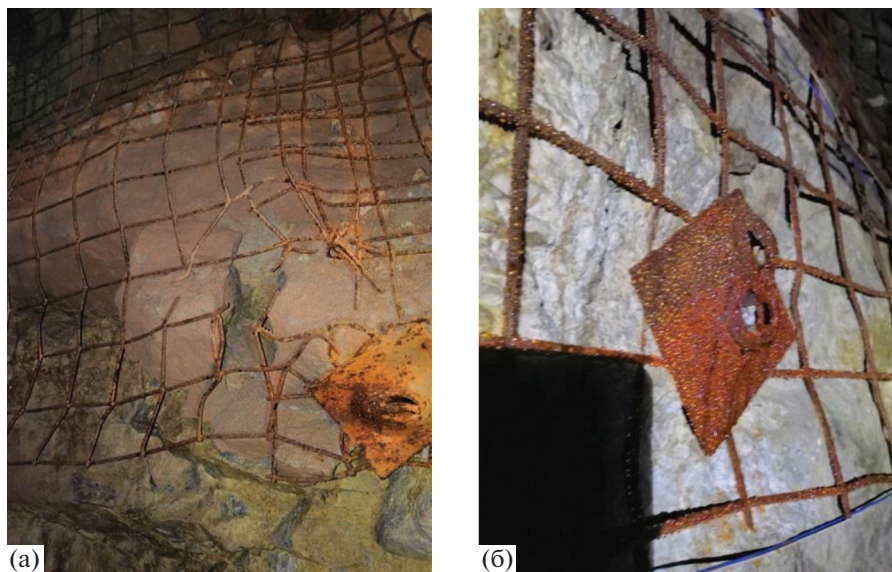


Рис. 7. Места коррозионного разрушения металлической сетки и виды проявления коррозии на крепи (Северный участок месторождения “Купол”: а – горизонт +200, б – горизонт +185).

В местах контакта воды с крепью наблюдаются коррозионные разрушения металлической сетки в виде постепенного уменьшения диаметра проволоки с образованием рыхлых образований (рис. 7). Характер такого разрушения металла позволил предположить наличие биокоррозионных процессов, прежде всего за счет железобактерий и железовосстанавливающих бактерий, которые могут работать как психрофилы при низких температурах в условиях наличия питательных и энергетических субстратов, что подтверждается химическим составом подмерзлотных вод. Максимальная скорость развития железобактерий (*Gallionella*) фиксировалась при температуре ниже 4°C [6].

Первый цикл проведенных специализированных микробиологических исследований на биологическом факультете в Санкт-Петербургском государственном университете позволил установить богатый биоценоз психрофильных групп микроорганизмов путем посевов на питательные среды разрушенных материалов крепи и проб подземных вод. Однако, биокоррозионные процессы крепи в подземных выработках Чукотки являются отдельной темой самостоятельных работ, которые выполняются в рамках повышения безопасности ведения горных работ в условиях развития многолетней мерзлоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя мерзлотно-гидрогеологические условия месторождения “Купол”, необходимо заострить внимание на их уникальности и негативном влиянии на безопасность ведения под-

земных горных работ в виду возможного развития коррозионных процессов и затопления выработок.

1. В связи с наличием мощной толщи многолетнемурзлых пород (250–300 м) следует различать две зоны по глубине, характеризующиеся различным уровнем устойчивости. Верхняя – до глубины 250–300 м, располагается в зоне с отрицательными температурами и наличием льда-цемента в трещинах с различной степенью раскрытия, основные осложнения в этой зоне наблюдаются в летний период при подаче вентиляционного воздуха с положительной температурой и таянием льда. В нижней части разреза (глубже 300 м) в условиях отсутствия льда-заполнителя в трещинах пород отмечаются наибольшие сложности, определяемые не только ослаблением массива пород, но и в связи с разгрузкой минерализованных подмерзлотных вод гидрокарбонатно-хлоридных, либо гидрокарбонатно-сульфатно-кальциевого состава. Вода обладает сульфатной агрессивностью по отношению к бетонам и цементным растворам, способствует быстрому разрушению торкрет бетона. Разгрузка подземных вод в забое выработок резко снижает скорость их проходки.

2. Необходимы более детальная оценка проявлений криопэгов и их влияния на конструкционные материалы металлического крепления, а также составление карты их локализации в зоне работы рудника. Большинство работ по их изучению, в основном, проводились в Восточной Сибири, что не дает общей картины их происхождения в рассматриваемом регионе. Следует выполнить их полноценный химический анализ,

который даст исчерпывающее представление об опасности их проявления. Присутствие таких вод носит негативный характер при буровзрывных работах на поверхности.

3. Проведенные натурные исследования горных выработок рудника “Купол” показали, что в зоне ниже подошвы многолетнемерзлых пород присутствуют активные водопроявления подземных вод, которые несут за собой такие негативные явления, как активизация коррозионных процессов в зонах их разгрузки и снижение скорости горнопроходческих работ.

4. Наблюдение за характером разрушения крепления горных выработок, в частности, металлической сетки и анкеров, дает основание предположить активную деятельность железобактерий (*Gallionella*), которые наиболее активны при низких температурах в условиях наличия питательных сред. Микроорганизмы хорошо развиваются в условиях обводнения при минерализации более 2 г/дм³. Подмерзлотные воды содержат все необходимые элементы для развития микробиоты (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Fe, содержание углерода, серы, азота, кремнезема). В таких условиях активно работают психрофилы, активность которых хорошо проявляется при температурах ниже 4°C, захватывая и область отрицательных температур. Следует также учитывать, что под действи-

ем напряжений коррозия протекает более активно (стресс-коррозия).

5. В связи с вышеизложенными факторами необходима организация специализированного мониторинга за изменением химического состава подземных вод криопэггов и подмерзлотного водоносного комплекса, а также за развитием биокоррозионных процессов разрушения крепей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.П.* Криопэги – жидкая мерзлота // Наука и техника Якутии. 2014. № 2 (27). С. 64–74.
2. *Волков А.В., Гончаров В.И., Сидоров А.А.* Месторождения золота и серебра Чукотки. М.: ИГЕМ РАН; Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2006. 221 с.
3. *Гидрогеология СССР*. Т. XXXVI. Северо-Восток СССР Северо-Восточное территориальное геологическое управление / Ред. О.Н. Толстихин. М.: Недра, 1972. 297 с.
4. *Глухов А.Н.* Региональная геологическая позиция, структура и минералого-геохимическая позиция месторождения Купол // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2008. № 3. С. 34–45.
5. *Кирюхин В.А.* Региональная гидрогеология: Учебник для вузов. СПб: РИЦ СПбГИ, 2005. 344 с.
6. *Шлегель Г.* Общая микробиология: Пер. с нем. М: Мир, 1987. 567 с.

GEOCRYOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL FACTOR IN THE ANALYSIS AND ASSESSMENT OF MINE WORKINGS STABILITY AND MINING OPERATIONS SAFETY AT KUPOL GOLD AND SILVER DEPOSIT (CHAO, ANADYR REGION)

R. E. Dashko^{a,#} and I. S. Romanov^{a,##}

^a St. Petersburg State Mining University, V.O., 21st Line, 2, St. Petersburg, 199106 Russia

[#] E-mail: regda2002@mail.ru

^{##} E-mail: ivan.romanov.russia.spb@gmail.com

Geocryological and hydrogeological conditions have been assessed at Kupol deposit. The deposit area was conventionally subdivided into two zones by the depth: the perennially frozen rock layer totally widespread in the region, and the rocks below the permafrost foot, in which the most mining operations are currently undertaken. The main problems to be studied in future have been highlighted for each zone. The earlier-obtained results on cryopeg manifestation in the permafrost massif have been analyzed. Further investigation will be conducted taking into account the cryopeg impact on reinforcing structures of various types. Mining works are carried out in the zone of underpermafrost aquifer development. The chemical composition and influence of underpermafrost water on the stability of reinforcing structures in mine workings was studied. The aggressiveness of groundwater in relation to the reinforcing units was revealed. Corrosion of metal supporting elements and their partial destruction caused by the presence of psychrophile microorganisms coming with groundwater that provide nutrient and energy substrates for microbiota is recorded everywhere.

Keywords: geocryological and hydrogeological conditions, permafrost deposits, reinforcing support, cryopegs, groundwater, corrosion, psychrophiles

REFERENCES

1. Alekseev, V.R. *Krioepgi – zhidkaya merzlota* [Cryopegs as liquid permafrost]. *Nauka i tekhnika Yakutii*, 2014, no. 2 (27), pp. 64–74. (in Russian)
2. Volkov, A.V., Goncharov, V.I., Sidorov, A.A. *Mestorozhdeniya zolota i serebra Chukotki* [Gold and silver deposits in Chukotka]. Moscow, IGEM RAN Publ.; Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 2006, 221 p. (in Russian)
3. *Gidrogeologia SSSR, tom XXXVI. Severo-Vostok SSSR*. [Hydrogeology USSR, Vol. XXXVI. North-East of the USSR]. Tolstikhin, O.N., Ed., Moscow, Nedra Publ., 1972, 297 p. (in Russian)
4. Glukhov, A.N. *Regional'nyya geologicheskaya pozitsiya, struktura i mineralogo-geokhimicheskaya pozitsiya mestorozhdeniya Kupol* [Regional geological position of Kupol deposit, its structure and mineralogical and geochemical position]. *Vestnik SVNTS DVO RAN*, 2008, no. 3, pp. 34–45. (in Russian)
5. Kiryukhin, V.A. *Regional'nyya gidrogeologiya* [Regional hydrogeology]. Textbook for higher school. St. Petersburg, SPbGGI Publ., 2005, 344 p. (in Russian)
6. Shlegel', G. *Obshchaya mikrobiologiya* [General microbiology]. Translated from German. Moscow, Mir Publ., 1987, 567 p. (in Russian)