

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД НАХОДКИНСКОГО МЕДНО-ПОРФИРОВОГО РУДНОГО ПОЛЯ, ЧУКОТКА

Приведены результаты гидрохимических исследований на площади Находкинского медно-порфирового рудного поля (Чукотка). Получены достоверные сведения о составе вод, формирующихся в нейтральных условиях зоны гипергенеза и в зоне развития медно-молибден-порфировой и эпitherмальной золото-серебряной сульфидной минерализации.

Дана оценка влияния вод, дренирующих оруденение, на химический состав принимающих водотоков.

Введение

Медно-порфировые месторождения в настоящее время обеспечивают около $\frac{3}{4}$ мировой добычи меди. При относительно низких содержаниях (в среднем 0,1 % меди) запасы руд в крупных месторождениях достигают миллиардов тонн; попутно из руд извлекают молибден, золото, серебро, платиноиды, рений, селен, теллур и ряд других элементов [1]. Повышенная сульфидность и масштабы оруденения определяют опасность месторождений для окружающей среды и, в первую очередь, водных ресурсов. Окисление сульфидов приводит к формированию агрессивных высокоминерализованных вод с низкими значениями pH. Кислые воды, образующиеся в пиритизированных породах, характеризуются повышенными концентрациями рудных и сопутствующих элементов, которые значительно возрастают при проведении геолого-разведочных работ и активизации процессов окисления. Согласно [2], содержание сульфатов в техногенных рудничных водах в 2 и более раз, железа — в 5 раз, меди и цинка — на порядок выше, чем в водах, дренирующих минерализованные зоны, не затронутые горными выработками.

Дренажные и техногенные рудничные воды могут отрицательно влиять на качество

вод принимающих водотоков, приводя к понижению pH, увеличению общей минерализации, содержания сульфатов и растворенных форм металлов, что обуславливает необходимость изучения химического состава природных вод и его трансформации в районах месторождений. Проводимые гидрохимические исследования в значительной степени инициированы традиционным использованием данных при поисках и разведке оруденения [3-5]. Особое внимание уделяется подземным водам, состав которых более тесно коррелирует с интенсивностью гидротермальных изменений и присутствием сульфидов во вмещающих породах [6]. В отечественной практике гидрохимический метод поисков не получил широкого распространения; имеющаяся информация о составе природных вод фактически ограничена данными региональных гидрогеологических изысканий. Поверхностные воды, являющиеся одним из источников водоснабжения, как правило, изучены слабо, и оценка их химического состава и качества представляет значительный научный и практический интерес.

В России основные запасы медно-порфировых руд сосредоточены на северо-востоке территории, в пределах Олойского меднорудного пояса [7], освоение комплексных месторождений которого является одним из приоритетных направлений программы экономического развития Чукотского автономного округа (ЧАО). Исследования химического состава поверхностных вод проводились в районе Находкинского рудного поля, расположенного в южной части Баимской золото-меднорудной зоны, с разведкой которой связаны основные перспективы расширения минерально-сырьевой базы района.

Материалы и методы исследований

Район исследований — Находкинское рудное поле — находится в Билибинском муниципальном районе ЧАО, в 280 км к

Т.Н. Лубкова*,
кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник геологического факультета, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

Д.А. Яблонская,
кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник геологического факультета, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

Т.В. Шестакова,
кандидат химических наук, старший научный сотрудник геологического

*Адрес для корреспонденции: tanya_lubkova@mail.ru

юго-западу от г. Билибино. Положение объекта в юго-восточной части Анюйского нагорья определяет сглаженный низкогорный рельеф, суровый резко континентальный климат, преобладание лесотундровых ландшафтов, повсеместное распространение многолетнемерзлых пород, мощность которых составляет 130-350 м при глубине деятельного слоя 0,3-1,5 м. Оттайка мерзлоты, наряду с талыми снеговыми водами, обеспечивает основное питание водотоков, принадлежащих бассейну верхнего течения р. Баимки (приток р. Большой Анюй). В меньшей степени в формировании стока принимают участие дождевые осадки и подземные воды [8]. На площади рудного поля известны месторождения и проявления медно-молибден-порфириновой и наложенной эпитеpmальной золото-серебряной рудных формаций. Минеральный состав медных руд представлен пиритом, халькопиритом, борнитом, молибденитом, халькозином, теннантитом. В состав минеральной ассоциации золото-серебряного оруденения входят галенит, сфалерит, халькопирит, теннантит и тетраэдрит, самородное золото, гессит, акантит, минералы марганца. Рудовмещающими породами являются диоритовые порфириды и монзониты поздней юры — раннего мела (Весеннинский и Егдэгкичский интрузивные комплексы), прорывающие стратифицированные вулканогенно-осадочные образования средней — поздней юры (андезиты, туфы и туфоконгломераты). Породы интрузивного комплекса изменены до фации кварц-серицитовых и кварц-калишпатовых метасоматитов [7, 9]. Территория рудного поля перекрыта плащом современных четвертичных элювио-делювиальных образований. Голоценовые аллювиальные отложения в долинах водотоков нарушены в результате разработки россыпных месторождений золота в 1960-80 гг. В наибольшей степени изменениями затронут русло руч. Находка, в среднем течении которого поверхностные воды непосредственно контактируют с коренным пиритизированным ложем.

Изучение химического состава вод проводилось по данным опробования водотоков разного порядка, дренирующих рудные зоны и безрудные участки площади (рис. 1). Пробы отбирались в период летней межени (август 2010 г.) «под крышку» в чистые темные емкости из полипропилена объемом 0,5 л, промытые дистиллированной водой и водой из опробуемого водотока. На месте с помощью шприц-насадки с мембранным фильтром (ди-

факультета, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

В.В. Пухов, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заведующий сектором геологического факультета, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»

аметр пор 0,45 мкм, «Millipore», США) производилась фильтрация проб в стерильные центрифужные пробирки из полипропилена объемом 15 мл с 1 мл 3 % HNO₃. Отбор проб сопровождался замерами pH (полевой pH-тестер, «Hanna Instrument», Германия) и приближенной оценкой параметров водотоков и расходов воды (метод «поплавка»).

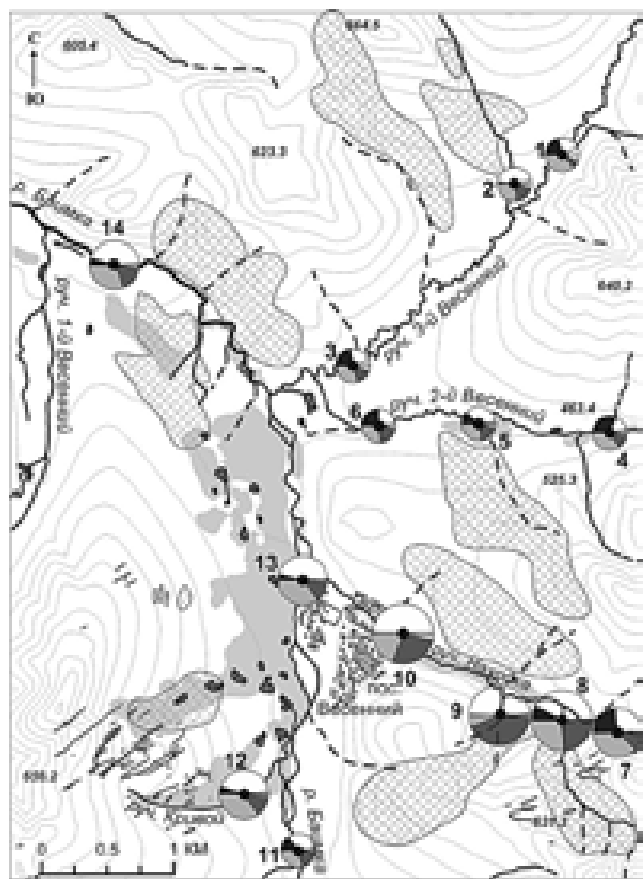
Определение химического состава вод производилось с использованием традиционных методов объемного титрования [10]. Сульфаты анализировались осаждением раствором BaCrO₄ с последующим йодометрическим определением избытка хроматионов; хлориды — титрованием AgNO₃; гидрокарбонат-ион — титрованием H₂SO₄; Ca и Mg — титрованием трилоном Б. Содержания микроэлементов определялись методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS, масс-спектрометр высокого разрешения ELEMENT 2, «ThermoFinnigan», Германия). Калибровка спектрометра осуществлялась по растворам мультиэлементного стандарта для ICP-MS (набор ICP-MS-68A, «High-Purity Standards», США). Правильность измерений контролировалась использованием внутреннего стандарта (раствор In). Относительное стандартное отклонение при определении большинства элементов не превышало 5 %.

Аналитические работы были выполнены в лабораториях кафедры геохимии геологического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова.

Результаты и их обсуждение

В ходе проведенных исследований были получены данные о химическом составе поверхностных вод в районе Находкинского рудного поля (табл. 1). Обобщение результатов анализов свидетельствует о преобладании вод гидрокарбонатно-сульфатного и сульфатного магниево-кальциевого состава (рис. 2), минерализация которых в зависимости от условий формирования стока варьирует в широком диапазоне от менее 0,1 г/л до 0,76 г/л (пространственное распределение вод по макросоставу показано на рис. 1).

В качестве фоновых для данной территории могут рассматриваться водотоки, дренирующие участки выше зоны влияния оруденения (верхнее течение руч. 3-й и 2-й Весенний, р. Баимка; пробы 1, 4, 11). Воды нейтральные (pH 6,5-6,7), имеют малую минерализацию (0,06-0,16 г/л), сульфатно-гидрокарбонатный и гидрокарбонатно-сульфатный, кальциевый



Условные обозначения

• 1 Точки отбора проб и их номера

Минерализация, г/л



Площади развития рудной минерализации:



Ионный состав, % экв:



Техногенные нарушения



Рис. 1. Схема и результаты опробования поверхностных вод Находкинского рудного поля (макросостав).

и магниевый-кальциевый состав. По сравнению с водами, типичными для континентальной части Чукотки (преимущественно гидрокарбонатного состава [13]), наблюдается увеличение доли сульфатов, что обусловлено общей рудогенной специализацией района. Воды характеризуются низкими содержаниями микроэлементов (Fe, Mn — до 30-40, Cu, Zn — до 10, Mo, Pb, As — менее 0,5-1, Ag, Cd — до 0,05 мкг/л), которые сопоставимы с концентрациями в атмосферных осадках и почвенных рас-

творах в северо-тундровых ландшафтах провинции многолетней мерзлоты [14].

Развитие на исследуемой территории сульфидной минерализации приводит к трансформации химического состава природных вод, глубина которой зависит от типа оруденения, положения рудных тел в бассейне водосбора, источников формирования стока и других факторов.

Состав вод водотоков, непосредственно дренирующих площади развития медно-молибден-порфировой минерализации, соответствует кислым высокометалльным рудничным водам районов сульфидных месторождений (руч. Находка; пробы 9, 10; рис. 3). Основным фактором формирования стока является разгрузка высокоминерализованных подземных вод, циркулирующих в пиритизированных породах, что обуславливает низкие значения водородного показателя (рН 4,4-4,7), резко сульфатный (гидрокарбонат-ион практически отсутствует), магниевый и кальциево-магниевый состав вод и повышенную минерализацию (0,60-0,76 г/л). Концентрации тяжелых металлов в десятки-сотни раз превышают фон и составляют для Cu 1,1-3,7 мг/л, Fe — 1,5-2,8 мг/л, Mn — 1,9-4,2 мг/л, Mo — 5-9 мкг/л, Zn — 0,5-1 мг/л, Pb — 5-20 мкг/л.

По мере удаления от рудных тел происходит снижение минерализации и содержания микроэлементов за счет разбавления водами, не контактирующими с оруденением. При невысоком нейтрализующем потенциале вмещающих пород околорудные воды сохраняют кислую реакцию, характеризуются сульфатным магниевый-кальциевый составом и более низкими концентрациями типоморфных микроэлементов, которые, однако, по-прежнему значительно превышают фон (приток руч. 3-й Весенний, проба 2).

Растворение буферирующих карбонатных и силикатных фаз вмещающих пород, сопровождающее окисление сульфидов, ограничивает распространение кислых вод. Локально механизмы нейтрализации проявляются на контакте с кварц-сульфидными и кварц-карбонатными жильно-прожилковыми зонами с эпитермальным золото-серебряным оруденением. Воды этих участков характеризуются средней — повышенной минерализацией (0,35-0,74 г/л), сульфатным магниевый-кальциевый составом, нейтральным рН и, как правило, невысокими содержаниями микроэлементов, что связано с гидролизом сульфатов металлов и снижением их растворимости. В водотоках, дренирующих богатые руды

Таблица 1

Химический состав поверхностных вод в районе Находкинского рудного поля

Показатели	ПДК	Номер пробы													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	11	13	14
Макросостав, мг/л															
pH, ед.	6-9	6,6	4,7	6,4	6,7	5,9	6,7	6,6	6,4	4,4	4,7	6,4	6,5	6,4	6,2
HCO ₃ ⁻		21,5	3,7	23,4	72,2	32,3	57,3	155	111	5,9	6,1	32,2	43,9	27,3	25,4
Cl ⁻	350	4,3	3,4	3,2	4,3	3,2	3,2	3,9	4,3	3,9	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
SO ₄ ²⁻	500	17,3	55,3	17,6	26,8	90,2	40,2	132	448	460	559	225	77,5	215	200
Ca ²⁺	-	11,3	13,8	8,2	24,0	25,3	20,5	82,1	111	23,5	93,1	68,2	24,6	64,8	55,4
Mg ²⁺	-	1,1	5,8	2,4	5,2	9,9	9,0	13,3	58,6	96,7	77,6	16,3	9,2	13,2	17,6
Na ⁺	200	1,8	2,1	1,7	1,9	2,6	2,2	2,7	7,2	5,8	15,9	3,8	1,9	3,2	3,7
K ⁺	-	1,3	0,5	0,4	0,5	1,1	0,9	0,6	1,2	1,2	2,9	0,9	0,7	1,1	1,0
M	1000	59	85	57	135	165	133	390	742	597	758	350	161	328	306
Микроэлементы, мкг/л															
Cu	1000	3,3	368	10,6	3,3	36,7	12,2	3,1	17,2	3693	1079	43,5	7,6	7,9	26,1
Mo	70	0,18	0,85	0,14	0,25	0,37	0,23	0,25	0,83	8,9	5,3	0,32	0,62	0,54	2,1
Zn	1000	12,8	39,9	5,4	2,5	14,8	10,0	3,4	9,9	1022	534	254	9,4	30,3	33,3
Pb	10	0,23	2,80	0,09	0,82	0,29	0,35	0,22	0,62	20,4	4,79	0,20	0,36	0,50	0,08
As	10	0,28	0,18	0,18	0,89	0,20	0,65	0,92	0,36	0,10	0,08	0,29	0,63	0,65	0,36
Ag	50	0,02	0,61	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	7,94	0,23	0,09	0,02	0,02	0,01
Cd	10	0,03	0,65	0,02	0,01	0,06	0,04	0,03	0,12	2,92	2,76	0,81	0,05	0,16	0,14
Bi	100	0,003	0,19	<0,001	0,002	0,01	<0,001	0,01	0,01	2,40	0,08	<0,001	0,004	0,003	0,003
Fe	300	19,1	131	12,1	8,9	31,3	24,3	81,9	29,1	1466	2798	18,3	36,9	28,2	12,0
Mn	100	9,02	269	3,04	1,51	52,4	46,2	147	2,70	1877	4208	1048	33,5	164	188
Sr	7000	72,3	80,7	64,7	182	132	169	842	1090	155	586	1078	217	351	1041

Примечание: места отбора проб показаны на рис. 1; подчеркиванием выделены значения, не соответствующие нормативам ПДК [11, 12]; «-» — ПДК не установлены.

(проба 12), установлены повышенные концентрации металлов, в первую очередь Zn и Mn, сохраняющих подвижность в околонейтральной среде (0,25 и более 1 мг/л, соответственно). Содержания микроэлементов в водах на участках с убогой минерализацией находятся на уровне фона (пробы 7, 8).

В связи с низкими расходами (0,02-0,03 м³/с) мелкие водотоки 1-ого порядка, дренирующие рудные тела, оказывают слабое влияние на состав вод принимающих ручьев, расходы которых на порядок выше (0,2-0,4 м³/с) и в летнее время преимущественно обеспечиваются талым грунтовым стоком с водосбора. Воздействие оруденения ограничено приустьевыми частями впадающих водотоков, где в зоне смешения с фоновыми водами происходит дальнейшее разбавление кислых рудничных и околорудных вод с формированием слабокислых низкометалльных вод сульфатного и гидрокарбонатно-сульфат-

Ключевые слова: медно-порфировое оруденение, поверхностные воды, химический состав, Чукотка, масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой

ного магниево-кальциевого состава (приток руч. 2-й Весенний, проба 5). Фактически, при отсутствии контакта с пиритизированными породами состав вод крупных ручьев соответствует фону, несмотря на развитие в бассейнах водосборов сульфидной минерализации (нижнее течение руч. 3-й и 2-й Весенний; пробы 3, 6).

Поступление рудных и околорудных вод с подземным и поверхностным стоком со всей площади водосбора и их нейтрализация вмещающими породами обуславливает трансформацию состава вод р. Баймки. В зоне влияния оруденения (пробы 13, 14) наблюдается в среднем двукратное увеличение содержания сульфатов, двухвалентных катионов и общей минерализации (до 0,33 г/л) при сохранении нейтральных значений водородного показателя (pH 6,2-6,4). По содержанию комплекса микроэлементов воды р. Баймки могут быть отнесены к низкометалльным (рис. 3).

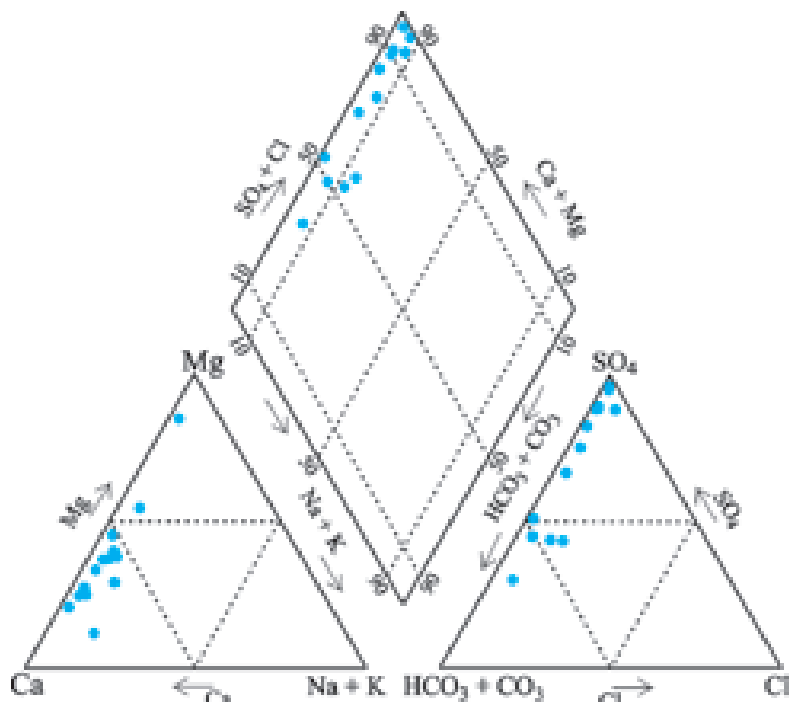


Рис. 2. Макросостав поверхностных вод Находкинского рудного поля (диаграмма Пайпера, содержания ионов в %экв).

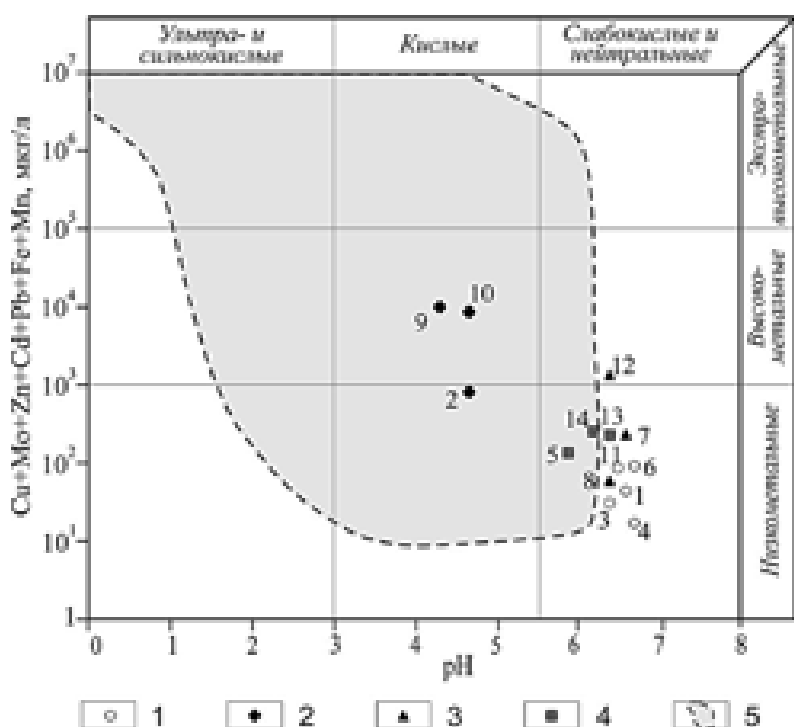


Рис. 3. Типизация поверхностных вод по соотношению содержания комплекса типоморфных элементов и водородного показателя (основа — по [15], цифрами показаны номера проб): 1 — водотоки вне влияния оруденения; 2 — дренирующие Cu-Mo-порфировое оруденение; 3 — дренирующие Au-Ag оруденение; 4 — зона смешения; 5 — область кислых рудничных вод.

Концентрации, превышающие фон, наблюдаются на участках русла, непосредственно дренирующих площади развития медно-молибден-порфировой минерализации (проба 14). Качество вод по большинству нормируемых показателей соответствует гигиеническим нормативам, за исключением марганца, содержание которого незначительно превышает ПДК.

Заключение

Гидрохимические исследования в районе Находкинского рудного поля позволили выявить основные закономерности состава поверхностных вод территории.

Установлено, что кислые сульфатные магниевые и кальциево-магниевые высокометалльные воды имеют ограниченное распространение и непосредственно приурочены к площадям развития медно-молибден-порфировой минерализации и пиритизированным породам. Растворение буферирующих карбонатных и силикатных фаз вмещающих пород обуславливает нейтрализацию кислых вод, наиболее интенсивно протекающую на контакте с кварц-сульфидными и кварц-карбонатными жильно-прожилковыми зонами, в которых локализовано эпitherмальное золото-серебряное оруденение.

В связи с низкими расходами, водотоки, дренирующие рудные тела, фактически не оказывают воздействия на воды принимающих ручьев, состав которых соответствует маломинерализованным нейтральным сульфатно-гидрокарбонатным магниево-кальциевым водам области фона. Влияние оруденения на воды р. Баимки, к верхнему течению которой относятся исследуемые водотоки, проявляется в двукратном увеличении содержаний сульфатов, двухвалентных катионов и общей минерализации при сохранении нейтральных значений водородного показателя и невысоких концентраций типоморфных микроэлементов.

Полученные данные позволяют разработать программу мониторинга качества поверхностных вод при дальнейшей разведке проявлений Находкинского рудного поля и могут быть использованы для характеристики состава вод в районах развития медно-порфирового оруденения Севера-Востока России.

Исследования выполнены при содействии ООО «РГК» и ООО «ГЕОХИМПОЙСКИ», которым авторы выражают свою благодарность.

Литература

1. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Econ. Geol. Special Issue. 2010. V. 105 (1). P. 3–41.
2. Verplanck Ph.L. Naturally acidic surface and ground waters draining porphyry-related mineralized areas of the Southern Rocky Mountains, Colorado and New Mexico / Verplanck Ph.L., Nordstrom D.K., Bove D.J., Plumlee G.S., Runkel R.L. // Appl. Geochem. 2009. V. 24. P. 255–267.
3. Miller W.R. Hydrogeochemical prospecting for porphyry copper deposits in the tropical-marine climate of Puerto Rico / Miller W.R., Ficklin W.H. and Learned R.E. // J. Geochem. Explor. 1982. V. 16. P. 217–233.
4. Learned R.E. A comparative study of stream water and stream sediment as geochemical exploration media in the Rio Tanama porphyry copper district, Puerto Rico / Learned R.E., Chao T.T. and Sanzalone R.F. // J. Geochem. Explor. 1985. V. 24. P. 171–195.
5. Eppinger R.G. An exploration hydrogeochemical study at the giant Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit, Alaska, USA, using high resolution ICP-MS / Eppinger R.G., Fey D.L., Giles S.A., Kelley K.D. and Smith S.M. // Geochem-Explor, Env, A. 2012. V. 12 (3). P. 211–226.
6. Leybourne M.I. Groundwater in geochemical exploration / Leybourne M.I., Cameron E.M. // Geochem-Explor, Env. 2010. V. 10 (2). P. 99–118.
7. Волков А.В. Закономерности размещения и условия формирования Au-содержащих Cu-Мо-порфировых месторождений северо-востока России / Волков А.В., Савва Н.Е., Сидоров А.А., Егоров В.Н., Шаповалов В.С., Прокофьев В.Ю., Колова Е.Е. // Геология рудных месторождений. 2006. Т. 48. № 6. С. 512–539.
8. Чукотка: Природно-экономический очерк / Под ред. А.Н. Котова. М.: Арт-Литэкс, 1995. 370 с.
9. Николаев Ю.Н. Новые данные по геологии, минералогии и геохимии Находкинской золото-молибден-медно-порфировой системы / Николаев Ю.Н., Читалин А.Ф., Калько И.А., Бакшеев И.А., Сидорина Ю.Н., Нагорная Е.В. // Тез. докл. науч. конф. Ломоносовские чтения, секция геологии, Москва, 2011. Электронный ресурс: <http://geo.web.ru/db/msg.html?mid=1186049&uri=nikolaev.html>
10. Резников А.А. Методы анализа природных вод / Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. М.: Недра, 1970. 488 с.
11. ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. М.: Минздрав России, 2003. 152 с.
12. ГН 2.1.5.2280–07. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Доп. и изм. № 1 к ГН 2.1.5.1315–03. М.: Минздрав России, 2007. 6 с.
13. Бражник С.Н. Закономерности формирования и криогенного преобразования химического состава и минерализации природных вод Чукотки. Автореф. дис. ... канд. геол. — мин. наук. М., 1994. 21 с.
14. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М.: Недра, 1978. 287 с.
15. Plumlee G.S. Geologic controls on the composition of natural waters and mine waters draining diverse mineral-deposit types / Plumlee G.S., Smith K.S., Montour M.R., Ficklin W.H., Mosier E.L. // The Environmental Geochemistry of Mineral Deposits, Part B: Case Studies and Research Topics. Reviews in Economic Geology. Society of Economic Geologists, Inc. 1999. V. 6B. P. 373–432.

T.N. Lubkova, D.A. Yablonskaya, T.V. Shestakova, V.V. Pukhov

GEOCHEMICAL PECULIARITIES OF SURFACE WATER COMPOSITION OF THE NAKHODKA PORPHYRY COPPER ORE FIELD

This article represents results on geochemical investigations of the area of the Nakhodka porphyry copper ore field (Chukotka). Reliable information about a composition of water forming under neutral conditions of hypergenesis and zones of porphyry molybdenum copper development and epithermal gold-silver mineralization is obtained. Influence of a water draining ore on the chemical composition of a receiving stream is estimated.

Key words: porphyry copper ore, surface water, chemical composition, Chukotka, inductively coupled plasma mass spectrometry