

УДК 550.84.09

Г.Т. Дждежа¹, Ю.Н. Сидорина²**ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ПОРФИРОВО-ЭПИТЕРМАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПЕСЧАНКА (ЗАПАДНАЯ ЧУКОТКА)³**

Для выявления геохимической зональности оруденения Песчанкинской порфирово-эпитермальной системы использованы результаты химического анализа и документация керн 266 скважин. С помощью факторного анализа данных и ГИС-технологий построена трехмерная модель геохимической зональности, отражающая пространственное распределение элементных ассоциаций и минеральных парагенезисов. Описана поперечная и продольная зональность. В качестве показателя вертикальной зональности предложено отношение $AgPbZn:CuAuMo$, позволяющее оценивать уровень эрозионного среза медно-порфировых штоков.

Ключевые слова: порфирово-эпитермальная система, медно-порфировый штокверк, ассоциация элементов, геохимическая зональность.

To identify geochemical zoning of the Peschanka porphyry-epithermal system geochemical and mineralogical data for 266 drill holes were used. By means of factor analysis and GIS software 3D geochemical model was developed to map spatial distribution of elemental associations and mineral assemblages. Lateral and longitudinal zoning patterns were described. The ratio $AgPbZn:CuAuMo$ was suggested as an indicator of vertical zoning allowing assessing erosion level of porphyry copper stockworks.

Key words: porphyry-epithermal system, porphyry copper stockwork, geochemical association, geochemical zoning.

Введение. Геохимическая зональность порфирово-эпитермальных систем (ПЭС) формируется в результате полистадийных гидротермально-метасоматических процессов. Согласно модели [Sillitoe, 2010], ПЭС совмещают фрагменты нескольких типов оруденения и включают медно-порфировые месторождения, приуроченные к интрузиям; удаленные полиметаллические скарновые руды и оруденение карбонатного замещения; стратиформные золотоносные месторождения периферии; эпитермальные золото-медные, серебро-полиметаллические и золото-серебряные месторождения, локализованные на несущественном удалении или над медно-порфировыми штоковками в породах литокапа.

Гидротермальное рудоотложение связано с изменениями давления, температуры, pH, Eh и других условий, в результате чего нарушаются фазовые равновесия в системе вода–порода. Состав гидротерм многокомпонентен, и осаждение химических элементов происходит разобщенно, что приводит к формированию зональности оруденения.

Зональность месторождений — многовекторная и имеет три составляющие — продольную, поперечную и вертикальную, которые проявляются в упорядоченном распределении химических элементов и их ассоциаций в объеме рудных тел и

их обрамления [Соловов и др., 1990]. При геохимических поисках показатели зональности служат надежными критериями оценки уровня эрозионного среза месторождения и прогноза оруденения на глубину [Соловов, 1985].

Зональность месторождения Песчанка изучали предшественники в ранний период разведки, например [Каминский, 1989]. Было установлено, что кварц-молибденитовая ассоциация образует максимумы на нижнерудно-рудном уровне медно-порфирового штоковка и на верхней выклинке рудного тела. Халькопирит-пиритовая ассоциация достигает максимальной концентрации на рудно-верхнерудном уровне, халькопирит-блекловорудно-борнитовая — на нижнерудном-рудном. Золото-серебросодержащая кварц-карбонат-полисульфидная ассоциация наиболее широко развита на рудно-верхнерудном уровне. По описанию В.Г. Каминского геохимическая зональность отражает постепенное снижение содержания меди и молибдена от среднерудного к нижнерудно-подрудному и верхнерудно-надрудному уровням с одновременным увеличением содержания золота, серебра, свинца и цинка.

По результатам предыдущих работ исследователи оценили уровень эрозионного среза ПЭС как нижнерудный. Это противоречит данным, полученным на современном этапе подготовки

¹ ООО «Геохимпоиски», геолог-геохимик; e-mail: jejeja@yandex.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, вед. инженер; e-mail: bobbin@yandex.ru

³ Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ (проект № 16-35-00296 мол_а).

месторождения к освоению и изложенным в статье.

Характеристика объекта исследований. Участок месторождения Песчанка, занимающий площадь около 8 км², находится на территории Билибинского района Чукотского автономного округа. Песчанка — крупнейшее по запасам медно-порфировое месторождение в России: ресурсы по категории Indicated кодекса JORC (соответствуют запасам категории C₂) при минимальном содержании условной меди 0,40% составляют 6,39 млн т меди, 165,4 тыс. т молибдена, 345,7 т золота и 3141,5 т серебра [Читалин и др., 2013].

В геологическом строении Баимской медно-рудной зоны, в состав которой входит месторождение, принимают участие верхнеюрские туфогенно-терригенные отложения, слагающие брахиантиклиналь север-северо-восточного простирания, по обрамлению которой с угловым несогласием залегают нижнемеловые осадочные породы. Вулканогенно-осадочные образования прорваны интрузивными и субвулканическими телами нескольких магматических комплексов. Медно-порфировое и сопутствующее оруденение связано со становлением раннемелового егдыгкического комплекса.

Месторождение Песчанка приурочено к восточному эндоконтакту Егдыгкического массива, сложенного преимущественно монцодиоритами первой фазы и монцодиорит-порфирами второй фазы егдыгкического комплекса [Читалин и др., 2016] (рис. 1).

Месторождение представляет собой рудный кластер из трех штоков (Главный, Центральный, Северный) субмеридионального простирания, разобщенных пострудными сбросо-сдвигами. Главный рудоконтролирующий элемент — Песчанкинский меридиональный разлом, оперяющий зону Егдыгкического глубинного разлома. Он представляет собой разрывную структуру, которая служила рудоподводящим каналом во время формирования месторождения. Зоны повышенной трещиноватости северо-западного, северо-восточного и субмеридионального направлений, сопровождающие Песчанкинский разлом, вмещают рудные штоки.

В зонах интенсивного дробления породы преобразованы в кварц-биотит-калишпатовые метасоматиты и кварц-серицитовые породы. Внешняя зона метасоматического ореола сложена пропилитами. Пострудные аргиллизиты крайне редки.

Медно-порфировое оруденение приурочено к кварц-биотит-калишпатовым и кварц-серицитовым метасоматитам и представлено вкрапленностью и штоками кварцевых прожилков с сульфидами. Главные рудные минералы порфировой стадии — пирит, халькопирит, молибденит, борнит и блеклые руды ряда теннантит—те-

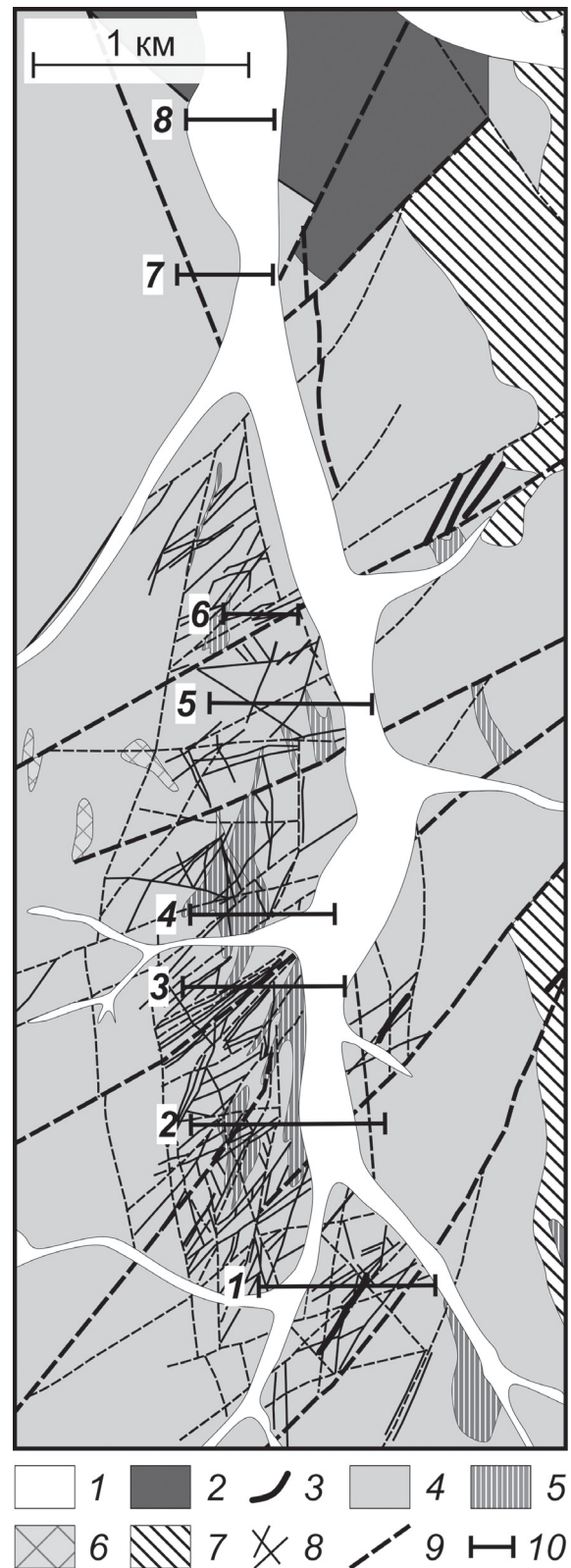


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Песчанка, по [Николаев и др., 2016]: 1 — четвертичный аллювий; 2 — раннемеловые угленосные терригенные отложения; 3 — дайки позднемеловых базальтов; 4–6 — раннемеловой егдыгкический магматический комплекс: 4 — монцодиориты 1-й фазы, 5 — монцодиорит-порфиры 2-й фазы, 6 — кварцевые сиенит-порфиры 3-й фазы; 7 — позднеюрские вулканогенно-терригенные отложения; 8 — минерализованные зоны кварц-серицитовых метасоматитов; 9 — тектонические нарушения; 10 — положение буровых линий, приведенных на рис. 2

траэдрит. Борнит содержит включения селенистого галенита до клаусталита [Марущенко и др., 2015].

Минералы субэпитепмальной карбонат-полисульфидной ассоциации, связанной с развитием турмалин-доломит-кварц-серицитовых метасоматитов, представлены пиритом, сфалеритом, галенитом, халькопиритом и блеклыми рудами в карбонат-кварцевых и кварцевых прожилках. В составе ассоциации в небольшом количестве присутствуют алтаит, голдфилдит, гессит, петцит, единичные зерна самородного золота и электрума.

Материалы и методы исследования. При изучении геохимической зональности Песчанкинской ПЭС использованы результаты опробования и документации 266 скважин, пробуренных в 2010–2015 гг. до максимальной глубины 900 м (в среднем 360 м). Средняя длина анализируемого интервала керна составила 2 м.

Химический состав керновых проб определяли в аккредитованной лаборатории «Стюарт Геокемикл энд Эссей» (Москва). Анализ на 40 химических элементов проводился методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой после разложения материала проб смесью четырех кислот. Диапазоны определения основных рудных элементов и элементов-спутников следующие (г/т): Ag 0,5–200, As 5–10 000, Bi 2–2000, Cd 0,5–2000, Cu 1–10 000, Fe 100–100 000, Mn 1–20 000, Mo 1–10 000, Pb 2–10 000, Sb 5–2000, Se 10–2000, Te 10–2000, Zn 1–10 000. Для проб с содержанием более 1% меди анализ повторяли с применением другой пробоподготовки — окислительным растворением с HBr. Размах определяемого содержания меди в таком варианте составил от 50 г/т до 30%. Значения систематической и случайной погрешностей определения концентрации по результатам внутривлабораторного контроля уложились в интервалы $0,91 < \delta_{\text{сист}} < 1,13$ и $1 < \delta_{\text{случ}} < 1,32$.

Содержание золота в пробах определяли методом пробирного анализа с атомно-абсорбционным окончанием. Нижний предел обнаружения — 0,01 г/т, систематическая погрешность анализа $\delta_{\text{сист}} = 0,98$, случайная погрешность $\delta_{\text{случ}} = 1,05$.

В работе также использованы материалы полевой документации керна, проведенной ЗАО «Сибгеоконсалтинг» (Красноярск). Опробованные интервалы были охарактеризованы по степени метасоматической проработки, виду и интенсивности гидротермальных преобразований, содержанию сульфидов и пр.

Обработка аналитических данных проводилась стандартными статистическими процедурами [Соловов и др., 1990] для определения параметров геохимического фона, оконтуривания первичных ореолов и расчета в контурах среднего содержания элементов.

Геохимические разрезы и планы строили с использованием программ автоматического построения цифровых поверхностей (модуль Spatial

Analyst программы ArcMap, ESRI) с ручной корректировкой. Для характеристики геохимической структуры Главного, Центрального и Северного штокверков было построено 4, 2 и 2 разреза соответственно. Построение погоризонтных планов проводилось для восьми уровней с шагом 100 м.

Для установления связей между содержанием элементов и рудных минералов данные по скважинам обработаны в программе STATISTICA методами корреляционного анализа и факторного анализа главных компонент [Боровиков, 2013].

Исследование вертикальной геохимической зональности выполнено по опорным поперечным разрезам. Для разведочных профилей рассчитаны средневзвешенные значения содержания элементов на интервалы 100 м по глубине. Полученные значения послужили входными данными для программы НЮ-2, и в соответствии с методикой, разработанной на кафедре геохимии геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [Соловов и др., 1990], определялась последовательность отложения рудных элементов.

Результаты исследований и их обсуждение. В результате первичной обработки аналитических данных определено фоновое и минимально-аномальное содержание главных и сопутствующих элементов и построены геохимические разрезы (рис. 2) и погоризонтные планы.

В рудах и первичных ореолах месторождения Песчанка наиболее широко распространены (помимо меди) Mo, Au, Pb, Ag, Zn, Sb, As, Cd, Mn, Fe, Se, Te, Bi (перечислены в порядке убывания значений коэффициента концентрации), входящие в состав минералов различных стадий рудоотложения. При этом значительно более высокая концентрация рудных элементов установлена в Главном штокверке (табл. 1).

Для отражения корреляционных связей между элементами выполнен факторный анализ геохимических данных. В результате получены шесть факторов, или геохимических ассоциаций, с суммарным вкладом 81% от общей изменчивости аномального геохимического поля (табл. 2). Для каждого выделенного фактора распределение значений отражено на поперечных разрезах и погоризонтных планах.

Для увязки геохимических ассоциаций с минеральным составом руд рассчитаны значения коэффициента корреляции Пирсона между значениями факторов и содержанием главных рудных минералов по соответствующим интервалам керна скважин (табл. 3). Таким образом, факторы через минеральные парагенезисы были сопоставлены с предполагаемыми стадиями рудоотложения в Песчанкинской ПЭС.

Ассоциация MnFe фактора F4 связана с развитием ранних пирита и магнетита и соответствует предрудной пиритовой стадии порфинового этапа. Фактор F5 Mo(SeCu), имеющий

Таблица 1

Среднее содержание химических элементов в рудных ассоциациях месторождения Песчанка

Штокверк	Ag	As	Au	Bi	Cd	Cu	Fe	Mn	Mo	Pb	Sb	Se	Te	Zn
	г/т						%	г/т						
Ранняя пиритовая ассоциация														
Главный	2,5	61	0,14	2,5	1,4	3341	3,7	1511	88	275	7	5,5	5,1	423
Центральный	1,7	82	0,08	2,5	0,9	2146	3,6	1215	56	137	10	5,1	5,0	244
Северный	1,1	18	0,04	1,8	0,4	1354	4,0	1155	31	62	6	—	—	160
Медно-молибденовая ассоциация														
Главный	3,7	83	0,22	2,6	1,3	6313	2,8	725	308	261	16	5,9	5,2	387
Центральный	4,1	145	0,12	3,1	1,0	5452	3,2	745	386	181	53	5,4	5,1	262
Северный	2,6	40	0,11	1,6	0,4	4183	3,3	709	167	75	26	—*	—	151
Полиметаллическая ассоциация														
Главный	4,3	102	0,27	2,8	5,2	4813	2,7	1659	172	1058	13	6,0	5,5	1627
Центральный	3,5	78	0,16	2,9	4,4	3391	3,0	1755	71	863	11	5,5	5,2	1427
Северный	2,8	40	0,10	1,6	2,3	2615	3,0	1473	74	504	13	—	—	925

Примечание. Прочерк — нет данных.

значимую корреляцию с количеством халькопирита и молибденита, согласуется с составом ранней продуктивной стадии порфирирового этапа формирования ПЭС. Значения фактора F6 CuAuAg(SeBiAs) положительно коррелируют с содержанием борнита и халькопирита, составляющих основной минеральный парагенезис Cu—Mo-порфирирового оруденения. Присутствие в ассоциации золота и серебра обусловлено высокой способностью борнитовых твердых растворов содержать названные элементы.

Проявление ассоциации SbAs связано с повышенным содержанием минералов группы теннантит—тетраэдрит, и поэтому фактор F2 может быть поставлен в соответствие с блекловорудной

минерализацией, формирующейся в позднепорфирировую и субэпитермальную стадии развития ПЭС.

Высокие значения фактора F1 пространственно совпадают с областями развития сфалерита, галенита и халькопирита, что позволяет соотнести геохимическую ассоциацию ZnPbCd(TeAgSeMn) с субэпитермальной полиметаллической минерализацией.

Фактор F3, соответствующий геохимической ассоциации TeBi(SeCdFeAg), имеет значимые связи с содержанием сфалерита, пирита и халькопирита, что можно интерпретировать как результат наложения наиболее поздней эпитеермальной минерализации на субэпитермальное полиметаллическое и основное медное оруденение.

Рис. 2. Распределение меди на поперечных разрезах месторождения Песчанка: 1 — разведочные скважины; 2—4 — содержание меди в первичных ореолах, % (2 — 0,1–0,2; 3 — 0,2–0,5; 4 — >0,5); 5 — положение русла р. Песчанка

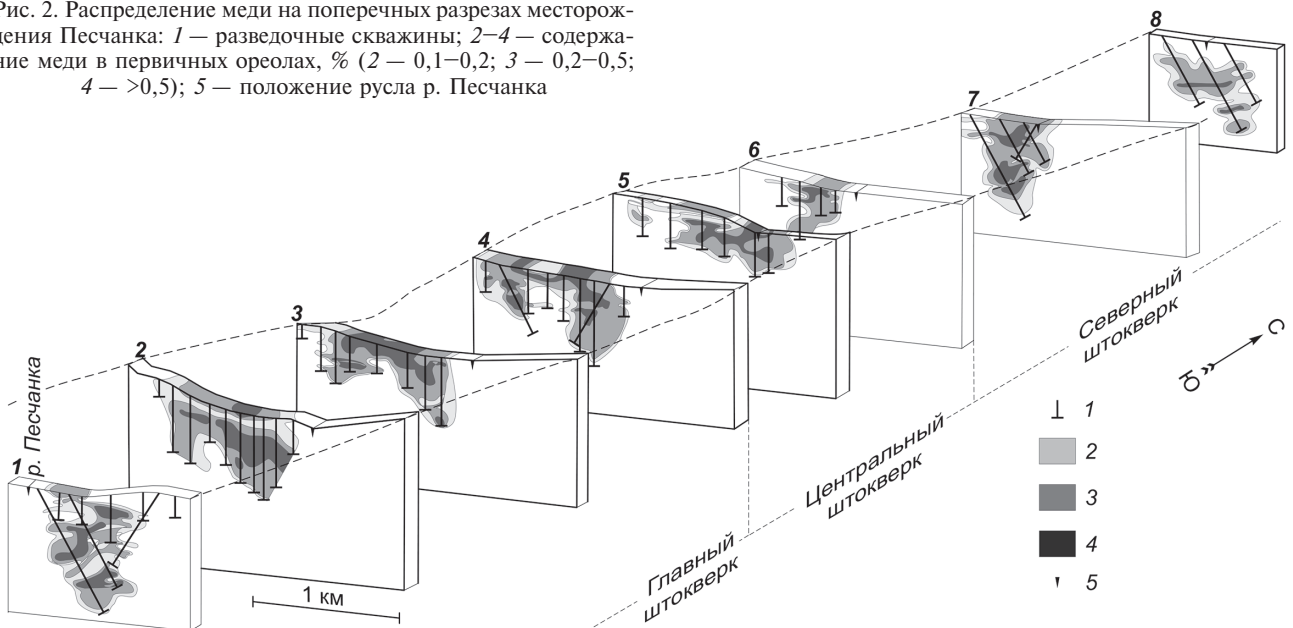


Таблица 2

Результаты факторного анализа геохимических данных:
факторные нагрузки после вращения варимакс

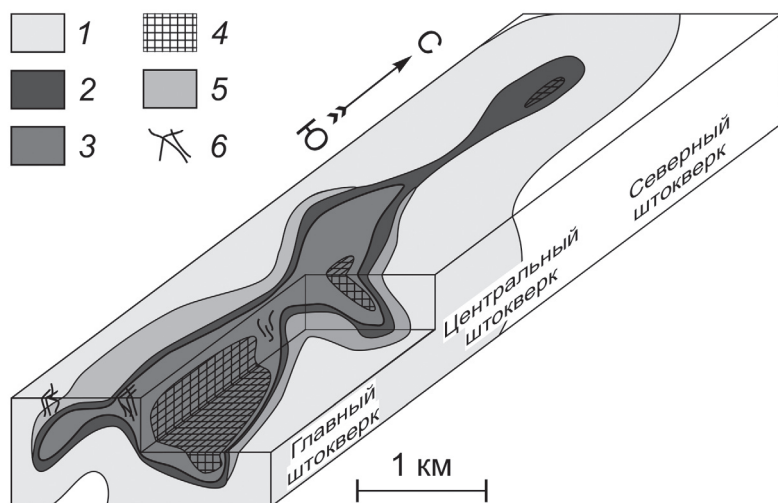
Элементы	Факторные нагрузки					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Ag	0,39*	0,19	0,27	0,11	0,17	0,73
As	0,04	0,66	-0,04	-0,20	-0,02	0,28
Au	0,18	0,01	0,05	-0,22	-0,06	0,82
Bi	-0,05	0,13	0,76	0,09	-0,03	0,34
Cd	0,87	-0,05	0,30	-0,02	0,09	0,06
Cu	0,01	0,17	0,11	-0,05	0,20	0,87
Fe	0,02	-0,20	0,29	0,75	0,13	-0,21
Mn	0,24	0,07	-0,18	0,82	-0,17	0,00
Mo	0,10	0,11	-0,01	-0,05	0,91	0,15
Pb	0,92	0,03	0,04	0,10	0,04	0,13
Sb	0,01	0,82	0,06	0,02	0,16	0,11
Se	0,26	-0,19	0,46	0,03	0,36	0,41
Te	0,47	-0,03	0,78	-0,06	-0,01	0,05
Zn	0,92	0,04	-0,01	0,14	0,04	0,14

* Полу жирным выделены значимые факторные нагрузки со значениями $\geq 0,20$.

На основе погоризонтных планов и разрезов, отражающих распределение геохимических ассоциаций, была создана модель геохимической зональности рудного кластера месторождения Песчанка (рис. 3). Латеральная зональность месторождения представлена двумя составляющими — поперечной и продольной.

Поперечная зональность проявлена в смене ассоциаций от внутренней зоны к внешним в последовательности

SbAs — CuAuAg(SeBiAs) — TeBi(SeCdFeAg) —
Mo(SeCu) — ZnPbCd(TeAgSeMn) —
TeBi(SeCdFeAg) — MnFe.



Значения коэффициента корреляции между содержанием рудных минералов и значениями факторов по интервалам опробования керн скважин месторождения Песчанка

Таблица 3

Минералы	Факторы					
	F1	F2	F3	F4	F5	F6
Пирит	0,13	-0,07	0,16*	0,30	0,13	0,10
Халькопирит	0,17	0,03	0,15	0,14	0,20	0,25
Борнит	-0,07	0,11	0,08	-0,13	0,09	0,39
Блеклые руды	-0,01	0,21	0,01	-0,04	-0,02	0,03
Молибденит	0,09	0,09	0,06	-0,02	0,19	0,01
Сфалерит	0,60	-0,09	0,17	-0,13	0,16	0,00
Галенит	0,39	-0,08	0,04	-0,03	-0,01	-0,03
Магнетит	-0,10	-0,11	0,03	0,21	-0,03	-0,36

* Полу жирным показаны значимые коэффициенты корреляции со значениями $\geq 0,15$.

Седловидные рудные штокверки оконтуриваются по развитию ассоциации Mo(SeCu) халькопирит-молибденитовой минерализации, занимающей весь объем залежей. Ассоциации CuAuAg(SeBiAs) и SbAs наложенные и приурочены к центральным частям крыльев залежей, падающих под разными углами.

Между внешним обрамлением и ядерными частями штокверков концентрируется основной объем субэпитептермальной минерализации, представленной полиметаллической ассоциацией ZnPbCd(TeAgSeMn). Минералы этой стадии отмечены также во внутренних частях штокверков.

Внешняя пиритовая оторочка вокруг штокверков фиксируется по ассоциации MnFe. Ассоциация эпитептермальной минерализации TeBi(SeCdFeAg) накладывается на борнитовые руды во внутренних частях штокверков и совмещается с полиметаллической минерализацией в промежуточных зонах ближе к их внешним границам.

Рис. 3. Модель геохимической зональности месторождения Песчанка: 1–6 — геохимические ассоциации и соответствующие им минеральные парагенезисы: 1 — MnFe (или ранняя пиритовая порфиорового этапа), 2 — Mo(SeCu) (или молибденит-халькопиритовая порфиорового этапа), 3 — CuAuAg(SeBiAs) (или борнит-халькопиритовая порфиорового этапа), 4 — SbAs (или переходная блекловорудная), 5 — ZnPbCd(TeAgSeMn) (или субэпитептермальная галенит-сфалеритовая), 6 — TeBi(SeCdFeAg) (или эпитептермальная гессит-тетрадимитовая)

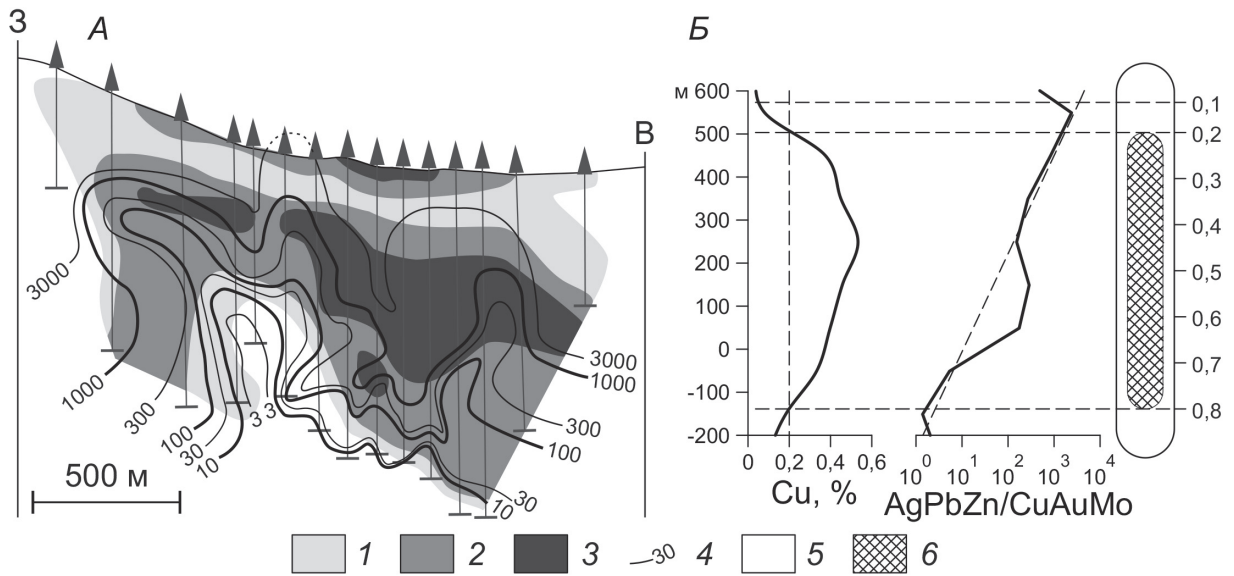


Рис. 4. Изолинии показателя вертикальной геохимической зональности $AgPbZn/CuAuMo$ на разрезе через Главный штокверк (А) и формализованная модель зональности в условной метрике рудного тела (Б): 1–3 — первичные ореолы меди, %: 1 — 0,1–0,2; 2 — 0,2–0,5; 3 — >0,5; 4 — изолинии показателя $AgPbZn/CuAuMo$; 5 — область непромышленного содержания меди; 6 — кондиционные руды (в условной метрике рудного тела интервалы 0–0,2 соответствуют надрудному первичному ореолу, 0,2–0,4 — верхнерудному, 0,4–0,6 — среднерудному, 0,6–0,8 — нижнерудному, 0,8–1,0 — подрудному)

Продольная геохимическая зональность рудного кластера заключается в последовательном сокращении числа геохимических ассоциаций с юга на север. В Главном штокверке развиты все шесть ассоциаций при наиболее высокой концентрации входящих в них элементов. В Центральном штокверке падает содержание большинства рудных элементов и сокращается объем развития главной продуктивной ассоциации $CuAuAg(SeBiAs)$. В составе минерализации Северного штокверка роль поздних стадий малозначительна, и резко сокращается проявление богатого борнитового оруденения.

Главная причина формирования наблюдаемой поперечной и особенно продольной зональности заключается, видимо, в последовательном снижении масштаба гидротермальной деятельности в процессе эволюции рудно-магматической системы, что привело к возникновению так называемой обратной геохимической зональности. По мере деградации ПЭС субэпитермальная и эпипермальная минерализация отлагались все ближе к очагу, продуцирующему гидротермальный флюид; область отложения постепенно сокращалась, а объем минерализации от стадии к стадии уменьшался.

При исследовании вертикальной геохимической зональности в программе НЮ-2 были получены следующие ряды. По разрезам Главного штокверка установлена последовательность отложения элементов снизу вверх: $Sb-As-Au-Cu-Mo-Ag-Bi-Se$, $Te-Mn-Pb-Fe-Cd-Zn$, Центрального штокверка — $As-Pb-Au-Ag-Cd-Zn-Cu-Mn-Mo-Sb-Bi-Fe-Se-Te$, Северного штокверка — $Mo-Au-Ag-Cu-Bi-Sb-As-Se$, $Te-Cd-Mn-Pb-Zn-Fe$.

Эти ряды отложения элементов по вертикали и положение в них меди (более высокое в Центральном штокверке и пониженное в Главном и Северном) свидетельствуют в пользу неглубокого эрозионного среза медно-порфирового оруденения. Положение центра тяжести накопления меди в Центральном штокверке — признак большей степени его эродированности по сравнению с Главным штокверком.

Все элементы правой (верхней) части ряда входят в состав субэпитермальной полиметаллической минерализации, тяготеющей, как правило, к верхнерудным частям ПЭС [Lowell, Guilbert, 1970]. Сравнительно узок спектр элементов, отлагавшихся ниже меди: среди них нет классических нижнерудно-подрудных (Sn, W, Co и др.), это свойство базы исходных данных (недостаточно низкий предел обнаружения выбранными аналитическими методами или отсутствие в перечне определяемых элементов).

Единственный элемент, занимающий несвойственное ему низкое положение в ряду зональности, — мышьяк. Установленная значимая корреляция между мышьяком и блеклыми рудами, а также результаты минералогических исследований однозначно свидетельствуют, что его основной формой нахождения является теннантит.

Для оценки уровня эрозионного среза ПЭС использовали выявленный при обработке по программе НЮ-2 показатель зональности $v=AgPbZn:CuAuMo$, здесь числитель представлен геохимической ассоциацией, которая соотносится с составом субэпитермальной полиметаллической минерализации, развитой на верхних уровнях ме-

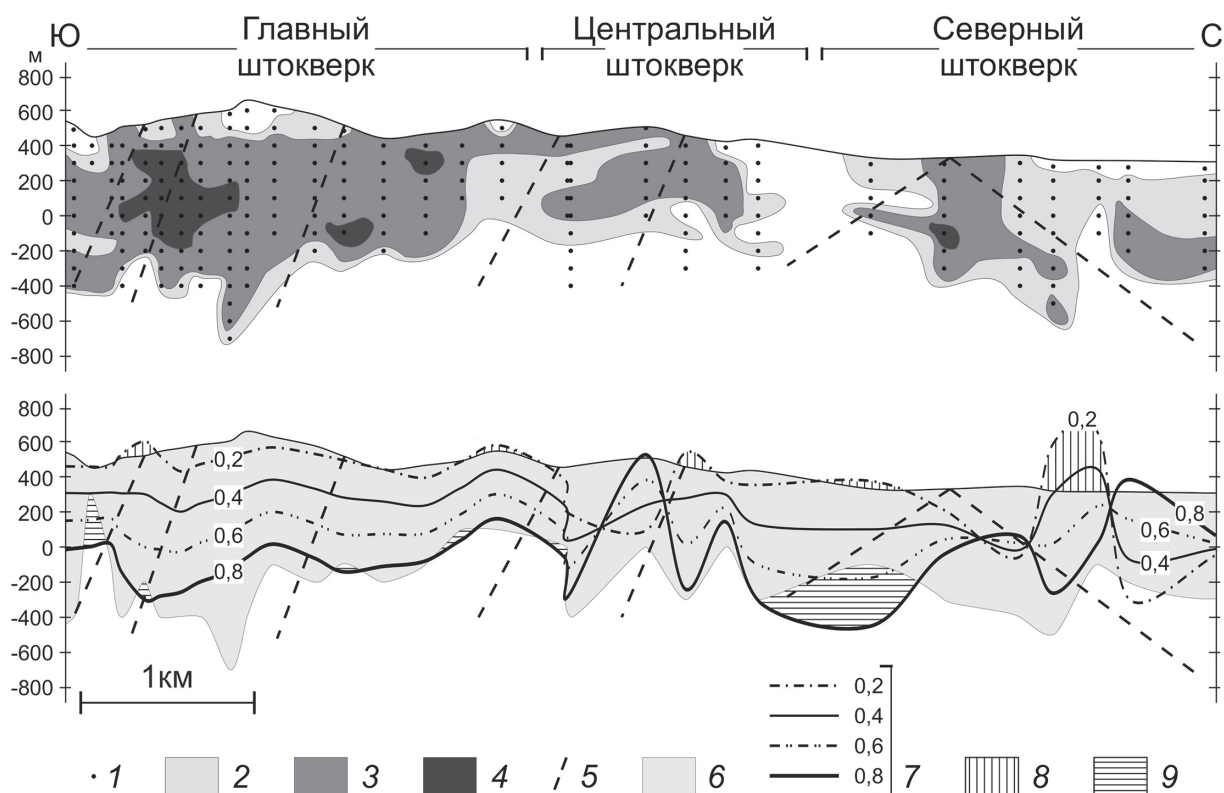


Рис. 5. Распределение меди на продольном разрезе через месторождение Песчанка и изменение значения показателя вертикальной геохимической зональности $AgPbZn/CuAuMo$ по нему: 1 — положение условных точек опробования, характеризующих средневзвешенный состав стометрового интервала; 2–4 — содержание меди в первичных ореолах, %: 2 — 0,1–0,2; 3 — 0,2–0,5; 4 — >0,5; 5 — тектонические нарушения; 6 — объем месторождения, охваченный бурением; 7 — изолинии показателя зональности $AgPbZn/CuAuMo$ в метрике рудного тела (см. рис. 4); 8 — интервал оруденения, уничтоженный эрозией; 9 — резерв оруденения на глубину

сторождения, а в знаменатель вошли главные элементы медно-порфирового оруденения. Значения показателя изменяются в пределах трех порядков (от n до $n \cdot 10^3$).

Изолинии показателя вертикальной зональности в поперечном сечении Главного штокверка имеют сложное строение (рис. 4, А). В восточном крыле седловидной залежи изолинии субпараллельны поверхности и осложнены изгибами. В западном крыле векторы осевой и вертикальной зональности не совпадают, а изолинии имеют глубокое погружение, чередующееся с резким воздыманием. Вероятно, здесь движение гидротерм происходило под пологим углом к дневной поверхности, определяя направление вектора рудоотложения, поэтому в западном крыле залежи наблюдается обратная зональность, когда с глубиной значения показателя убывают, а затем начинают повышаться.

В приповерхностной части медного штокверка монотонное возрастание значений показателя зональности нарушается за счет гипергенного изменения руд (рис. 4, Б). Для оценки в метрике модели слабоизученных медно-порфировых объектов Баимской зоны необходимо вводить поправки или исключать из подсчетов результаты

анализов борзодовых проб по канавам и керна верхних интервалов скважин, вскрывающих зоны выщелачивания и вторичного сульфидного обогащения [Сидорина, Балыкова, 2017].

Для установления значений показателя, соответствующих эрозионному срезу по выклинкам рудного тела (в условной метрике $z=0,2$ для верхней и $z=0,8$ для нижней выклинки), использованы параметры модели с бортовым содержанием меди, равным 0,2%. Верхней вылинке оруденения модели соответствуют значения показателя $v=3000$, нижней — $v=10$. Надрудный ($0,0 < z < 0,2$) и подрудный ($0,8 < z < 1,0$) первичные ореолы характеризуются значениями $v > 3000$ и < 10 соответственно.

Построение изолиний показателя зональности в продольном разрезе месторождения дает представление о сжатости–растянутости рудно-магматической системы, степени эродированности и наличии резервов оруденения на глубине в рудном кластере месторождения Песчанка (рис. 5). По средним значениям показателя $AgPbZn:CuAuMo$ установлен ряд сохранности штокверков от меньшей к большей: Северный — Центральный — Главный. Основные резервы на глубину прогнозируются в интервале между Центральным и Северным штокверками. Южный фланг Главного

штокверка оценивается как наиболее перспективный — здесь можно ожидать выявления богатого слепого оруденения.

Заключение. В геохимической структуре месторождения Песчанка поперечная зональность проявлена в смене ассоциаций от внутренней зоны к внешним в последовательности: SbAs — CuAuAg(SeBiAs) — TeBi(SeCdFeAg) — Mo(SeCu) — ZnPbCd(TeAgSeMn) — TeBi(SeCdFeAg) — MnFe. Продольная геохимическая зональность заключается в сокращении объема второстепенных ассоциаций в составе оруденения в северном направ-

лении. По результатам исследования вертикальной геохимической зональности установлено, что при образовании Главного штокверка элементы последовательно концентрировались снизу вверх в порядке Sb—As—Au—Cu—Mo—Ag—Bi—Se, Te—Mn—Pb—Fe—Cd—Zn.

Штокверки месторождения характеризуются эрозионным срезом от верхнерудного (Главный) до средне-рудного (Центральный, Северный). Перспективы продолжения оруденения на глубину оценены как высокие для Главного и Центрального штокверков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Боровиков В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA. М.: Горячая линия — Телеком, 2013.

Каминский В.Г. Комплексная геолого-поисковая модель медно-порфирикового месторождения Баймской зоны // Сов. геология. 1989. № 11. С. 46–56.

Марущенко Л.И., Бакшеев И.А., Нагорная Е.В. и др. Кварц-серицитовые метасоматиты и аргиллизиты Au—Mo—Cu месторождения Песчанка (Чукотка) // Геология рудных месторождений. 2015. Т. 57, № 3. С. 239–252.

Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А., Прокофьев В.Ю. и др. Au—Ag минерализация порфириро-эпитермальных систем Баймской зоны (Западная Чукотка, Россия) // Геология рудных месторождений. 2016. Т. 58, № 4. С. 319–345.

Сидорина Ю.Н., Балыкова И.В. Медно-порфириковые месторождения Песчанка и Находка, Западная Чукотка: оценка геохимических ресурсов с учетом наличия зоны окисления // Геология, поиски и комплексная оценка месторождений твердых полезных ископаемых: Тез. докл. VII науч.-практ. школы-конференции молодых ученых и специалистов с международным участием. М.: ВИМС, 2017. С. 117–120.

Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1985.

Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А. и др. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990.

Читалин А.Ф., Николаев Ю.Н., Бакшеев И.А. и др. Порфириро-эпитермальные системы Баймской рудной зоны, Западная Чукотка // Проблемы минерагении, экономической геологии и минеральных ресурсов (Смирновский сборник — 2016). М.: Макс-Пресс, 2016. С. 82–115.

Читалин А.Ф., Усенко В.В., Фомичев Е.В. Баймская рудная зона — кластер крупных месторождений цветных и драгоценных металлов на западе Чукотского АО // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 6. С. 68–73.

Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // Econ. Geol. 1970. Vol. 65. P. 373–408.

Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Econ. Geol. 2010. Vol. 105. P. 3–41.

Поступила в редакцию
07.06.2017