

Научная статья
УДК 549.553.2
DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-1-50-61

О геохимической зональности Верхне-Алиинского месторождения золота в Забайкалье (Россия)

Георгий Александрович Юргенсон

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия
yurgga@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию
04.02.2024

Одобрена после
рецензирования 07.02.2024

Принята к публикации
09.02.2024

Ключевые слова:

геохимическая зональность, глубина формирования, золото, жильный кварц, пирит, совершенство кристаллического строения, Верхне-Алиинское месторождение, Забайкалье

Актуальность исследования заключается в необходимости иметь объективные геохимические данные для оценки уровня эрозионного среза вновь открываемых проявлений рудных месторождений. Одним из примеров, используемых для решения этой задачи, являются результаты изучения минералогии и геохимии Верхне-Алиинского месторождения золота в Забайкалье. Цель исследования – определение зональности в распределении минералов, золота и попутных химических элементов в пространстве месторождения и их оценки как критериев рудной зональности. Объект исследования – Верхне-Алиинское месторождение золота. Предмет исследования – пространственное распределение минералов и химических элементов в золоторудных зонах месторождения. Метод и методология заключаются в диагностике, определении содержания химических элементов и установлении закономерности в их пространственном распределении с использованием современных методов анализа, а именно: электронной микроскопии, пробирного анализа и ICPMS, определения степени совершенства кристаллического строения. Результаты исследования заключаются в том, что определены содержания золота и сопутствующих химических элементов в трёх наиболее промышленно важных рудоносных зонах Западной, Широтной и Восточной, отличающихся глубиной формирования. Для наименее глубокой Восточной зоны характерно интенсивное развитие минералов цинка, свинца, сурьмы и мышьяка и, соответственно, максимальное их содержание в её верхней части. Для наиболее глубокой Западной зоны выявлено максимальное развитие пирротина, халькопирита, кобальта и показано, что кобальт-никелевое отношение является важным критерием оценки уровня эрозионного среза. Важным критерием глубинности является также степень совершенства кристаллического строения жильного кварца, зависящего как от скорости кристаллизации, определяющейся глубиной от дневной поверхности во время формирования месторождения, так и от количества в нём изоморфных примесей. Показано, что одним из важных критериев уровня эрозионного среза является содержание рубидия в жильном кварце и мышьяка в пирите.

Благодарности: автор признателен Н. С. Балуеву за участие в оформлении рисунков; работа выполнена в рамках госзадания по теме № FUFRR-2021-0005.

Original article

On the Geochemical Zoning of the Verkhnealiinsky Gold Deposit in Transbaikalia (Russia)

Georgy A. Yurgenson

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia
yurgga@mail.ru

Information about the article

Received February 4, 2024

Approved after review
February 7, 2024

Accepted for publication
February 9, 2024

The relevance of the study lies in the need to have objective geochemical data to assess the erosion section level of newly discovered manifestations of ore deposits. One of the examples, used to solve this problem, is the results of the mineralogy and geochemistry study of the Verkhnealiinsky gold deposit in Transbaikalia. The purpose of the study is to determine the zonality in the distribution of minerals, gold and associated chemical elements in the deposit space and to evaluate them as criteria for ore zoning. The object of the study is the Verkhnealiinsky gold deposit. The subject of the research is the spatial distribution of minerals and chemical elements in the gold

ore zones of the deposit. The methodology consists in diagnostics, determination of the chemical elements content and the establishment of regularities in their spatial distribution using modern methods of analysis, namely, electron microscopy, assay analysis and ICP MS, determination of the degree of the crystal structure perfection. The results of the study are as follows: the content of gold and associated chemical elements in the three most industrially important ore-bearing zones of the Western, Latitudinal and Eastern zones, which differ in the depth of formation, have been determined. The least deep Eastern zone is characterized by the intensive development of zinc, lead, antimony, and arsenic minerals and, accordingly, their maximum content in its upper part. For the deepest Western zone, the maximum development of pyrrhotite, chalcopyrite, and cobalt has been revealed, and it is shown that the cobalt-nickel ratio is an important criterion for assessing the level of erosion cut. An important criterion of depth is also the degree of the crystalline structure perfection of vein quartz, which depends both on the crystallization rate, which is determined by the depth from the day surface during the formation of the deposit, and on the amount of isomorphous impurities in it. It is also shown that one of the important criteria for the level of erosion section is the content of rubidium in veined quartz and arsenic in pyrite.

Keywords:

geochemical zoning, depth of formation, gold, vein quartz, pyrite, perfection of crystalline structure, Verkhnealiinsky deposit, Transbaikalia

Acknowledgements: the author is grateful to N. S. Baluev for participation in the design of drawings; the work was carried out within the framework of the state task under the project No. FUFР-2021-0005.

Введение. Верхне-Алиинское месторождение находится в Бале́йском рудном районе Восточного Забайкалья в верхнем течении р. Алия (рис. 1).

Геологическая позиция месторождения, геолого-структурные особенности и условия образования его рассмотрены в работах А. А. Воротынцева, И. Г. Рутштейна, А. М. Спиридонова и других исследователей [1; 10; 11]. Месторождение входит в состав Мунгинского рудного узла Бале́йского рудного района, находящегося в западном замыкании фундамента Шадоронской впадины юрского континентального рифтогенеза в пределах

золотолибденовой части Монголо-Охотского пояса.

Верхне-Алиинское золоторудное месторождение открыто в 1980 г. Казаковской геолого-разведочной экспедицией в процессе проведения поисково-разведочных работ. С 1981 по 1983 г. А. А. Воротынцевым, Н. В. Куприенко, В. Е. Ландой выполнены поисково-оценочные работы, а затем с 1985 по 1986 г. – предварительная разведка, подсчитаны запасы месторождения. Лицензия на разведку и добычу полезных ископаемых Верхне-Алиинского месторождения с 2005 г. принадлежит ЗАО «Золоторудная компания “Омчак”»,



Рис. 1. Местоположение Верхне-Алиинского месторождения золота / **Fig. 1.** Location of the Verkhnealiinsky gold deposit

которая выполнила детальную разведку, и запасы по состоянию на 1 января 2018 г. (по категории A+B+C₁+C₂) составляют 18 т золота. Месторождение начали разрабатывать в начале 2020 г.

Оно приурочено к юго-западному борту Шадоронской впадины в узле пересечения субмеридионального Алиинского и субширотного Ломихинского разломов и локализовано в оперяющих субширотных трещинах скалывания в монцонитах Алиинского штока акатуйского интрузивного комплекса, прорывающего гранитоиды шахтаминского интрузивного комплекса, в дайках гранодиорит-порфиоров и в андезидацитах шадоронской осадочно-вулканогенной серии средней и поздней юры, K-Ag-возраст которых 143–192 млн лет. K-Ag-возраст шахтаминского интрузивного комплекса – 150–170 млн лет, а монцонитов акатуйского интрузивного комплекса – 141–168 млн лет [10].

Месторождение относится к среднеглубинной золото-сульфидно-кварцевой формации и представляет собой серию сульфидно-кварцевых жильных зон в магматических горных породах, отличающихся по условиям локализации, глубине образования и золотоносности. Геолого-структурная схема месторождения представлена на рис. 2. Промышленные рудные тела разведаны в трёх золотоносных зонах.

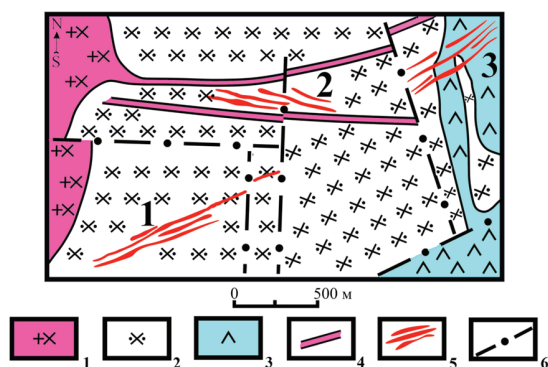


Рис. 2. Схема расположения золоторудных зон Верхне-Алиинского месторождения (составлена по данным: А. А. Воротынцев и др., 1984) с изменениями: 1 – гранодиориты шахтаминского интрузивного комплекса; 2 – монцониты; 3 – юрские андезидациты; 4 – дайки гранодиорит-порфиоров; 5 – рудные зоны (1 – Западная, включая зону V; 2 – Широтная; 3 – Восточная); 6 – линии тектонических швов / **Fig. 2.** Scheme of the gold ore zones location of the Verkhnealinsky deposit (compiled according to: A. A. Vorotyntsev et al., 1984) with changes: 1 – granodiorites of the Shakhtama intrusive complex; 2 – monzonites; 3 – Jurassic andesidacites; 4 – granodiorite-porphry dikes; 5 – ore zones (1 – Western, including zone V; 2 – Latitudinal; 3 – Eastern); 6 – lines of tectonic seams

Западная зона Верхне-Алиинского месторождения, включающая I, X, V рудные зоны и другие жильные тела, находится в монцонитах ранней фазы акатуйского интрузивного комплекса юрского возраста, среди которых присутствуют габброиды и перидотиты. Широтная рудная зона с промышленным оруденением, включающая жильные зоны 1 и 2, локализована в биотитовых гранодиоритах и монцонитах, а Восточная зона, включающая жильную зону Главную, жилу Антимонитовую и другие, находится в биотитовых граносиенитах и монцодиоритах акатуйского интрузивного комплекса, а также в андезидацитах шадоронской осадочно-вулканогенной серии среднепоздней юры.

Жильные зоны представлены крутопадающими жилами сложного строения и жиллообразными минерализованными зонами в аргиллизированных, пропицитизированных и березитизированных гранодиоритах, монцонитах и габбро, а также частью в листовитизированных перидотитах и вулканитах. Протяжённость минерализованных зон и жил по простиранию составляет 100–1 000 м, до 400 м и более по падению. Мощность – 0,1–7,6 м, содержание золота – от 0,8 до 334 г/т (среднее 11,7), серебра – от 1,3 до 298 г/т (среднее 21,6), мышьяка – от 0,04 до 22,4 %. Содержания (мас. %) свинца – 0,2–4; меди – 0,02–4,2; цинка – 0,1–0,9; висмута – 0,01–0,3. Распределение сурьмы крайне неравномерно и достигает в среднем 2 % в жиле Антимонитовая.

Целесообразность изучения зональности месторождения определяется необходимостью иметь количественные критерии для оценки и прогнозирования золотого оруденения в целях их использования как в случае продолжения геолого-разведочных работ в пределах Мунгинского рудного узла, в котором локализовано Верхне-Алиинское месторождение, так и на других вновь открываемых проявлениях золота подобного типа. Необходимость этих исследований определяется также известным опытом изучения рудных полей и месторождений в других регионах [2; 3; 5; 6; 8; 9]. В работах А. Ф. Коробейникова, Ю. С. Ананьева и других учёных [7; 8; 15] показано, что геохимические особенности пирита, наиболее распространённого из рудных минералов, могут быть использованы для оценки уровня эрозийного среза. Это же относится и к жильному кварцу [2–4; 13; 14; 16].

Материал и методы исследования. В работе использованы результаты изучения

месторождения во время проведения геолого-разведочных работ, что позволило отобрать точно привязанный каменный материал непосредственно из горных выработок, канав, траншей и штолен. Пробы отбирались по разрезам, включающим вмещающие горные породы, приконтактовые части жил, их переходные к срединной части и непосредственно срединные части. Степень совершенства кристаллического строения (СКС) кварца определена по методике, разработанной автором совместно с Г. Т. Тумуровым, впервые описанной в работе «О совершенстве кристаллического строения жильного кварца» [16]. Сущность метода заключается в измерении высоты и полуширины пиков для отражений рентгеновских лучей от плоской сетки (2354) образца и эталона. Ширина пика зависит от дисперсии углов дифракции, обусловленной отклонениями частей плоской сетки в структуре кварца от плоскости. Измерения производились для фракции пробы жильного кварца чистотой 95–99 % класса $-0,071...+0,05$ мм в камере РКЭ и на дифрактометре ДРОН-3м. Для съёмки дифрактограмм отражений (2354) использовалось нефльтрованное медное излучение при скорости счётчика 0,5 град. в минуту, скорость движения самописца – 10 мм в минуту. Оценка интегральной величины степени СКС дана по стобалльной шкале, где степень СКС эталона, в качестве которого использовался кристалл кварца из месторождения Кожим (Полярный Урал), принята за 100. Диагностика и химический состав минералов изучены с использова-

нием электронно-микроскопического метода на растровом электронном микроскопе LEO 1430 VP (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, аналитики Е. В. Ходырева и Е. А. Хромова, руководитель лаборатории канд. техн. наук С. В. Канакин). Количественные соотношения минералов определялись в протоколках (14 проб), аналитики С. И. Берегова, Т. Н. Юргенсон (ЗабНИИ). Химические анализы выполнены методом ICP-MS в лаборатории ОАО «Восток лимитед» (руководители Т. Л. Попова и А. Шацких) и химической лаборатории ГИН СО РАН методом РФА на спектрометре ЭДПС-1 (аналитик Б. Ж. Жалсараев).

Результаты исследования и их об-суждение. В результате изучения минерального состава и строения, а также геохимической специализации вмещающих горных пород и жильного выполнения трёх главных зон с промышленным оруденением выявлена довольно чёткая их зональность.

В процессе поисково-разведочных работ (Воротынцев и др., 1983), а также наших исследований в рудах Верхне-Алиинского месторождения установлено более 50 минеральных видов, главными из которых являются пирит, арсенопирит, кварц и кальцит (табл. 1). К другим минералам, в том или ином количестве присутствующим в рудах, относятся халькопирит, галенит, сфалерит, золото самородное, сульфосоли, стибнит, висмутин, сульфотеллуриды висмута и сульфовисмутиты свинца, а также каолинит, доломит, турмалин, иллит и др.

Таблица 1 / Table 1

Минеральный состав кварцево-жильных зон / Mineral composition of quartz-vein zones

Относительная распространённость / Relative prevalence	Минеральные виды / Mineral species	
	Рудные / Ore	Жильные / Vein
Основные (>10 %) / Basic (>10 %)	Пирит, арсенопирит / Pyrite, arsenopyrite	Кварц, кальцит / Quartz, calcite
Второстепенные (1 – 10 %) / Secondary (1 – 10 %)	Галенит, сфалерит, халькопирит, буланжерит, пирротин, гидроксиды железа / Galena, sphalerite, chalcopyrite, boulangerite, pyrrhotite, ironhydroxides	Анкерит, доломит, мусковит, турмалин, иллит, стильномелан / Ankerite, dolomite, muscovite, tourmaline, illite, stilpnomelane
Малораспространённые (0,01–1,0 %) / Lesscommon (0,01–1,0 %)	Халькопирит, пирротин, блеклая руда, марказит, пентландит, кобальтин, хромит, магнетит, шеелит, молибденит, церуссит, стибнит, висмутин, ярозит, скородит / Chalcopyrite, pyrrhotite, fahlore, marcasite, pentlandite, cobaltine, chromite, magnetite, scheelite, molybdenite, cerussite, stibnite, bismuthinite, jarosite, scorodite	Каолинит, титанит, цоизит, эпидот, хлорит / Kaolinite, titanite, zoisite, epidote, chlorite
Редкие <0,01 % / Rare <0,01 %	Золото самородное, <i>электрум</i> , серебро самородное, тетрадимит, ильменит, полидимит, линнеит, бурнонит, менегинит, <i>андорит</i> , <i>мадокит</i> , <i>семсейит</i> , <i>плагионит</i> , <i>джирит</i> / Native gold, electrum, native silver, tetradymite, ilmenite, polydymite, linneite, bournonite, meneginite, andorite, madokite, semseyite, plagionite, geerite	Циркон, рутил, топаз, <i>монацит</i> / Zircon, rutile, topaz, monazite

Примечание: курсивом обозначены минералы, впервые установленные в рудах автором / Note: italics indicate minerals first identified in ores by the author.

Главные рудные зоны месторождения, глубина образования которых от древней земной поверхности была различной, отличаются соотношениями главных минералов, на количества которых оказали влияние и вмещающие горные породы.

В минеральных продуктивных комплексах наименее глубинных жил Восточной рудной зоны, как это видно из табл. 2, главными минералами являются пирит, арсенопирит, сфалерит, галенит при уменьшении доли пирротина, халькопирита и висмутита и возрастании буланжерита и блеклых руд. Шеелит и молибденит встречаются редко. В жиле Антимонитовой резко увеличивается количество стибнита.

Среди структурно-текстурных разновидностей кварца преобладают тонко- и мелкозернистые агрегаты, содержащие слоистые силикаты (каолинит, гидрослюда). В самых верхних частях жилы Главной, а также Антимонитовой развиты кремневидный и халцедоновидный кварц. Текстуры – полосчато-массивные, брекчиевидные. Отмечена следующая общая последовательность образования минералов в жилах: сульфидно-турмалино-кварцевые агрегаты краевых частей сменяются существенно кварцевыми с сульфидами и сульфосолями в направлении к оси жилы. Эта последовательность неоднократно повторяется в результате внутриминерализационного взламывания, брекчирования и залечивания.

Здесь обилён пирит, развивающийся как во вкрапленниках полевого шпата, так и в массе аргиллизита и пропилита.

Широтная зона содержит меньше сульфидов, среди которых преобладают пирит, арсенопирит и пирротин. Уменьшается содержание сфалерита, галенита и сульфосолей, но возрастает количество халькопирита и шеелита, чаще встречается молибденит и появляется кобальтин. Кварц жильного выполнения мелко- и среднезернистый, иногда он переходит в шестовато-гребенчатый, на глубоких горизонтах в нём появляются мелкие друзовые полости, иногда с хорошо образованными кристаллами. Околорудные изменения вмещающих гранодиоритов и монзонитов проявлены в пропилитизации и березитизации.

Западная рудная зона локализована в монзонит-диоритах и частью в габброидах ранней фазы шахтаминского интрузивного комплекса юрского возраста. В ней наряду с пиритом, арсенопиритом, пирротином и халькопиритом развиты минералы кобальта и никеля, в частности, пентландит, линнеит и полидимит. Увеличивается доля висмутита и шеелита. Кварц в верхних частях тонко- и мелкозернистый. С глубиной возрастает роль среднезернистого, в срединных частях жил развит преимущественно массивный и шестовато-гребенчатый, а на участке нижнего выклинивания гребенчатый кварц.

Таблица 2 / Table 2

Распределение главных и второстепенных минералов в рудных зонах / Distribution of major and minor minerals in ore zones

Главные минералы / Main minerals	Рудная зона и содержание минерала, % / Ore zone and mineral content, %		
	Западная / Western	Широтная / Latitudinal	Восточная / Eastern
Пирит / Pyrite	До 5	10–30	>30
Арсенопирит / Arsenopyrite	До 15	До 20	До 25
Пирротин / Pyrrhotite	До 30	До 20	До 10
Халькопирит / Chalcopyrite	1–5	1–3	До 0,1
Сфалерит / Sphalerite	До 0,1–1,5	До 5	До 15
Галенит / Galena	0,05–0,15	1–1,5	До 5
Буланжерит / Boulangerite	До 0,02	До 0,05	До 4
Марказит / Marcasite	До 1	0,1–0,8	До 5
Блеклые руды / Fahl ores	До 0,01	До 0,01	До 0,08
Висмутин / Bismuthinite	До 0,1	До 0,07	До 0,04
Пентландит / Pentlandite	0,1–0,2	Н. О.	Н. О.
Кобальтин / Cobaltite	До 0,01	До 0,01	Н. О.
Линнеит / Linneite	До 0,01	Н. О.	Н. О.
Полидимит / Polydymite	До 0,01	Н. О.	Н. О.
Молибденит / Molybdenite	До 0,01	0,001–0,01	До 0,001
Шеелит / Sheelite	0,001–0,02	0,001–0,02	До 0,001
Хромит / Chromite	До 0,1	Н. О.	Н. О.
Магнетит / Magnetite	До 0,1	Н. О.	Н. О.

Примечание: Н. О. – не обнаружен; До – меньше или равно – Note: Н. О. – Notfound; До – less or equal.

Таким образом, в Западной и Широтной зонах главной минеральной ассоциацией является пирит-арсенопирит-халькопиритовая, а в Восточной пирит-арсенопирит-галенит-сфалеритовая.

Наиболее распространённым в рудах и околорудных изменённых горных породах месторождения является пирит. Содержание его в продуктивном жильном комплексе может достигать 30 %. Он ассоциирует с арсенопиритом, халькопиритом, сфалеритом, галенитом, висмутином, стибнитом, буланжеритом, гидроксидами железа. Величина индивидов варьирует от долей миллиметров до 1 см. Наиболее распространены кристаллы кубического габитуса, которые приобретают нередко кривогранную форму за счёт слабого развития грани пентагондодекаэдра.

Химический состав пирита непостоянен. Средние содержания основных компонентов находятся в пределах (мас.%): Fe 45,55 – 48,35; S 51,47–53,31.

Пирит в верхней части жилы Главная в Восточной рудной зоне отличается примесью мышьяка в количестве 0,49–2,0 %. В пирите верхней части этой жилы установлена также и 0,46 % сурьмы, что характерно для пирита надрудной зоны Тасеевского месторождения (Юргенсон, 2021), а Sb и Co содержатся в количествах соответственно 0,62 и 0,48 мас.%. О примесях сурьмы в пирите верхних частей месторождения золота есть также указания в работе А. Ф. Коробейникова с соавторами [8].

Формульные коэффициенты главных компонентов и примесей в пирите довольно широко варьируют. Если для беспримесного пирита они находятся в пределах Fe_1S_2 – $Fe_{1,03}S_{1,97}$, то для индивидов, содержащих мышьяк – $Fe_1(S_2As_{0,01}) \rightarrow Fe_{0,99}(S_{1,99}As_{0,02}) \rightarrow Fe_{1,02}(S_{1,96}As_{0,03}) \rightarrow Fe_{1,01}(S_{1,95}As_{0,03}) \rightarrow Fe_{1,04}(S_{1,93}As_{0,03})$. В основном при замещении серы мышьяком наблюдается избыток железа. Это же относится и к случаю, когда сера замещается также сурьмой: $Fe_{1,01}(S_{1,9}As_{0,02}Sb_{0,01})$. Избыток Fe наряду с дефицитом S виден и при замещении его на кобальт: $Fe_{1,05}Co_{0,01}S_{1,94}$.

Одним из признаков принадлежности минеральной ассоциации к верхней части рудной зоны является присутствие такого редкого сульфида меди, как джирит, первая находка которого в Забайкалье сделана в 2023 г. в многократно брекчированной части жилы Главная в верхней её части. Его особенностью является присутствие меди в двух валентностях [12; 17; 18], и рассчитанная формула его анализа имеет вид: $Cu^1_{5,96}Cu^{2+}_2S_{5,04}$.

Особенностью жильного кварца жилы Главная в зоне Восточной, а также в жилах Широтной и V кварцево-жильной зоны в Западной рудной зоны является чёткое изменение с глубиной совершенства его кристаллического строения (СКС). Если в приконтактных и верхних частях жил оно минимально и величины его находятся в пределах 39–65, то с глубиной оно возрастает до 93.

Кварц Верхне-Алиинского месторождения характеризуется структурными примесями Al, Fe, Ti, а также и Na, в качестве компенсатора дефицита положительного заряда при замещении этими элементами кремния в кремнекислородных тетраэдрах. Поскольку при этом гетеровалентном изоморфизме происходит возрастание объёма элементарных ячеек в кварце, способствующего уменьшению совершенства его кристаллического строения, методом электронной микроскопии определены его химические составы из различных частей рудных зон месторождения. Вариации состава кварца характеризуются формульными коэффициентами кремния, алюминия и железа. Из 34 измеренных индивидов кварца лишь 5 лишены примесей. Химический состав его находится в пределах $Si_{0,968}Al_{0,043}O_2$ – $Si_{0,997}Al_{0,003}O_2$. В целом в этом направлении возрастает СКС. Лишь в трёх индивидах, представленных наиболее поздним аметистовидным мелкогребенчатым кварцем, кремний замещается наряду с алюминием и трёхвалентным железом. В них доля замещённого кремния варьирует в широких пределах от 0,99 до 0,964 формульных коэффициентов: $Si_{0,964}Al_{0,034}Fe_{0,021}O_2$ – $Si_{0,99}Al_{0,008}Fe_{0,007}O_2$. В этом направлении возрастает степень от СКС 39 до 93.

Кроме того, выявлены также индивиды позднего кварца, содержащего в качестве примесей только железо. Состав их отображается формулами $Si_{0,997}Fe_{0,007}O_2$ – $Si_{0,999}Fe_{0,003}O_2$. В связи с незначительным количеством примесного железа этот аметистовидный кварц отличается высоким значением СКС.

Кварц, лишённый изоморфных примесей, имеет обычно стехиометрический состав и СКС в пределах 73–93 в зависимости от размеров зёрен, являющихся показателем скорости его кристаллизации.

Сравнительные данные по изменчивости СКС в зависимости от размеров зёрен и глубин формирования приведены на рис. 3, из которого видна чёткая зональность этого свойства.

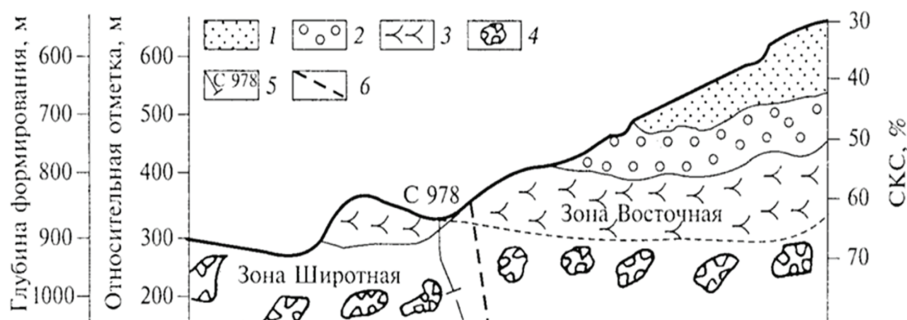


Рис. 3. Сопряжение разноглубинных Широтной и Восточной зон и отражение глубин их образования в величинах степени СКС жильного кварца (проекция на вертикальную плоскость): 1 – халцедоновидный кварц; 2 – тонко-мелкозернистый кварц; 3 – среднезернистый кварц; 4 – средне-крупнозернистый кварц, участками друзоватый; 5 – скважина и её номер; 6 – предполагаемая тектоническая структура сочленения / **Fig. 3.** Change in the the perfection degree of vein quartz crystal structure within the Verkhnealiinsky deposit (Projection onto a vertical plane): 1 – chalcedony quartz; 2 – fine-grained quartz; 3 – medium-coarse-grained quartz; 4 – druzi in sections; 5 – well and its number; 6 – assumed tectonic structure of the articulation

О геохимической зональности. В зависимости от зональности минерального состава окорудных изменённых горных пород и жильного выполнения выявлена геохимическая зональность, представленная на примере жилы Главной Восточной зоны в табл. 3, в которой надрудная часть характеризует преимущественно зону аргиллизации, переходная – зону пропилитизации, а рудная – зону березитизации.

Анализ данных табл. 3 показал, что надрудная зона, включающая область рудных индикаторов, где развито окварцевание и сульфидизация, в которой главным минералом среди сульфидов является пирит, тем не менее характеризуется относительно высокими содержаниями мышьяка, сурьмы, свинца и цинка, которые нарастают по мере приближения к рудной зоне. При этом содержания меди, вольфрама и висмута в зоне рудных индикаторов более чем на порядок меньше, в сравнении с рудной зоной.

Чётко различается поведение никеля и кобальта: содержание первого уменьшается почти в два раза, а второго – возрастает в четыре раза. При этом кобальт-никелевое отношение возрастает с глубиной почти в пять раз. Эта тенденция типична для большинства золоторудных месторождений и чётко прослеживается и для этого отношения в пирите [14]. Показательно и золотосеребряное отношение, которое в зоне рудных индикаторов составляет всего 0,031, а в рудной зоне возрастает до 0,107, т. е. более чем в три раза. Весьма показательно изменение содержаний висмута, увеличивающееся в рудной зоне в 56 раз по сравнению с таковым в зоне рудных индикаторов, соотношение содержаний

сурьмы и висмута также уменьшается в этом направлении от 66 до 4,74. Показательно уменьшение содержания рубидия в направлении от надрудной зоны к рудной (более чем в три раза). Все эти данные однозначно свидетельствуют о возможности их использования в качестве критериев оценки эрозийного среза подобных месторождений в случаях находок свалов жильного кварца или сульфидизированных метасоматитов.

Продолжено изучение содержаний главных элементов-спутников золота в продуктивных минеральных комплексах разноглубинных рудных зон Верхне-Алиинского месторождения. Выше показано, что глубинность формирования возрастает в направлении: Антимонитовая → Восточная в целом → Широтная → Западная (табл. 4, рис. 3). Как отмечалось ранее, наименее глубокой является жила Антимонитовая, входящая в состав Восточной зоны, верхняя часть которой локализована в аргиллизированных андезидацитах шадоронской серии. Для неё наиболее характерны самые высокие содержания (г/т) серебра (448), мышьяка (12380), сурьмы (15763), свинца (9876), цинка (10239), олова (280). Вольфрам (6) и никель (11) находятся в минимальных количествах. Совершенно отчётливо ведёт себя медь. Концентрации её здесь достаточно высоки по сравнению с Восточной зоной в целом и зоной Широтной, но примерно лишь в два раза меньше, чем в наиболее глубокой Западной зоне. Столь высокие содержания меди в жиле Антимонитовой связаны с широким развитием блеклых руд, тогда как основная часть меди, как сказано выше, в зоне Западной связана с халькопиритом (табл. 4).

Таблица 3 / Table 3

Статистические характеристики содержаний элементов-примесей в различных частях рудной зоны Восточная по вертикали / Statistical characteristics of the elemental impurities content sinvariousparts of the Vostochnaya ore zone vertically

Элемент / Element	Статистический параметр, содержание в г/т / Statistical parameter, contents, g/t	Рудная зона, её части и содержания элементов, г/т / Ore zone, its parts and element contents, g/t			
		Надрудная зона окварцевания и сульфидизации / Over-ore zone of silicification and sulfidization	Переходная к рудной зоне, жильный халцедоновидный и мелкозернистый кварц / Transitional to ore zone, vein chalcedony and fine-grained quartz	Рудная часть / Ore part	Рудная зона в целом / Ore zone as a whole
Au	x	0,6	2,7	8,2	5,8
	σ	1,6	4,0	8,5	3,7
	n	10	11	32	50
Ag	x	19	22,3	76,5	24
	σ	45	41,2	114,2	45
	n	18	22	88	160
As	x	951	4862	8976	4327
	σ	1820	5648	7894	4829
	n	18	22	88	100
Bi	x	3	6	167	55
	σ	4	5	454	170
	n	18	22	88	100
Sb	x	198	493	793	491
	σ	470	1190	2117	1242
	n	18	21	44	100
Cu	x	66	310	1108	123
	σ	32	727	2434	136
	n	18	22	88	100
Pb	x	471	1514	3125	3293
	σ	1148	3098	3876	3298
	n	18	22	88	100
Zn	x	580	1530	1997	1838
	σ	841	3110	3203	2310
	n	18	22	88	100
Co	x	11	4	46	7
	σ	9	2	152	3
	n	18	22	88	100
Ni	x	41	23	28	13
	σ	26	10	19	6
	n	18	22	88	100
Mo	x	2	3	2	3
	σ	1	3	1	2
	n	18	22	88	100
W	x	4	40	32	55
	σ	2	75	63	170
	n	18	22	88	100
Rb	x	182	149	54	101
	σ	92	120	27	89
	n	18	22	88	100

Примечание: x – среднее содержание; σ – среднеквадратичное отклонение; n – число проб.
Note: x – average content; σ – standard deviation; n – number of samples.

Статистические параметры содержаний главных рудных и примесных химических элементов в разноглубинных рудных зонах / Statistical parameters of the contents of the main ore and impurity chemical elements in different-depth ore zones

Элемент / Element	Статистические параметры / Statistical parameters	Рудные зоны и содержания элементов, г/т / Ore zones and element contents, g/t			
		Западная / Western	Широтная / Shirotnaya	Восточная / Eastern	Антимонитовая / Antimonitovaya
Ag	n	23	26	9	16
	x	85	49	106	448
	σ	137	29	101	357
As	n	23	26	9	16
	x	8690	10698	11285	12389
	σ	7540	7831	7848	8390
Bi	n	23	26	9	16
	x	758	528	279	58
	σ	2260	657	511	65
Cu	n	23	26	9	16
	x	3250	727	167	1600
	σ	3750	743	151	1520
Pb	n	23	26	9	16
	x	278	769	4820	9876
	σ	526	369	4610	6793
Mo	n	23	26	9	16
	x	3	3	3	3
	σ	6	1	3	1
Sb	n	23	26	9	16
	x	113	175	1140	15763
	σ	144	72	1600	9876
Sn	n	23	26	9	16
	x	19	16	57	280
	σ	24	10	45	249
W	n	23	26	9	16
	x	42	73	8	6
	σ	98	216	6	5
Zn	n	23	26	9	16
	x	198	1590	2870	10239
	σ	312	1340	6490	10123
Co	n	23	26	9	16
	x	751	53	6	12
	σ	2220	55	4	8
Ni	n	24	26	9	16
	x	155	18	14	11
	σ	269	7	9	6

Если рассматривать обозначенный ряд глубинности, то с глубиной и с востока на запад однозначно уменьшаются содержания мышьяка, сурьмы, обусловленные уменьшением роли арсенопирита, блеклых руд, буланжерита и стибнита, а также свинца и цинка, которые связаны с уменьшением роли как галенита и сфалерита, так и буланжерита и других сульфосолей для свинца. Это же в определённой мере прослеживается и для серебра, которое в жиле Антимонитовой в существенной мере связано с галенитом и сульфосолями. Возрастание его содержания

в Западной зоне по сравнению с Широтной обусловлено возрастанием доли халькопирита, с которым связано и увеличение содержания самородного золота, в котором постоянно присутствует серебро. Для наиглубинной Западной зоны характерно возрастание висмута и вольфрама, что обусловлено возрастанием в продуктивных минеральных ассоциациях висмутитина и шеелита (см. табл. 2). В этом же направлении, с Восточной зоны к Западной, возрастают и содержания кобальта и никеля, отображающие как возрастание глубины формирования рудоносных минеральных ас-

социаций, так и изменение вмещающих горных пород, среди которых в Западной рудной зоне возрастает доля габброидов и даже пироксенитов. С этим же связано и развитие в минеральных ассоциациях кобальтина, пентландита, линнеита и полидимита.

Выводы. Выявлена трёхфакторная минерало-геохимическая зональность, отображающая глубинность формирования и уровни эрозионного среза Восточной, Широтной и Западной рудоносных зон Верхне-Алиинского месторождения.

Вертикальная зональность отображается как в степени совершенства кристаллического строения кварца и его химическом составе, так и мышьяковистости пирита. Степень СКС возрастает в пределах жилы Главной Восточной зоны с глубиной. Высокая мышьяковистость пирита типична для её относительно малоглубинных верхнерудных частей, сложенных преимущественно халцедоновидным и тонкозернистым кварцем.

Сравнительный анализ содержаний элементов-спутников золота показал, что надрудная зона, включающая область руд-

ных индикаторов, характеризуется высокими содержаниями As, Sb, Pb и Zn и низкими содержаниями Cu, W и Bi, которые нарастают по мере приближения к рудной зоне. В этом направлении содержание Bi увеличивается в 56 раз, Au/Ag – от 0,031 до 0,107, Co/Ni – в 5 раз, а Sb/Bi уменьшается от 66 до 4,74. Эта тенденция типична для большинства золоторудных месторождений и чётко прослеживается в среднеглубинных золотосульфидно-кварцевых месторождениях [14].

Геохимическая зональность, проявленная в закономерных изменениях содержаний главных рудообразующих химических элементов, обусловлена как глубиной формирования рудных зон и уровнем их эрозионного среза, так и особенностями вмещающих их горных пород.

Полученные новые количественные данные о минеральной и геохимической зональности Верхне-Алиинского месторождения могут быть основой для разработки критериев оценки уровня эрозионного среза вновь открываемых проявлений золото-сульфидно-кварцевой формации.

Список литературы

1. Воротынцев А. А., Красников В. И., Ланда В. Е., Суматохин В. А., Рогов А. В., Ванин Н. И. Типоморфные свойства рудных минералов и зональность одного золотосульфидного месторождения // Типоморфизм минералов и его прикладное значение. Чита: ОНТИ ЗабНИИ, 1983. С. 42–44.
2. Гамянин Г. Н., Горячев Н. А., Викентьева О. В. Кысылга – золото-серебряное месторождение в терригенных толщах Верхояно-Колымских мезозоид // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35, № 33. С. 63–74.
3. Гвоздев В. И., Гребенникова А. А., Вах А. С., Горячев Н. А., Федосеев Д. Г. Эволюция процессов минералообразования при формировании золото-редкометалльных руд Средне-Голготайского месторождения (Восточное Забайкалье) // Тихоокеанская геология. 2020. Т. 39, № 1. С. 70–91.
4. Горячев Н. А. Жильный кварц золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса. Магадан, 1992. 136 с.
5. Константинов М. М., Косовец Т. Н., Кряжев С. Г., Наталенко М. В., Стружков С. В., Устинов В. И. Строение золотоносных рудообразующих систем. М.: ЦНИГРИ, 2002. 190 с.
6. Коробейников А. Ф. Научные основы прогнозно-минерагенических и поисковых исследований на благороднометалльное оруденение // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318, № 1. С. 14–22.
7. Коробейников А. Ф., Пшеничкин А. Я. Геохимические особенности пирита золоторудных месторождений // Геохимия. 1985. № 1. С. 93–104.
8. Коробейников А. Ф., Ананьев Ю. С., Гусев А. И., Ворошилов В. Г., Номоконова Г. Г., Пшеничкин А. Я., Тимкин Т. В. Рудно-метасоматическая и геохимическая зональность золоторудных полей и месторождений складчатых поясов Сибири. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2013. 458 с.
9. Нарсеев В. А. Эндеогенная зональность золоторудных месторождений Казахстана. Алма-Ата: КазИМС, 1973. 237 с.
10. Рутштейн И. Г., Богач Г. И., Винниченко Е. Л., Карасев В. В., Негода В. М., Шивохин Е. А., Абдукаримова Т. Ф., Надеждина Т. Н., Пинаева Т. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. М-50-IV (Шелопугино) / ред. Н. Н. Чабан. СПб.: Картограф. фабрика ВСЕГЕИ, 2002. 120 с.
11. Спиридонов А. М., Зорина Л. Д., Китаев Н. А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск: ГЕО, 2006. 291 с.
12. Флейшер М. Словарь минеральных видов. М.: Мир, 1990. 206 с.

13. Широкий О. И. Типоморфные особенности кварца и их использование при поисках, оценке и разведке жильных месторождений золота и олова: автореф. дис. ...канд. геол.-минерал. наук. Иркутск, 1986. 20 с.
14. Юргенсон Г. А. Типоморфизм и рудные формации. Новосибирск: Наука, 2003. 369 с.
15. Юргенсон Г. А. Особенности химического состава пирита надрудной зоны Тасеевского золото-серебряного месторождения (Россия, Забайкалье) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 5. С. 44–52. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-5-44-52.
16. Юргенсон Г. А., Тумуров Г. Т. О совершенстве кристаллического строения жильного кварца // Известия высших учебных заведений. Серия «Геология и разведка». 1980. № 6. С. 50–59.
17. Malcolm E. Back. Fleischers Glossary of Mineral Species. Tuscon: Mineralogical Record Inc., 2014. 420 p.
18. The New IMA List of Minerals – A Work in Progress. URL: <http://cnmnc.units.it> (дата обращения: 12.08.2023). Текст: электронный.

References

1. Vorotyntsev A. A., Krasnikov V. I., Landa V. E., Sumatokhin V. A., Rogov A. V., Vanin N. I. Typomorphic properties of ore minerals and zoning of one gold-sulfide deposit. Typomorphism of minerals and its applied significance. Chita: ONTI ZabNII, 1983. (In Rus.)
2. Gamyarin G. N., Goryachev N. A., Vikentyeva O. V. Kysylga – gold-silver deposit in the terrigenous strata of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoids. Pacific Geology, vol. 35, no. 33. pp. 63–74, 2016. (In Rus.)
3. Gvozdev V. I., Grebennikova A. A., Vakh A. S., Goryachev N. A., Fedoseev D. G. Evolution of mineral formation processes during the formation of gold-rare metal ores of the Sredne-Golgotai deposit (Eastern Transbaikalia). Pacific Geology, vol. 39, no. 1, pp. 70–91, 2020. (In Rus.)
4. Goryachev N. A. Vein quartz of gold deposits of the Yana-Kolyma belt. Magadan, 1992. (In Rus.)
5. Konstantinov M. M., Kosovets T. N., Kryazhev S. G., Natalenko M. V., Struzhkov S. V., Ustinov V. I. Structure of gold-bearing ore-forming systems. Moscow: TsNIGRI Publ., 2002. (In Rus.)
6. Korobeinikov A. F. Scientific foundations of predictive-mineragenic and prospecting studies for noble metal mineralization. Proceedings of Tomsk Polytechnic University, vol. 318, no. 1, pp. 14–22, 2011. (In Rus.)
7. Korobeinikov A. F., Pshenichkin A. Ya. Geochemical features of pyrite from gold deposits. Geokhimiya, no. 1, pp. 93–104, 1985. (In Rus.)
8. Korobeinikov A. F., Ananyev Yu. S., Gusev A. I., Voroshilov V. G., Nomokonova G. G., Pshenichkin A. Ya., Timkin T. V. Ore-metasomatic and geochemical zoning of gold ore fields and deposits of the fold belts of Siberia. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2013. (In Rus.)
9. Narseev V. A. Endogenous zoning of gold deposits in Kazakhstan. Alma-Ata: KazIMS, 1973. (In Rus.)
10. Rutshtein I. G., Bogach G. I., Vinnichenko E. L., Karasev V. V., Negoda V. M., Shivokhin E. A., Abdurkarimova T. F., Nadezhdina T. N., Pinaeva T. A. State Geological Map of the Russian Federation scale 1:200 000. M-50-IV (Shelopugino). St. Petersburg: Publishing house of St. Petersburg map factory VSEGEI, 2002. (In Rus.)
11. Spiridonov A. M., Zorina L. D., Kitaev N. A. Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia. Novosibirsk: GEO, 2006. (In Rus.)
12. Fleischer M. Glossary of Mineral Species. Moscow: MIR Publishing house, 1990. (In Rus.)
13. Shiroky O. I. Typomorphic features of quartz and their use in the search, evaluation and exploration of vein deposits of gold and tin. Abstract of Candidate of Geol.-Mineral. Sciences. Irkutsk, 1986. (In Rus.)
14. Yurgenson G. A. Typomorphism and ore formations. Novosibirsk: Nauka, 2003. (In Rus.)
15. Yurgenson G. A. Features of the chemical composition of pyrite in the superore zone of the Taseevskoye gold-silver deposit (Russia, Transbaikalia). Transbaikal State University Journal, vol. 27, no. 5, pp. 44–52, 2021. DOI: 10.21209/2227-9245-2021-27-5-44-52. (In Rus.)
16. Yurgenson G. A., Tumurov G. T. On the perfection of the crystalline structure of vein quartz. Proceedings of universities. The series "Geology and exploration", no. 6, pp. 50–59, 1980. (In Rus.)
17. Malcolm E. Back. Fleischers glossary of mineral species. Tuscon: The Mineralogical Record Inc., 2014. (In Eng.)
18. The New IMA List of Minerals – A Work in Progress. Web. 12.08.2023. <http://cnmnc.units.it>. (In Eng.)

Информация об авторе

Юргенсон Георгий Александрович, д-р геол.-минерал. наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, г. Чита, Россия; yurgga@mail.ru. Область научных интересов: минералогия, геохимия, геология рудных месторождений, рудогенез, геммология, технологическая минералогия, биогеохимия, археология.

Information about the author

Yurgenson Georgy A., Doctor of Geological-Mineralogical Sciences, Professor, Chief Researcher, Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Chita, Russia; yurgga@mail.ru. Area of scientific interests: mineralogy, geochemistry, geology of ore deposits, ore genesis, gemology, technological mineralogy, biogeochemistry and archeology.

Для цитирования

Юргенсон Г. А. О геохимической зональности Верхне-Алиинского месторождения золота в Забайкалье (Россия) // Вестник Забайкальского государственного университета. 2024. Т. 30, № 1. С. 50–61. DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-1-50-61.

For citation

Yurgenson G. A. On the Geochemical Zoning of the Verkhnealiinsky Gold Deposit in Transbaikalia (Russia) // Transbaikal State University Journal. 2024. Vol. 30, no. 1. P. 50–61. DOI: 10.2109/2227-9245-2024-30-1-50-61.