

УДК 553.3/4

DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-5-911-928

Степень совершенства кристаллического строения и сопряженных с ним свойств кварца как показатель вертикальной зональности жильных зон (на примере Верхнеалиинского золоторудного месторождения, Забайкалье, Россия)

Г. А. Юргенсон

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН, 672014, г. Чита, ул. Недорезова, 16а,
e-mail: yurgga@mail.ru

Поступила в редакцию 07.08.2023 г., принята к печати 26.01.2024 г.

Объект изучения. Разрез рудной зоны V Верхнеалиинского месторождения золота в Забайкалье. **Материалы и методы.** Образцы вмещающих горных пород и руд из керна разведочных скважин, пересекающих рудную зону на интервалах глубин 27–34, 57–104, 153–168, 285–293 м, изучены комплексом методов, включающих химический анализ, определение степени совершенства кристаллического строения, температуры фазовых $\alpha \rightarrow \beta$ переходов и удельного электрического сопротивления жильного кварца. **Результаты и выводы.** Установлено возрастание степени совершенства кристаллического строения жильного кварца в сечениях в направлении от зоны окварцевания на контактах к осевым частям жилы от 59 до 73 (среднее 63) в верхнем сечении, от 54 до 79 (среднее 67.2) в нижне-среднем сечении и от 86 до 93 (среднее 89.2) в сечении ниже выклинивания жилы. На всем интервале глубин от 27 до 168 м средняя величина степени совершенства кристаллического строения возрастает от 63 до 89.2. Аналогично, но менее четко изменяются температуры фазового $\alpha \rightarrow \beta$ перехода в кварце, и выявлена тенденция к его связи с величиной совершенства кристаллического строения. Удельное электрическое сопротивление жильного кварца возрастает при переходе от зоны окварцевания к кварцевой жиле в связи с уменьшением в нем количества включений и примесей гидрослюд и хлорита. Подтверждена возможность использования величины СКС в комплексе с данными по содержанию золота, серебра и висмута для оценки уровня эрозийного среза вновь открываемых проявлений золота как в отдельных подсечениях буровыми скважинами, так и в виде свалов или коренных выходов кварцевых жил.

Ключевые слова: рудная зона, жильный кварц, совершенство кристаллического строения, фазовые переходы, удельное электрическое сопротивление, золото, Верхнеалиинское месторождение, Забайкалье, Россия

Источник финансирования

Работа выполнена в рамках госзадания по теме № FUFР-2021-0005

Crystal structural perfection and the associated properties of quartz as an indicator of vein vertical zoning: Example of the Verkhnealiinskoye gold deposit in Transbaikalia, Russia

Georgi A. Yurgenson

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology, SB RAS, 16a Nedorezova st., Chita 672014, Russia,
e-mail: yurgga@mail.ru

Received 07.08.2023, accepted 26.01.2024

Research subject. A section of the V ore zone in the Verkhnealiinskoye gold deposit in Transbaikalia. **Materials and methods.** Samples of host rocks and ores from the core of exploratory wells, which cut the ore zone at depth intervals of 27–34; 57–104; 153–168; 285–293 m, were studied by the methods of chemical analysis, as well as determination of crystal structural perfection, phase $\alpha \rightarrow \beta$ transition temperatures, and electrical resistivity of vein quartz. **Results and conclusions.** An increase in the degree of crystal structural perfection (CSP) of vein quartz in cross sections in the direction

Для цитирования: Юргенсон Г.А. (2024) Степень совершенства кристаллического строения и сопряженных с ним свойств кварца как показатель вертикальной зональности жильных зон (на примере Верхнеалиинского золоторудного месторождения, Забайкалье, Россия). *Литосфера*, 24(5), 911–928. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-911-928>

For citation: Yurgenson G.A. (2024) Crystal structural perfection and the associated properties of quartz as an indicator of vein vertical zoning: Example of the Verkhnealiinskoye gold deposit in Transbaikalia, Russia. *Lithosphere (Russia)*, 24(5), 911–928. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-5-911-928>

from the quartzification zone at the contacts to the axial parts of the vein from 59 to 73 (average 63) in the upper section, from 54 to 79 (average 67.2) in the lower-middle section, and from 86 to 93 (average 89.2) in the section below the wedging of the conductor was established. Over the entire depth range from 27 to 168 m, the average CSP value degree increases from 63 to 89.2. Similarly, although less clearly, phase ($\alpha \rightarrow \beta$) transition temperatures in quartz undergo changes; their connection with the CSP value was revealed. The electrical resistivity of vein quartz increases during the transition from the quartz zone to the quartz vein due to a decrease in the number of inclusions and impurities of hydromica and chlorite. The possibility of using the CSP value in combination with data on the content of gold, silver, and bismuth to assess the level of an erosion section of newly discovered gold manifestations is confirmed, both in individual undercuts by boreholes and in the form of dumps or bedrock outcrops of quartz veins.

Keywords: ore zone, vein quartz, crystalline structure perfection, phase transitions, electrical resistivity, gold, Verkhnealiinskoye deposit, Transbaikalia, Russia

Funding information

The work was carried out within the framework of the state assignment on topic No. FUF-2021-0005

Acknowledgements

The author is grateful to N.S. Baluev and E.A. Vasilenko for their participation in the design of Fig. 1, 2, and 4.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем в изучении рудных месторождений было и остается познание их вертикальной зональности, так как она является основой для оценки уровня их эрозионного среза и, соответственно, прогноза оруденения на глубину. Одна из главных трудностей этого познания часто состоит в отсутствии фактического материала об изменчивости минерального состава и важнейших свойств минералов с глубиной. Целесообразность изучения изменения с глубиной минерального состава рудных тел и месторождений, а также слагающих их минералов в связи с необходимостью разработки критериев эрозионного среза рассмотрено во множестве публикаций (Гинзбург и др., 1981; Горячев, 1992; Константинов и др., 2002; Лазько и др., 1981; Нарсеев, 1973; Спиридонов и др., 2006; и др.). Поскольку одним из важнейших минералов многих рудных, особенно жильных, месторождений является кварц, изучению изменчивости его состава и свойств в пространстве рудных тел на протяжении всей второй половины прошлого столетия и в настоящее время уделяется пристальное внимание (Бойко, 1983; Волярович и др., 1980; Горячев, 1992; Широкий, 1986; Юргенсон и др., 1979; Gamyanin, Goryachev, 2008; Гвоздев и др., 2020; Гамянин и др., 2016; Юргенсон, 2014; и др.). Одно из фундаментальных свойств жильного кварца – совершенство кристаллического строения (СКС), впервые выявленное и изученное с использованием соответствующей методики на примере месторождений различных рудных формаций (Юргенсон, Тумуров, 1977, 1980; Юргенсон, 2003).

В результате установлена обратная связь степени СКС и объема элементарной ячейки (рис. 1). Тогда же обнаружено возрастание степени СКС жильного кварца в конкретных жилах с глубиной (Юргенсон и др., 1979).

Установлено, что причина вариации степени СКС заключается в разупорядоченности структуры кварца на уровне элементарных ячеек и их групп, обусловленной изменчивостью скорости кристаллизации (Юргенсон, 2003). Последняя определяется градиентами уменьшения температуры, вызванными потерей тепла как в зависимости от глубины эволюционирующей минералообразующей системы от дневной поверхности, так и удаленности зоны кристаллизации от относительно холодного контакта с вмещающими горными породами в жиле (Юргенсон, 2003, 2014). В условиях высоких градиентов изменения параметров среды минералообразования и, соответственно, скоростей кристаллизации индивидов минерала, в данном случае кварца, возникает дефектность кристаллической структуры. Она проявляется в отклонениях реальных плоских сеток от плоскости, изменчивости межплоскостных расстояний, которые определяют дисперсию углов дифракции рентгеновских лучей и, следовательно, уширение линий на порошкограммах (дебаеграммах) или образование пиков различной ширины на дифрактограммах (Юргенсон, Тумуров, 1980). При этом наиболее чувствительным к изменчивости условий кристаллизации, как показал опыт, является отражение от плоской сетки структуры кварца с индексами (2354). В последние годы величины степени СКС используются для определения формационной принад-

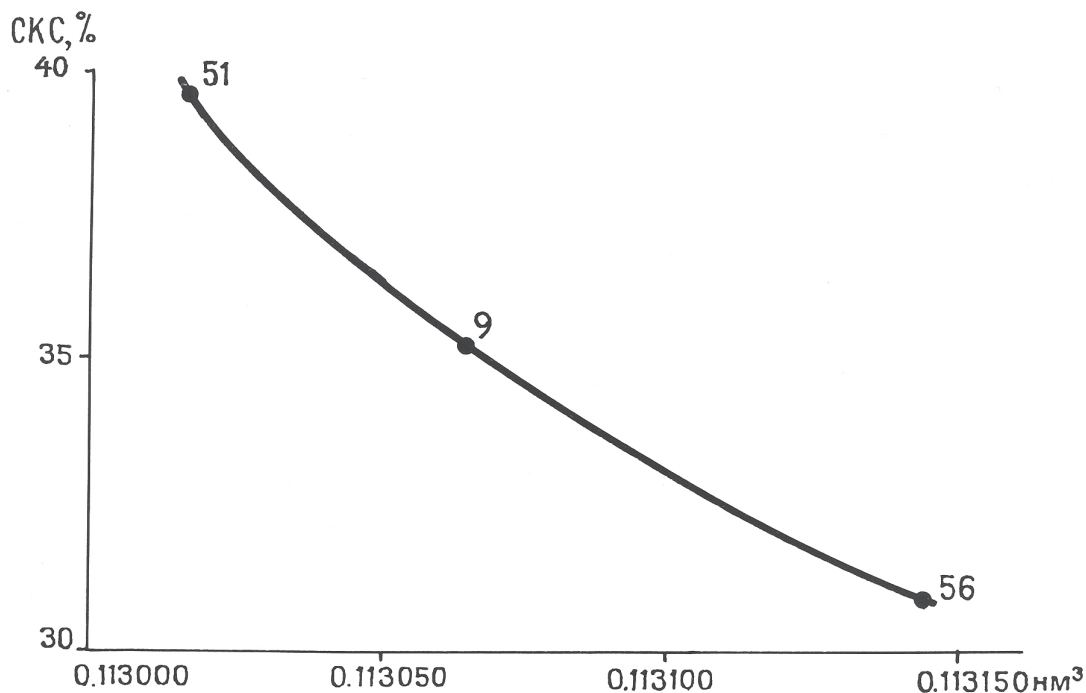


Рис. 1. Зависимость величины СКС и объема элементарной ячейки жильного кварца. Тасеевское золотосеребряное месторождение в Забайкалье.

Цифры у точек на линии означают число образцов и измерений величины СКС и параметров элементарной ячейки.

Fig. 1. Dependence of the SCR value on the unit cell volume of vein quartz. Taseevskoye gold-silver deposit in Transbaikalia.

The numbers at the points on the line indicate the number of samples and measurements of unit cell parameters.

лежности вновь открываемых месторождений золота (Gamyanin, Goryachev, 2008; Юргенсон, 2014; Гамянин и др., 2016), изучения условий образования агрегатов кварца, ассоциирующего с шунгитом (Садовничий и др., 2016). А.В. Песков с соавторами (2020) изучили СКС кварца осадочных халцедона, яшм и кремней, а также кварца кварцевых песчаников и показали возможность использования его для расчленения пластов кварцевых песчаников. Однако полученные ими результаты с использованием отражений от других плоских сеток, обозначенных у них как "... линии с hkl 100, 200, 300, 400, 101, 202" (Песков и др., 2020, с. 100), дают существенные различия при разных методах обработки полученных данных. Как известно, изучаемый кварц является тригональным. Поэтому индексы граней и, соответственно, плоских сеток должны обозначаться как $hk\bar{l}$, а не hkl .

Прямых зависимостей величины СКС и золотосодержания жильного кварца в результате сравнительного анализа данных по большому числу месторождений золота не установлено (Юргенсон, 2003, 2014).

Другими свойствами жильного кварца, численные значения которых изменяются в зависимости

от условий образования, являются температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода и электрические свойства, в частности проводимость, удельное электрическое сопротивление и диэлектрические потери (Исследования ..., 1973; Юргенсон, 1984, 2003).

Вариации температур фазовых переходов структуры жильного кварца, согласно сводке Е.В. Цинзерлинг (1961), варьируются в пределах 536–588°C. Они зависят от структурных примесей Al, Ti и Ge при гетеровалентном изоморфизме, определяющих долю свободных связей в нем, и затрат энергии на разворот кремнекислородных тетраэдров в результате нагревания. При этом угол Si–O–Si изменяется, и тригональная структура переходит в гексагональную.

Установлено, что низкие температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода типичны для кварца, кристаллизовавшегося в условиях повышенной скорости образования его тонкозернистых агрегатов (Булдаков, Гаврюченков, 1972). Относительно высокая скорость его кристаллизации обусловлена резким пересыщением минералообразующей системы кремнекислотой вследствие выноса воды в начале внедрения флюида во вмещающие горные породы, когда система была открытой (Булдаков, Гаврючен-

ков, 1972; Юргенсон, 2003). В результате исследования крупных кристаллов кварца Караль-Веемского золоторудного (Западная Чукотка), Куналейского и Шумиловского вольфрамово-рудных (Центральное Забайклье) месторождений нами установлено, что теплота и температура $\alpha \rightarrow \beta$ перехода уменьшаются от ранних и внутренних их частей к поздним и пригранным, где накапливаются структурные примеси (Исследования ..., 1973; Юргенсон, 2003). Эти изменения увязываются с дефицитом некомпенсированных зарядов при гетеро-валентном изоморфизме. Примесь Al и Na + Li в качестве компенсаторов зарядов понижают температуру $\alpha \rightarrow \beta$ перехода, а Ge и Na + Li – повышают (Цинзерлинг, 1961). Но в общем случае необычно низкие температуры этого фазового перехода свойственны кварцу, образующемуся с большой скоростью. Тем не менее в результате изучения температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода кварца в сечении жилы №1 Тасеевского месторождения в ее приконтактной части, сложенной халцедоновидным и тонкозернистым жильным кварцем, установлено уменьшение температур от 570 до 540°C при изменении температуры гомогенизации ГЖВ в этом же направлении от 315 до 150°C. Причина этого кроется в том, что самые ранние халцедоновидные микрозернистые, до тонкозернистых, генерации кварца содержат примеси Al, Na, K, Li, OH⁻ в виде неструктурных примесей диккита, гидрослюда и адуляра, не увеличивающих его дефектность на уровне элементарных ячеек и, следовательно, не влияющих на температуры фазовых переходов. В более поздних, относительно низкотемпературных генерациях кварца в этом сечении эти компоненты, как свидетельствовало возрастание интенсивности рентгенстимулированной термолюминесценции, входят в кварц изоморфно, обуславливая его дефектность и снижение температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода. В целом в сечениях жил изменчивость этого свойства кварца симметрично зональна относительно контактов с вмещающими горными породами (Юргенсон, 2003, 2014). Эта особенность причин вариаций температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода определяет и тенденции к их вертикальной симметрично-асимметричной зональности (Юргенсон, 2014).

Величина удельного электрического сопротивления жильного кварца, измеряемая при постоянной комнатной температуре, как показали исследования сотен образцов, варьируется в пределах $9.85 \cdot 10^{10}$ Ом · см (халцедон) – $4.3 \cdot 10^{15}$ (кристаллы горного хрусталя, месторождение Перекатное). Удельное сопротивление кристаллов кварца, выращенных во ВНИ-ИСИМСе, находилось в пределах $7.5 \cdot 10^{15}$ Ом · см (начало роста кристалла) – $>3.0 \cdot 10^{16}$ Ом · см (головка кристалла). Величина удельного электрического сопротивления кристаллов выше, чем жильного кварца, и уменьшается с возрастанием количества флюидных включений и уменьшением величины

зерен и, соответственно, количества примесей на их границах, выполняющих роль проводящих каналов (Исследования..., 1973). Доказана прямая зависимость величины электропроводности кварца от содержания в нем воды (Юргенсон, 2003). Отсюда следует, что удельное электрическое сопротивление уменьшается с возрастанием примесной воды в жильном кварце, что обусловлено как количеством флюидных включений, так и примесей слоистых силикатов, а также ОНх-групп с различной энергией связи, влияющих на электропроводность и, следовательно, удельное электрическое сопротивление (Исследования..., 1973).

Для большого числа золотоносных кварцевых жил изученных месторождений (1-я рудная зона Балейского рудного поля, жила Эповская Дарасунского, жила 52 Среднеголотайского, жила 160 Токурского, жила Главная Каральвеевского, стволовая жила Мурунтау и др.) установлено генеральное возрастание величины СКС с глубиной и ее локальное увеличение на уровнях их максимальных мощностей и границ рудных столбов (Юргенсон, 2003, 2014). Для разноглубинных частей 1-й рудной зоны Балейского рудного поля выявлена симметричная вертикальная зональность в изменении с глубиной температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода на интервале глубин от дневной поверхности 126–466 м от 570 до 563°C ($570 \rightarrow 558 \rightarrow 556 \rightarrow 551 \rightarrow 560 \rightarrow 563$ °C). Эта закономерность четко соотносится с изменчивостью интенсивности естественной термолюминесценции, обусловленной концентрациями Al-центров с Na и Li в качестве компенсаторов зарядов (Юргенсон, 2014).

Все приведенные данные получены для отдельных частей жил и жильных зон месторождений золота. Но изучить изменчивость их от верхнего до нижнего выклинивания удалось лишь на примере V жильной зоны Верхнеалиинского месторождения. Здесь собственно кварцевая жила прослежена на всем ее подсеченном скважинами интервале от верхнего до нижнего выклинивания.

Ниже приведены результаты измерения величин степени СКС и других свойств жильного кварца золотоносной V жильной зоны Верхнеалиинского месторождения с глубиной и в конкретных ее сечениях. Они показали правомерность полученных ранее выводов о том, что закономерности их изменений могут быть одним из инструментов оценки эрозионного среза и условий образования кварцево-жильных зон.

Особенности геологии месторождения. Верхнеалиинское месторождение находится в Балейском рудном районе Восточного Забайкалья в верхнем течении р. Алия (рис. 2).

Геологическая позиция месторождения, геолого-структурные особенности и условия образования его рассмотрены в работах (Воротынцев и др., 1983; Рутштейн и др., 2002; Спиридонов и др.,



Рис. 2. Местоположение Верхнеалиинского месторождения золота.

Fig. 2. Location of the Verkhnealiinskoye gold deposit.

2006). Месторождение входит в состав Мунгинского рудного узла Балейского рудного района, находящегося в западном замыкании фундамента Шадоронской рифтогенной впадины юрского возраста в пределах золотомолибденовой части Монголо-Охотского пояса.

Верхнеалиинское месторождение золота открыто в 1980 г. Казаковской геологоразведочной экспедицией в процессе проведения поисково-разведочных работ. С 1981 по 1983 г. А.А. Воротынцевым, Н.В. Куприенко и В.Е. Ландой выполнены поисково-оценочные работы, а затем с 1985 по 1986 г. проведена предварительная разведка и подсчита-

ны запасы месторождения. Лицензия на разведку и добычу полезных ископаемых Верхнеалиинского месторождения с 2005 г. принадлежит ЗАО “Золоторудная компания “Омчак”, которая выполнила детальную разведку, и запасы по состоянию на 1 января 2018 г. (по категории $A + B + C_1 + C_2$) 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 монцони-

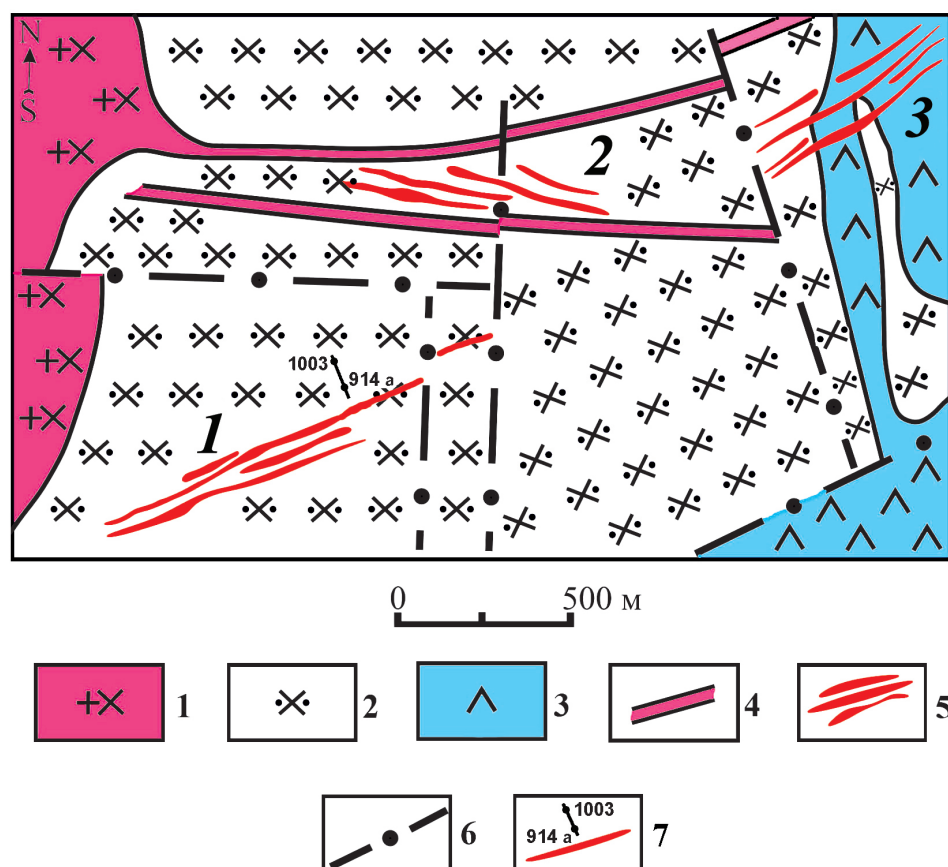


Рис. 3. Схема расположения золоторудных зон Верхнеалиинского месторождения. Составлена по данным поисково-разведочных работ (А.А. Воротынцева и др., 1984 г.) с изменениями.

1 – гранодиориты шахтаминского интрузивного комплекса; 2 – монзониты; 3 – юрские андезидациты; 4 – дайки гранодиорит-порфиров; 5 – рудные зоны: 1 – Западная, включая зону V, 2 – Широтная, 3 – Восточная; 6 – линии тектонических швов; 7 – изученная жила зоны V и профиль скважины.

Fig. 3. Scheme of the location of the gold ore zones of the Verkhnealiinskoye 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; 7 – the studied vein of zone V and the well profile.

тах Алиинского штока акатуйского интрузивного комплекса, прорывающего гранитоиды шахтаминского интрузивного комплекса, в дайках гранодиорит-порфиров и в андезидацитах шадоронской осадочно-вулканогенной серии средней-поздней юры, К-Аг возраст которых 143–192 млн лет. К-Аг возраст шахтаминского интрузивного комплекса находится в пределах 150–170 млн лет, а монзонитов акатуйского – 141–168 млн лет (Рутштейн и др., 2002).

Месторождение относится к среднеглубинной золотосульфидно-кварцевой формации и представляет собою серии сульфидно-кварцевых жильных зон в магматических горных породах. Геолого-структурная схема месторождения представлена на рис. 3. Промышленные рудные тела разведаны в трех золотоносных зонах, различающихся по

условиям локализации, глубине образования и золотоносности.

Западная зона Верхнеалиинского месторождения, включающая I, X, V рудные зоны и другие жильные тела, находится в монзонитах 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 монзонитах. Восточная зона, включающая жильную зону Главную, жилу Антимонитовую и др., находится в биотитовых граносиенитах и монцодиоритах акатуйского интрузивного комплекса, а также в андезидацитах шадоронской осадочно-вулканогенной серии средней-поздней юры.

Жильные зоны представлены крутопадающими жилами сложного строения и жилообразными минерализованными зонами в аргиллизированных, пропилитизированных и березитизированных гранодиоритах, монцонитах, габбро и вулканитах, а также частью в лиственитизированных перидотитах. Протяженность минерализованных зон и жил по простиранию 100–1000 м и по падению – до 400 м и более. Мощность 0.1–7.6 м.

Околорудные изменения вмещающих горных пород выражены в пропилитизации, березитизации, прожилковом окварцевании и сульфидизации, представленной преимущественно пиритом и арсенопиритом. Вблизи контактов во вмещающих породах развиты и кварцево-турмалиновые прожилки, прослеживающиеся в приконтактные части жил. В верхней части Восточной рудной зоны околорудные изменения выражены также и в виде аргиллизации.

Минеральный состав рудоносных зон в принципе обычен для золоторудных месторождений. Сульфиды представлены пиритом, арсенопиритом, в меньшей мере халькопиритом, галенитом и сфалеритом, в жиле Антимонитовой Восточной зоны развит антимонит, содержание которого достигает 10 мас. %. Из относительно редких присутствуют самородное золото, тетраэдрит, висмутин, тетрадимит, сульфоантимониты и сульфовисмутиты, самородный висмут и серебро.

Содержание золота варьирует от 0.8 до 334 г/т (среднее 11.7 г/т), серебра – от 1.3 до 298 г/т (среднее 21.6 г/т), мышьяка – от 0.04 до 22.4%. Содержание, мас. %: свинца – 0.2–4.0, 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.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе разведки Верхнеалиинского месторождения в 1981 г. в Западной зоне канавами и буровыми скважинами от верхнего до нижнего выклинивания вскрыта V рудная зона этого месторождения. Это позволило в 1983 г. отобрать пробы непосредственно самой рудной зоны и вмещающих горных пород из вскрытой канавой фрагмента этой зоны и из керна скважин. После изучения жильного материала и околорудно-измененных горных пород, включая жильный кварц, комплексом современных методов удалось отстроить один из разрезов этой рудной зоны с указанием пространственной изменчивости их состава и свойств. Образцы и пробы для изучения отобраны из керна трех скважин, подсекающих рудную зону на интервалах глубин, м: скв. 914а – 27–34, скв. 1001 – 57–104, скв. 1002а – 153–168, скв. 1003 – 285–293. Профиль этих скважин показан на рис. 3. Комплексное изучение включало изучение свойств жильного квар-

ца и определение в нем и во вмещающих горных породах Au, Ag, Bi, K₂O, Na₂O. Степень СКС кварца определена по методике, описанной в работах (Юргенсон, Тумуров, 1980; Юргенсон, 1984). Сущность метода заключается в измерении высоты и полуширины пиков для отражений рентгеновских лучей от плоской сетки (2354) образца и эталона. Ширина пика, как сказано выше, 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 съемки дифрактограмм отражений (2354) использовалось нефльтрованное медное излучение при скорости счетчика 0.5 град/мин, скорость движения самописца 10 мм/мин. Расстояние между максимумами дифракции (2354) должно быть не менее 20 мм. Надежные результаты получаются простым измерением указанных размеров дифрактограмм. Оценка интегральной величины степени СКС дана по 100-балльной шкале, где степень СКС эталона, в качестве которого использовался кристалл кварца из месторождения Кожим (Полярный Урал), принята за 100. Точность определения 0.1 балла. Воспроизводимость определена как среднеквадратичное отклонение 30-кратного измерения одного образца. При среднем 78.1 среднеквадратичное отклонение составило 1.3. В качестве эталонов могут быть использованы любые чистой воды хорошо ограненные кристаллы кварца длиной более 2 см, лишенные видимых дефектов.

Температура $\alpha \rightarrow \beta$ перехода кварца с точностью 0.1°C определена термогравиметрическим методом с помощью приставки зеркального гальванометра к прибору ТУ-1м, аналитик В.Н. Аношкин (Козаченко, Юргенсон, 1973, Юргенсон и др., 1973). Сущность метода заключается в том, что на дифференциальной кривой нагревания вещества фиксируются температуры максимумов поглощения или выделения тепла, зависящие от физико-химических процессов в нем, в частности, для кварца полиморфных превращений тригонального α -кварца в гексагональный β -кварц при температуре 573°C. В настоящее время определение температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода с точностью $\pm 0.1^\circ\text{C}$ производится на стандартном приборе дифференциального термического анализа Термограф (фирмы NETZSCH, ФРГ). Для измерения температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода использованы монофракции класса –0.14...+0.045 мм. Более крупные зерна использовать нецелесообразно из-за эффекта декрепитации газовой-жидких включений.

Определение удельного электрического сопротивления выполнено на кафедре радиоэлектроники Иркутского государственного университета в полированных пластинках толщиной 2 мм и площадью $3 \times 3 \text{ см}^2$ в вакууме по стандартной мето-

дике с точностью до $\pm 1\%$ (Исследования..., 1973). Содержания золота и серебра определены пробирным анализом, предел определения 0.1 г/т, висмут – химическим анализом, точность определения 0.05%, K_2O и Na_2O – методом фотометрии пламени в химической лаборатории ЗабНИИ, руководитель В.Н. Васильева.

Кроме того, получены новые данные по минеральному составу сульфидно-кварцевой зоны и химическому составу минералов, в том числе кварца электронно-зондовым методом на растровом электронном микроскопе LEO 1430 VP (ГИН СО РАН, г. Улан-Удэ, аналитики Е.В. Ходырева и к.г.-м.н. Е.А. Хромова, руководитель лаборатории к.т.н. С.В. Канакин).

В связи с тем, что степень СКС кварца зависит также и от объема элементарной ячейки, в свою очередь зависящего и от количества изоморфных примесей, в данном случае судить о доле структурных примесей следует не по их содержанию в кварце, а по величине содержания в нем кремния. Это обусловлено чувствительностью использованного прибора 0.01%, так как меньшие их содержания не фиксируются и всегда будут меньше истинного. Поэтому для сравнения использованы формульные коэффициенты кремния в кварце.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изученный разрез V рудной зоны локализован в монцонитах Западной части месторождения. Одна из кварцевых жил при максимальной мощности около 2 м имеет длину по простиранию до 700 м, по падению – около 100 м, затем переходит в зону окварцевания и продолжается до глубины 293 м и, вероятно, глубже, поскольку не прослежена до выклинивания. Профиль скважин, керн которых изучен указанными выше методами, показан на рис. 3.

Околорудные изменения вмещающих горных пород имеют максимальную ширину до 6–7 м в обе стороны от контактов кварцевой жилы, выклиниваясь вверх на расстояние 18 м от ее выклинивания и до глубины около 300 м в виде узкой зоны кварцевого и кварц-турмалинового прожилкования в прожилитах и березитах. В верхней части рудной зоны околорудные изменения выражены в виде аргиллизации и прожилитизации монцонитов, сменяясь с глубиной прожилитами, частью – березитами. Непосредственно в приконтактных частях жилы наблюдается возрастание доли гидрослюд и частично калиевого полевого шпата.

Жила сложена кварцем, пиритом, арсенопиритом, присутствуют низкопробное самородное золото, частью электрум, галенит, сфалерит, халькопирит, висмутин, тетраэдрит и тетрадимит, сульфоантимониты и сульфовисмутиты, самородный висмут и серебро. Впервые в рудах этого месторождения установлены андорит ($Pb_{0.98}Sb_{3.19}AgS_{5.82}$), ма-

докит ($Pb_{17.51}Sb_{17.2}S_{39.29}$), плагионит ($Pb_{4.89}Sb_{8.8}S_{16.31}$), семсейит ($Pb_{9.69}Sb_{8.86}S_{19.45}$). Формулы рассчитаны исходя из данных их микрозондового анализа.

В одном из аншлифов в верхней части жилы впервые в Забайкалье обнаружен редкий сульфид меди – джирит ($Cu^{1+}_6Cu^{2+}_2S_5$) – в виде изогнутой линзы длиной около 15 мкм вокруг зерна сфалерита. Химический состав его близок к идеальному, мас. %: Cu – 75.23–75.43, S – 24.07–24.14. Рассчитанные формулы ($Cu^{1+}_{5.95}Cu^{2+}_2S_{5.05}$ и $Cu^{1+}_{5.96}Cu^{2+}_2S_{5.04}$) показали недостаток меди и избыток серы.

Особенностью пирита является его мышьяковистость. В верхней части жилы содержание мышьяка в нем выше, чем в нижней – 0.62–1.81 и до 0.55 мас. % соответственно. И лишь в верхней части жилы в нем обнаружено до 0.46 мас. % сурьмы, ассоциирующей с мышьяком (1.25 мас. %). В нижней части жилы в пирите появляется кобальт – до 0.45 мас. %. Подобная закономерность в изменении с глубиной содержаний примеси мышьяка, сурьмы и кобальта в пирите выявлена в Первой рудной зоне Тасеевского золотосеребряного месторождения в Забайкалье (Юргенсон, 2021), а также в результате изучения пирита месторождений Мариинской тайги и Кузнецкого Ала-Тау (Коробейников, Пшеничкин, 1985).

Арсенопирит в верхней части V жильной зоны содержит до 0.49 мас. % сурьмы, а в нижней из примесей в нем присутствует только кобальт – до 0.05 мас. %.

Согласно данным А.А. Воротынцева с соавторами (1983), кварцево-жильные тела Западной зоны отличаются незначительным количеством сфалерита и галенита, тогда как для зоны Восточной, с меньшей глубиной образования, установлены четкие связи золота с полиметаллической ассоциацией. Эти выводы подтверждены нами (Г.А. Юргенсон, Т.Н. Юргенсон, 1991). Особенность V зоны заключается в обогащенности ее вольфрамом, что четко проявляется в присутствии в приконтактной части жилы шеелита.

Жильные минералы представлены кварцем, гидромусковитом, турмалином, каолинитом, хлоритом. Из акцессорных минералов выявлены рутил, апатит и монацит-Се. В минеральных продуктивных комплексах жилы среди структурно-текстурных разновидностей кварца развиты массивные, полосчато-массивные, брекчиевидные, реже – шестоватые агрегаты, но преобладают тонко- и мелкозернистые, содержащие слоистые силикаты (каолинит, хлорит, гидрослюда). Особенностью кварца является присутствие в нем алюминия в пределах сотых долей мас. %, а в наиболее поздних генерациях наряду с ним установлено железо – до 0.021 мас. %. Из 34 измеренных индивидов кварца лишь пять лишены примесей. Химический состав их находится в пределах $Si_{0.968}Al_{0.043}O_2$ – $Si_{0.997}Al_{0.003}O_2$. Лишь в трех индивидах, представленных амети-

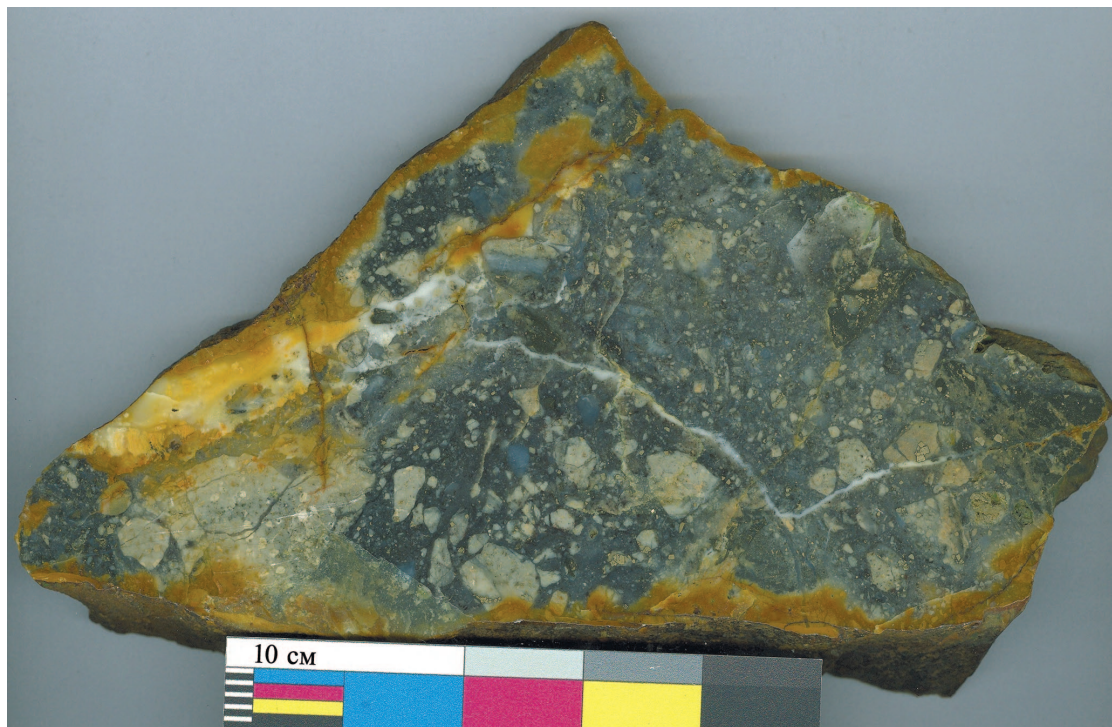


Рис. 4. Фрагмент жильной зоны брекчиевой текстуры.

Fig. 4. Fragment of a vein zone of breccia texture.

стовидным мелкогребенчатым кварцем, кремний замещается наряду с алюминием и трехвалентным железом и состав их варьируется в пределах $\text{Si}_{0.964}\text{Al}_{0.034}\text{Fe}_{0.021}\text{O}_2 - \text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.008}\text{Fe}_{0.007}\text{O}_2$. Кроме того, выявлены также индивиды позднего кварца, содержащего в качестве примесей только железо. Состав их отображается формулами $\text{Si}_{0.997}\text{Fe}_{0.007}\text{O}_2 - \text{Si}_{0.999}\text{Fe}_{0.003}\text{O}_2$.

Отмечена следующая общая последовательность образования минералов: сульфидно-турмалиново-кварцевые агрегаты краевых частей жилы сменяются в направлении к ее оси существенно кварцевыми с сульфидами и сульфосолями. Эта последовательность может неоднократно повторяться в результате внутриминерализационного взламывания, брекчирования и залечивания. Здесь обилён пирит, развивающийся как во вкрапленниках полевого шпата, так и в массе аргиллизита и пропилита.

Пример многократного брекчирования жилы в приконтактовом участке, отобранном из канавы, показан на рис. 4. Жильный материал состоит из обломков пропилитизированного и окварцованного монзонита в кварц-турмалиновом цементе, содержащем мелкую вкрапленность пирита, арсенопирита, висмутита, тетрадимита. Подобные агрегаты рассеяны поздними тонкими прожилками тонкозернистого полосчатого кварца или карбонатно-кварцевого состава.

В результате взламывания кварцево-сульфидно-сульфосольный комплекс, так же как и краевые части жил, брекчируется и цементируется тонкозернистым агрегатом слюдисто-кварцево-турмалинового состава, а затем рассекается мелкошестоватым кварцем.

На рис. 5а показан фрагмент брекчии, сцементированной среднезернистым кварцем (1), содержащим фрагменты кристаллов пирита (7, 8, 11), галенита (6) и раннего халцедоновидного, до тонкозернистого, кварца (9, 10), содержащего микронные включения пирита. Обломок ранней брекчии величиной до 0.5 мм состоит из тонких сростков пирита (2), сфалерита (3) и буланжерита (5). На рис. 5б показан фрагмент брекчии, где отчетливо видно облекание и сечение пирита (1, 2, 5, 7, 9, 12) каемками галенита (3, 8) и буланжерита (6). Буланжерит (15) в виде каемок находится также вокруг обломков сфалерита (13, 14) в кварце.

Самый ранний кварц (9) (см. рис. 5а) представлен здесь тонкозернистой разновидью, содержащей примеси алюминия и железа ($\text{Si}_{0.964}\text{Al}_{0.034}\text{Fe}_{0.021}\text{O}_2$), другие его индивиды (10) также содержат их, но в меньших количествах ($\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.006}\text{Fe}_{0.004}\text{O}_2$). Цементирующий среднезернистый кварц лишен железа и имеет состав ($\text{Si}_{0.994}\text{Al}_{0.008}\text{O}_2$).

Структурно-текстурные особенности жильного кварца изменяются с глубиной. Если в верхних частях жил развиты в основном мелкозернистые,

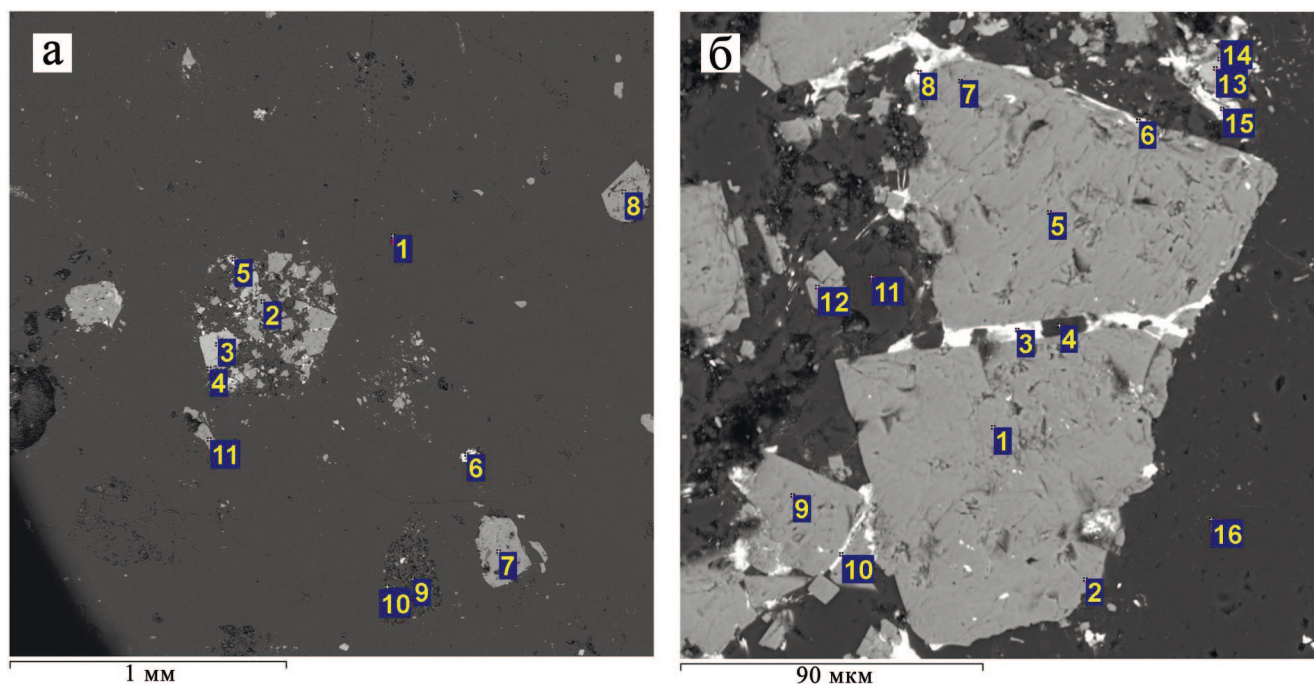


Рис. 5. Сульфидно-кварцевая брекчия, сцементированная среднезернистым кварцем.

а – обломки ранней брекчии и сульфидов, б – строение и минеральный состав ранней брекчии. Пояснения см. в тексте

Fig. 5. Sulfide-quartz breccia cemented by medium-grained quartz.

a – fragments of early breccia and sulfides, б – structure and mineral composition of early breccia. Explanations see in the text.

иногда халцедоновидные его агрегаты, то на глубинах, превышающих 100 м и более, появляются среднезернистые, шестоватые и гребенчатые их разновидности. Эта их особенность отражается, как показано ниже, на вариациях чисел, характеризующих совершенство их кристаллического строения (табл. 1).

На рис. 6 показан фрагмент строения и минерального состава осевой части жилы в сечении на глубине 82.3 м (обр. 350). Здесь в среднезернистом кварцевом (3, 9–11) агрегате наблюдаются мелкие включения пирита (1), галенита (4, 8), самородного золота (5–7) и монацита (2).

На рис. 7 дан фрагмент гребенчатого кварца из подсечения на глубине 154 м (обр. 357). Здесь в промежутках индивидов кварца (5, 7, 8, 11, 13) развиты галенит (1, 2, 9, 12), сфалерит (6) и арсенопирит (4). Реликты кварца (10) находятся также и в галените.

Жильная зона вскрыта серией скважин на трех уровнях по ее падению. Верхний уровень соответствует зоне верхнего выклинивания ее жильной части, средний – нижней части среднего уровня, где жила сохраняет относительно большую мощность, а нижний (глубина 153–168 м) – вскрывает зону ниже выклинивания жилы (рис. 8). На рисунке представлена проекция поперечного разреза зоны V на вертикальную плоскость.

Результаты изменения величины СКС и других параметров с глубиной и в сечениях самих жил показаны в табл. 1.

Скважиной 914а подсечена самая верхняя часть зоны окварцевания аргиллизированных монцитонитов, включающая верхнюю часть жилы, сложенной среднезернистым кварцем, содержащим обломки сульфидизированных вмещающих пород (см. рис. 5). В зоне окварцевания и ее приконтактной части кварц представлен тонкозернистой разновидностью. При этом от контактов к срединной части жилы увеличиваются размеры зерен, СКС возрастает от 71 до 79, составляя в среднем 63, увеличивается доля кремния в кварце и уменьшается содержание в нем структурных примесей:



В этом же направлении возрастет температура $\alpha \rightarrow \beta$ перехода и удельного электрического сопротивления, содержание золота и серебра, а также $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, уменьшающееся в осевой части жилы, где в ней очень мало гидрослюды. В направлении от срединной части жилы к зоне окварцевания со стороны лежачего бока вновь возрастает степень СКС, несколько уменьшается, варьируясь, доля кремния в кварце и температура $\alpha \rightarrow \beta$ перехода. Удельное электрическое сопротивление так-

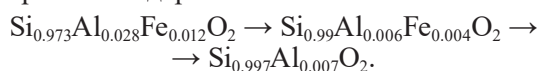
Таблица 1. Результаты определения степени совершенства кристаллического строения, температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода, удельного сопротивления, Au и Ag

Table 1. The results of determination of the degree of perfection of the crystal structure, temperatures of the $\alpha \rightarrow \beta$ transition, specific resistance, Au and Ag

Образец	Положение в разрезе, глубина, м	Инт-л сечения жильной зоны скважинами, м	Величина СКС	Формула	$T_{\alpha \rightarrow \beta}, ^\circ\text{C}$	Удельное сопротивление, $\cdot 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$	Au, г/т	Ag, г/т	$\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$
329	Зона окварцевания, 27	27–34	59	$\text{Si}_{0.964}\text{Al}_{0.034}\text{Fe}_{0.021}\text{O}_2$	570.1	5.7	6.1	30.2	1.8
330	Приконтактовая часть жилы, 29		68	$(\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.006}\text{Fe}_{0.004}\text{O}_2)$	570.2	5.8	12.1	63.2	1.9
332	Осевая часть жилы, 30		73	$(\text{Si}_{0.994}\text{Al}_{0.008}\text{O}_2)$	570.3	6.1	27	156	1.2
335	Приконтактовая часть жилы, 31.5		71	$\text{Si}_{0.988}\text{Al}_{0.012}\text{O}_2$	570.2	5.9	21	112	1.3
337	Зона окварцевания, 33.5		60	$\text{Si}_{0.986}\text{Al}_{0.019}\text{O}_2$	570.1	5.9	4.2	31	1.5
339	Краевая часть зоны окварцевания, 34		47	$\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.008}\text{Fe}_{0.007}\text{O}_2$	570.1	6.0	2.1	8.3	1.6
340	Зона окварцевания, 57.5	57–104	54	$\text{Si}_{0.988}\text{Al}_{0.014}\text{Fe}_{0.003}\text{O}_2$	569.8	6.1	1.9	6.1	1.7
343	Зона пропилитизации и окварцевания, 58		56	$\text{Si}_{0.973}\text{Al}_{0.028}\text{Fe}_{0.012}\text{O}_2$	569.7	6.0	2.0	3.7	1.8
346	Приконтактовая часть зоны пропилитизации и окварцевания, 81		67	$\text{Si}_{0.983}\text{Al}_{0.023}\text{O}_2$	569.8	6.1	4	9	4.8
348	Приконтактовая часть жилы, 81.5		76	$\text{Si}_{0.985}\text{Al}_{0.02}\text{O}_2$	570	6.2	51.2	11.1	18
350	Осевая часть жилы 82.3		79	$\text{Si}_{0.997}\text{Al}_{0.007}\text{O}_2$	571.6	6.4	80.3	78.5	9.3
352	Приконтактовая часть жилы 87		74	$\text{Si}_{0.98}\text{Al}_{0.027}\text{O}_2$	570.1	12.1	180	179	16
353	Зона окварцевания на контакте с жилой, 87.7		66.3	$\text{Si}_{0.976}\text{Al}_{0.032}\text{O}_2$	569.8	5.5	57	120	8.7
355	Зона окварцевания на контакте с вмещающими монцититами, 104		65.3	$\text{Si}_{0.968}\text{Al}_{0.043}\text{O}_2$	568.5	5.4	1.2	1.3	15.1
357	Гребенчато-шестоватый 154	153–168	86	$\text{Si}_{0.989}\text{Al}_{0.015}\text{O}_2$	571.4	2.5	12	23	4.8
359	Шестовато-гребенчатый кварц в зоне окварцевания, 156		88	$\text{Si}_{0.989}\text{Al}_{0.015}\text{O}_2$	571.7	2.4	15	18	3.6
361	Гребенчатый кварц, 158		90	$\text{Si}_{0.989}\text{Al}_{0.014}\text{O}_2$	571.7	2.3	11	16	4.7
363	Гребенчатый кварц из зоны окварцевания, 160.2		93	$\text{Si}_{0.99}\text{Al}_{0.013}\text{O}_2$	571.8	2.2	1.2	3.5	3.3

же несколько уменьшается, возрастая в краевой части зоны окварцевания, соответствуя незначительному возрастанию доли кремния и уменьшению в нем содержанию примесей. В этом же направлении уменьшается содержание золота и серебра и возрастает доля калия в околорудной зоне.

В подсечении скважиной 1001 на интервале 57–104 м наблюдается та же тенденция. Возрастает доля среднезернистого кварца, в нем увеличивается содержание золота, но максимум его приходится на приконтактовую часть жилы, где больше сульфидов, СКС возрастает от контакта к средней части с 54 до 79 при среднем 67.2. Доля кремния в кварце возрастает от зоны пропилитизации при уменьшении примесей алюминия и железа, кварц срединной части жилы в качестве изоморфной примеси содержит лишь алюминий:



Как и в верхнем сечении, здесь наблюдается незначительное возрастание температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода. Удельное электрическое сопротивление возрастает лишь незначительно, оставаясь в пределах $(6–6.4) \cdot 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$: вблизи от приконтактовой части жильной зоны, где кварц лишен каких-либо примесей, кроме структурных, оно резко возрастает до $12 \cdot 10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. В 4 см от места, где была вырезана эта пластина для измерения удельного сопротивления, содержание золота оказалось максимальным.

Далее в направлении от лежащего бока жилы к краевой части зоны околорудных изменений происходит уменьшение всех параметров, за исключением $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$. Содержание калия растет висячем боку жильной зоны в направлении к срединной части жилы, в самой жиле оно уменьшается и далее в лежащем боку изменяется незакономерно, в целом увеличиваясь.

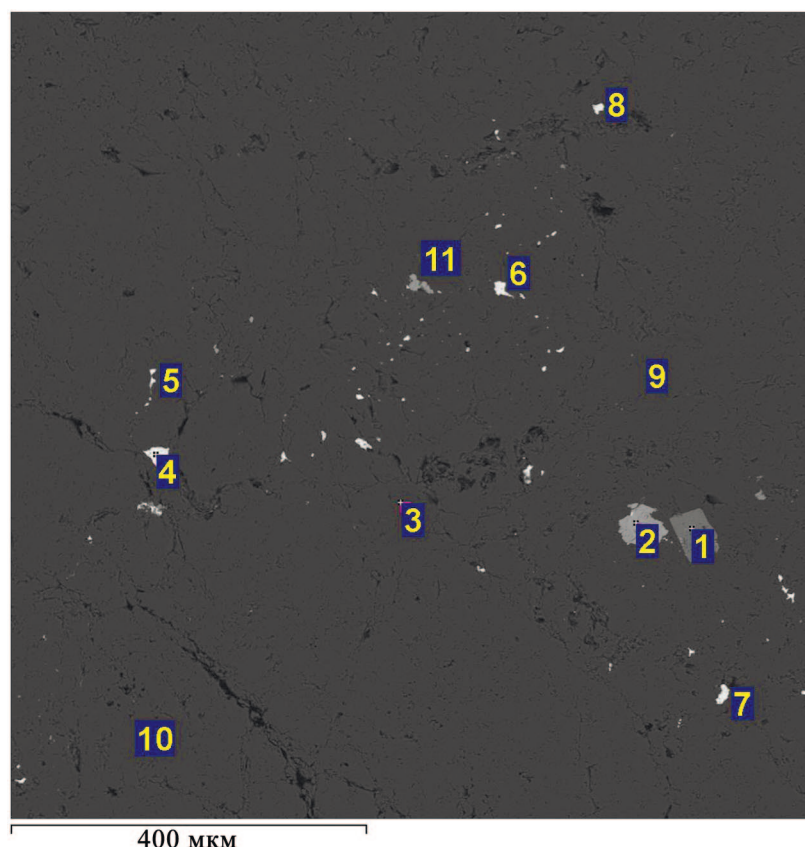


Рис. 6. Фрагмент срединной части жилы, содержащей мелкие включения сульфидов и золота. Электронно-микроскопический снимок. Обр. 350.

Пояснения см. в тексте.

Fig. 6. Fragment of the middle part of the vein containing small inclusions of sulfides and gold. Electron microscopic image. Sample 350.

Explanations see in the text.

В подсечении скважиной 1002а вскрыта лишь зона интенсивного окварцевания, где кварц представлен преимущественно мелкогребенчатыми и мелкошестовато-гребенчатыми агрегатами. Он отличается наиболее высокими значениями СКС, возрастающими с глубиной от 86 до 93, среднее составляет 89.25. Температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода здесь вновь увеличиваются, возрастая с глубиной от 571.4 до 571.8°C. При этом доля Si примерно постоянна, а изоморфного Al – уменьшается (см. табл. 1). Удельное электрическое сопротивление жильного кварца в этом сечении минимально за счет того, что обеспечивающие проводимость сульфиды, прежде всего галенит, как это видно на рис. 7, находятся между индивидами кварца и резко снижают его.

Мера замещенности кремния структурными алюминием и железом, влияющими на объем элементарной ячейки кварца, с которым степень СКС находится в обратной связи, выраженная через среднее значение его формульных коэффициентов,

также уменьшается с глубиной от 0.0015 в верхнем сечении до 0.0011 в нижнем.

Скважина 1003 подсекла лишь зону слабоокварцованных березитов мощностью до 1.8 м, содержащую до 2–5% сульфидов, в основном пирита, лишённого мышьяка, но содержащего кобальт и никель. Присутствуют тетрадимит и галенит. Содержание золота в них лишь в отдельных пробах достигает 16 г/т, серебра – до 20 г/т при содержании висмута до 182 г/т. Свойства кварца не измерялись.

В целом все полученные аналитические данные представлены на рис. 8.

ОБСУЖДЕНИЕ

Из данных табл. 1 и рис. 8 видно, что величины степени СКС симметричны относительно срединной части жилы: минимальны в зонах окварцевания в боках жилы и максимальны в ней. При этом наблюдается ее зависимость как от возраста-

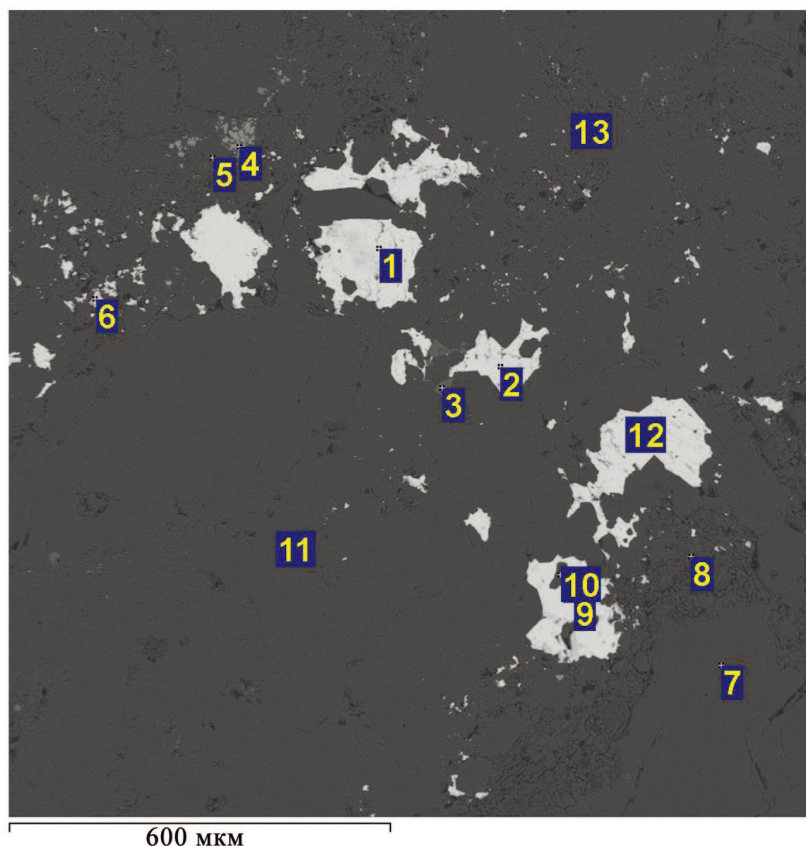


Рис. 7. Фрагмент мелкогребенчатого кварца с сульфидами в промежутках между индивидами. Электронно-микроскопический снимок. Обр. 357.

Пояснения см. в тексте.

Fig. 7. A fragment of fine-ridged quartz in the spaces between the individuals of which there are sulfides. Electron microscopic image. Sample 357.

Explanations see in the text.

ния величины индивидов, обусловленной уменьшением скорости кристаллизации, так и от уменьшения доли структурной примеси алюминия и железа. Это согласуется с выявленными ранее (Юргенсон, 2003, 2014) зависимостями степени СКС от структурно-текстурных факторов, а также от объема элементарной ячейки, определяемого количеством структурных примесей. Другая особенность величины СКС заключается в общем возрастании с глубиной ее средних значений от 63 в верхнем сечении до 89.2 в нижнем. Эти изменения, как показано ранее на примере других месторождений (Юргенсон, 2003, 2014), также имеют тенденцию к связи как с возрастанием индивидов кварца и изменениями структурно-текстурных особенностей, обусловленных общим уменьшением скорости кристаллизации, так и уменьшением доли изоморфных примесей.

Такая изменчивость величины СКС с глубиной соответствует общей закономерности воз-

растания ее с глубиной для месторождения в целом (рис. 9), где показано возрастание с глубиной от наименее глубокой Восточной зоны к сильноэродированной части Широтной зоны, вскрытой штольнями. Здесь ее величина изменяется соответственно от 30 для халцедоновидного кварца в Восточной зоне до 80 для средне- и крупнозернистого в Широтной.

Закономерность изменения величины меры СКС, полученная в результате изучения кварцево-жильной зоны V Верхнеалиинского месторождения, подтверждает известные выводы о том, что это свойство жильного кварца закономерно изменяется в отдельных жилах, месторождениях и ряде рудных формаций (Юргенсон, 2003). Это показано на примере нескольких десятков месторождений СССР различных рудных формаций. Но для отдельной жильной зоны от ее верхнего выклинивания до нижнего, переходящего в околорудно-измененные горные породы, удалось сделать впервые.

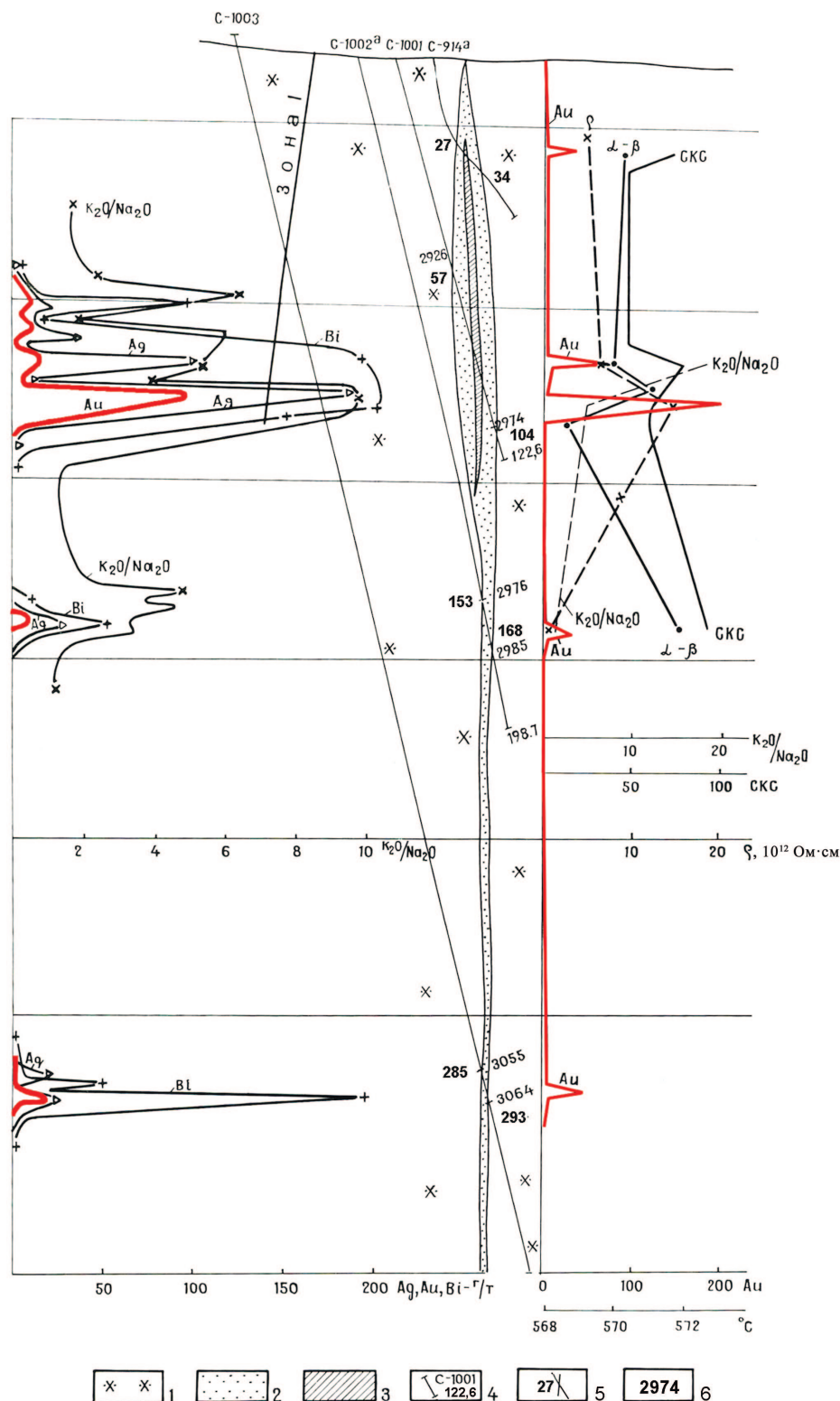


Рис. 8. Изменчивость состава и свойств жильного кварца и вмещающих горных пород V рудной зоны Верхнеалиинского месторождения.

1 – монзониты; 2 – зона околорудных изменений; 3 – сульфидно-кварцевая жила; 4 – скважина и ее номер; 5 – проекция линии пересечения жильной зоны скважиной и отметка (м) ее глубины; 6 – номер пробы.

Fig. 8. Variability of the composition and properties of vein quartz and host rocks of the V ore zone of the Verkhnealiinsky deposit.

1 – monzonites; 2 – zone of near-ore changes; 3 – sulfide-quartz vein; 4 – well and its number; 5 – projection of the line of intersection of the vein zone by the borehole and its depth in m; 6 – sample number.

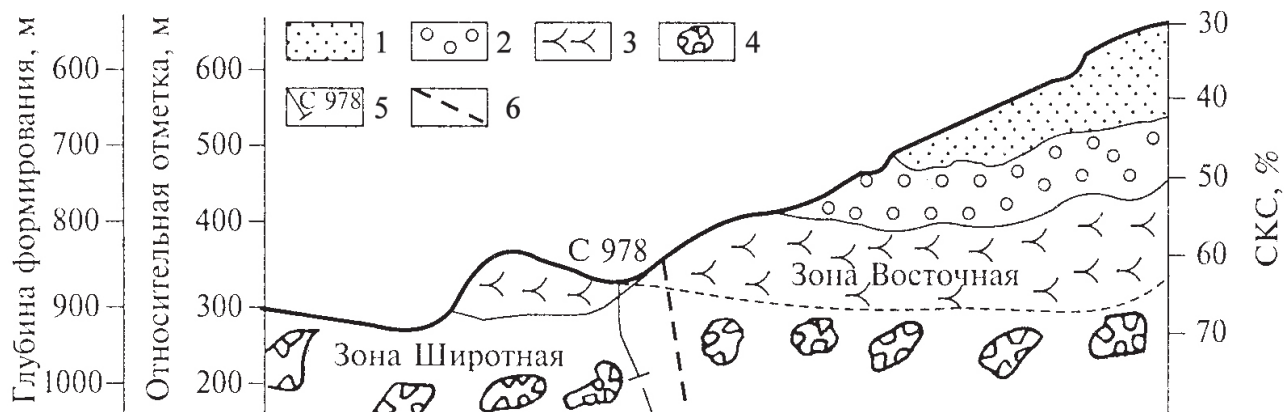


Рис. 9. Изменение степени СКС кварца с глубиной в пределах Верхнеалиинского месторождения.

1 – халцедоновидный кварц; 2 – тонко- и мелкозернистый кварц; 3 – среднезернистый кварц, участками друзоватый; 4 – средне- и крупнозернистый кварц, участками друзоватый; 5 – скважина и ее номер; 6 – предполагаемая тектоническая структура сочленения.

Fig. 9. Change in the degree of SCS of quartz with depth within the Verkhne Aliinskoye deposit.

1 – chalcedony quartz; 2 – fine-grained quartz; 3 – medium-grained quartz, drusy in areas; 4 – medium-coarse-grained quartz, drusy in areas; 5 – the well and its number; 6 – the assumed tectonic structure of the articulation.

Аналогично изменяются и температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода в кварце, увеличивающиеся с возрастанием совершенства кристаллического строения от 570.1°C в верхнем сечении до 571.6°C в среднем и 571.8°C в нижнем. Тем не менее, как видно на рис. 8, в зоне пересечения жилы на интервале 57–104 м существуют вариации значений этих величин, обусловленных неравномерностью распределения кварца различного состава, прежде всего доли изоморфных примесей Al и Fe, а также и структурно-текстурных особенностей, влияющих на изменения этих его свойств. Но главная, генеральная тенденция их взаимосвязей и изменчивости в пространстве самой жилы и зоны окварцевания очевидна.

Величины удельного электрического сопротивления (ρ , 10^{12} Ом · см) в кварцевой жиле и зоне окварцевания варьируются незначительно в верхней и средней частях зоны, достигая максимума ($12 \cdot 10^{12}$ Ом · см) на участке почти сплошного окварцевания со значением СКС, равным 74, содержащем минимальное количество сульфидов при единичных мельчайших вкрапленниках самородного золота, не оказывающих существенного влияния на электропроводность (см. рис. 6). Затем в околорудно-измененных породах резко оно уменьшается. Это связано с тем, что жильный кварц в жиле и близконтактных ее частях, как это следует из изучения кварца в прозрачных шлифах, содержит меньше примесей, а в зоне слабого окварцевания их количество существенно больше и удельное сопротивление уменьшается. Полученная особенность различий этого свойства в жилах и околорудно-измененных горных породах подтверждает целесообразность использо-

вания измерения удельного электрического сопротивления при поисках кварцевых жил с использованием методов электроразведки.

В левой части рис. 8 приведены кривые содержания золота, серебра и висмута в каждом из изученных сечений жильной зоны V, включая зоны околорудных изменений. Из их анализа следует, что, во-первых, содержания переменны и, во-вторых, существует корреляция между содержаниями золота и висмута, а также серебра. Но ореолы повышенных содержаний серебра выходят за пределы непосредственно жилы. При этом калий-натриевое отношение четко отображает как жильную зону в целом, так и повышенные содержания золота в кварцевой жиле. Определенные пределы вариаций величины калий-натриевого отношения, как показано нами ранее для других месторождений, является важным типохимическим критерием золотого оруденения мало- и среднеглубинных формаций (Г.А. Юргенсон, Т.Н. Юргенсон, 1991; Юргенсон, 2003, 2014).

Анализ данных по изменчивости с глубиной золота, серебра и висмута показал, что в пределах кварцевой жилы содержания золота увеличиваются с глубиной, уменьшаясь в зоне нижнего выклинивания с сохранением промышленных концентраций, и сохраняются в зоне окварцевания до глубины 293 м. При этом оно сопровождается содержаниями висмута, возрастающими с глубиной. В то же время относительные содержания серебра уменьшаются, а золота – увеличиваются. Если в верхней части соотношение Ag/Au составляет от 5 до 10.1, в нижне-средней части – 2.1, на ниж-

нем выклинивании жилы – 3.2, то в зоне окварцевания на отметках 285–290 м – только 1.4. С возрастанием содержания висмута возрастает содержание золота. Эта тенденция подчеркивается тем, что с глубиной уменьшается количество сульфосолей и галенита, с которыми связано серебро, и возрастает доля тетрадимита, являющегося носителем не только висмута, но и, что самое важное, теллура, с которым и переносится существенная часть золота.

Направленность изменения температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода в жильном кварце от контактов жилы к ее срединной части различна в месторождениях мало- и среднеглубинных. В жильном кварце мало-глубинных формаций (Балейское рудное поле) в этом направлении они уменьшаются с уменьшением скорости роста индивидов (Юргенсон, 2014). Это обусловлено возрастанием доли структурных примесей, количество которых определяет уменьшение затрат энергии на разрыв связей, обеспечивающих разворот кремнекислородных тетраэдров. В жильном кварце месторождений среднеглубинных формаций температура $\alpha \rightarrow \beta$ перехода в жильном кварце от контактов жилы к ее срединной части возрастает в связи с возрастанием СКС и уменьшением доли структурных примесей, которые захватываются на ранней стадии формирования жилы. Изменения с глубиной величины этого свойства также различны в жильном кварце. В месторождениях малоглубинной формации она уменьшается: в 1-й рудной зоне Тасеевского золотосеребряного месторождения от 570 до 551°C на интервале глубин 126–416 м, сопровождаясь возрастанием интенсивности термолюминесценции, зависящей от количества алюминиевых электронно-дырочных центров, обусловленных ростом числа изоморфных примесей в кварце (Юргенсон, 2014).

Генеральной зависимости величины СКС от температуры и давления не установлено. Но в ходе уменьшения температуры и сопряженного с ним давления в конкретных минералообразующих системах наблюдается возрастание величины СКС. Совершенные кристаллы образуются как при высоких, так и при низких температурах. Величина СКС зависит не от величин температур и давлений, а скорости их изменений, обуславливающей динамику кристаллизации и входение изоморфных примесей.

ВЫВОДЫ

1. Впервые на примере кварцево-жильной зоны V Верхнеалиинского месторождения золота выполнен комплекс исследований, включающий измерение степени совершенства кристаллического строения, температур $\alpha \rightarrow \beta$ перехода и удельного электрического сопротивления от ее верхнего до нижнего выклинивания.

2. Установлено возрастание степени СКС жильного кварца с глубиной и в сечениях от зоны окварцевания к срединным частям жилы, обусловленное уменьшением скорости кристаллизации кварца вследствие уменьшения градиентов скорости снижения температуры в минералообразующей системе от ее контактов к срединной части и с глубиной. Подобная закономерность изменения с глубиной степени СКС выявлена и на примере других месторождений и сульфидных и безрудных кварцевых жил (Юргенсон, 2003).

3. Установлено аналогичное, но менее четкое изменение температуры $\alpha \rightarrow \beta$ перехода в кварце и тенденция ее связи с величиной СКС и долей изоморфным замещением.

4. Подтверждены выявленные на других месторождениях зависимости этих свойств жильного кварца от структурного типоморфизма, обусловленного изоморфным замещением в нем кремния алюминием и железом.

5. Определена тенденция изменчивости величины удельного электрического сопротивления жильного кварца в пределах жилы и в зоне окварцевания, заключающаяся в возрастании при переходе от зоны окварцевания к жиле. Четкой зависимости между степенью СКС и удельным электрическим сопротивлением не установлено.

6. Подтверждена возможность использования величины СКС в комплексе с данными по содержанию золота, серебра и висмута для оценки уровня эрозионного среза вновь открываемых проявлений золота как в отдельных подсечениях буровыми скважинами, так и в виде свалов или коренных выходов кварцевых жил.

Благодарности

Автор признателен Н.С. Балуюеву и Е.А. Василенко за участие в оформлении рисунков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бойко С.М. (1983) Типоморфные свойства и состав кварца и сульфидов в месторождениях олово-вольфрамового пояса Забайкалья. *Типоморфизм минералов и его прикладное значение*. Чита: ОНТИ ЗабНИИ, 7-10.
- Булдаков И.В., Гаврюченков Ф.Г. (1972) О зависимости температуры α - β -превращений природного кварца от размеров элементарной ячейки. *Минералогия и геохимия*. Вып. 4. Л., 55-58.
- Воларович Г.П., Николаева Л.Н., Бархударян Н.Б. (1980) Типоморфные свойства самородного золота и кварца близповерхностных месторождений. *Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов*. М.: Наука, 204-212.
- Воротынцев А.А., Красников В.И., Ланда В.Е. Суматохин В.А., Рогов А.В., Ванин Н.И. (1983) Типоморфные свойства рудных минералов и зональность одного золото-сульфидного месторождения. *Типоморфизм минералов и его прикладное значение*. Чита:

- ОНТИ ЗабНИИ, 42-44.
- Гамянин Г.Н., Горячев Н.А. (1983) Зональность изменения типоморфных свойств минералов одного из золоторудных месторождений Восточной Якутии. *Типоморфные особенности рудных минералов эндогенных образований Якутии*. Якутск, 6-19.
- Гамянин Г.Н. Горячев Н.А., Викентьева О.В. (2016) Кысылга – золотосеребряное месторождение в терригенных толщах Верхояно-Колымских мезозоид. *Тихоокеан. геол.*, **35**(33), 63-74.
- Гвоздев В.И., Гребенникова А.А., Вах А.С., Горячев Н.А., Федосеев Д.Г. (2020) Эволюция процессов минералообразования при формировании золоторедкометалльных руд Средне-Голготайского месторождения (Восточное Забайкалье). *Тихоокеан. геол.*, **39**(1), 70-91.
- Гинзбург А.И., Сидоренко Г.А., Кузьмин В.И. (1981) Минералогические исследования в практике геологоразведочных работ. М.: Недра, 237 с.
- Горячев Н.А. (1992) Жильный кварц золоторудных месторождений Яно-Колымского пояса. Магадан, 136 с.
- Исследования в области физики твердого тела. (1973) Вып. 2. Иркутск: Иркутск. ун-т, 187 с.
- Козаченко А.А., Юргенсон Г.А. (1973) Приставка к приборам Термолюм-1 и ТУ-1м для точного измерения температур. *Геология, разведка и оценка месторождений Забайкалья*. Чита: НТГО ЗабНИИ, 53-55.
- Константинов М.М., Косовец Т.Н., Кряжев С.Г., Наталенко М.В., Стружков С.В., Устинов В.И. (2002) Строение золотоносных рудообразующих систем. М.: ЦНИГРИ, 190 с.
- Коробейников А.Ф., Пшеничкин А.Я. (1985) Геохимические особенности пирита золоторудных месторождений. *Геохимия*, **1**, 93-104.
- Лазько Е.М., Ляхов Ю.В., Пизнюр Ф.В. (1981) Физико-химические основы прогнозирования постмагматического оруденения. М.: Недра, 256 с.
- Нарсеев В.А. (1973) Эндогенная зональность золоторудных месторождений Казахстана. Алма-Ата: ИМС, 237 с.
- Песков А.В., Алекина Е.В., Тарасова Е.Ю. (2020) Типоморфные особенности кварца. *Успехи современного естествознания*, (11), 95-100.
- 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. (2002) Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. М-50-IV (Шелопугино). (Ред. Н.Н. Чабан). СПб.: С.-Петербургск. картфабрика ВСЕГЕИ, 120 с.
- Садовничий Р.В., Михайлина А.А., Рожкова Н.Н., Инина С.И. (2016) Морфологические и структурные особенности кварца шунгитовых пород Максвской залежи. *Тр. Карельского НЦ РАН. Сер. Геол. докембрия*, (2), 73-89.
- Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. (2006) Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск: ГЕО, 291 с.
- Цинзерлинг Е.В. (1961) Искусственное двойникование кварца. М.: Изд-во АН СССР, 174 с.
- Широкий О.И. (1986) Типоморфные особенности кварца и их использование при поисках, оценке и разведке жильных месторождений золота и олова. Автореф. дисс. ...канд. геол.-мин. наук. Иркутск, 20 с.
- Юргенсон Г.А. (1984) Типоморфизм и рудоносность жильного кварца. М.: Недра, 149с.
- Юргенсон Г.А. (2003) Типоморфизм и рудные формации. Новосибирск: Наука, 369 с.
- Юргенсон Г.А. (2014) Типоморфизм и прогноз золотосеребряного оруденения. Чита: ЗабГУ, 172 с.
- Юргенсон Г.А. (2021) Особенности химического состава пирита надрудной зоны Тасеевского золотосеребряного месторождения (Россия, Забайкалье). *Вестник ЗабГУ*, **27**(5), 44-52. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-5-44-52>
- Юргенсон Г.А., Перевертаев В.Д., Аношкин В.Н., Козаченко А.А., Запков В.Т. (1973) Проводимость и α - β -переходы в искусственном и природном кварце. *Спектроскопия диэлектриков и процессы переноса*. Мат-лы Всесоюз. конф. "Физика диэлектриков и перспективы ее развития". Л., 22-26 октября 1973 г. Т. I. Ленинградск. политехн. ин-т, 198-199.
- Юргенсон Г.А., Тумуров Г.Т. (1980) О совершенстве кристаллического строения жильного кварца. *Изв. ВУЗов. Сер. геол. и разведка*, (6), 50-59.
- Юргенсон Г.А., Тумуров Г.Т. (1977) Совершенство кристаллического строения жильного кварца как критерий условий образования и типов зональности рудных месторождений. *Геолого-структурные особенности рудных полей и месторождений Забайкалья*. Мат-лы расширенного заседания ученого совета ЗабНИИ, посвящ. акад. С.С. Смирнову, 22-23 февраля 1977 г. Чита: ЗабНИИ, 27-30.
- Юргенсон Г.А., Тупяков В.Е., Широкий О.И. (1979) Вариации состава и свойств жильного кварца месторождения золото-сульфидно-кварцевой формации как отражение рудной зональности и условий образования. *Геол. руд. месторождений*, **21**(3), 56-67.
- Юргенсон Г.А., Юргенсон Т.Н. (1991) Минералого-геохимическая методика определения рудноформационной принадлежности и оценки эрозийного среза среднелунных месторождений золота. М.: Мин-гео СССР, 97с.
- Gamyani G.N., Goryachev N.A. (2008) Mineralogic Grounds for a metallogenic study of Mesozoic Structures in the Verkhoyan-Kolyma Area. *Gold of the North Pacific RIM. The International Geological, Exploration, and Mining Forum: Abstracts of the All-Kolyma mining-geological Conference dedicated of First Kolymian Expedition headed by Yuriy Bilibin, which was responsible for the discovery of Gold on the Kolyma River Basin of Northeast Russia (Magadan, September, 10-14)*. Magadan: SVKNII DVO RAN Publ., 154-155.

REFERENCES

- Boiko S.M. (1983) Typomorphic properties and composition of quartz and sulfides in deposits of the tin-tungsten belt of Transbaikalia. *Typomorphism of minerals and its applied significance*. Chita, ONTI ZabNII Publ., 7-10. (In Russ.)
- Buldakov I.V., Gavryuchenkov F.G. (1972) On the dependence of the temperature of α - β -transformations of natural quartz on the size of the unit cell. *Mineralogy and Geochemistry*. Iss. 4. Leningrad, 55-58. (In Russ.)
- Gamyani G.N., Goryachev N.A. (1983) Zoning of changes in the typomorphic properties of minerals in one of the

- gold deposits of Eastern Yakutia. *Typomorphic features of ore minerals from endogenous formations of Yakutia*. Yakutsk, 6-19. (In Russ.)
- Gamyanin G.N., Goryachev N.A. (2008) Mineralogic Grounds for a metallogenic study of Mesozoic Structures in the Verkhoyan-Kolyma Area. *Gold of the North Pacific RIM*. The International Geological, Exploration, and Mining Forum: Abstracts of the All-Kolyma mining-geological Conference dedicated of First Kolymian Expedition headed by Yuriy Bilibin, which was responsible for the discovery of Gold on the Kolyma River Basin of Northeast Russia (Magadan, September, 10-14). Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 154-155. (In Russ.)
- Gamyanin G.N., Goryachev N.A., Vikent'eva O.V. (2016) Kysylga – gold-silver deposit in the terrigenous strata of the Verkhoyansk-Kolyma mesozoids. *Pacific Geol.*, **35**(33), 63-74 (translated from *Tikhookeanskaya Geologiya*, **35**(33), 63-74).
- Ginzburg A.I., Sidorenko G.A., Kuz'min V.I. (1981) Mineralogical studies in the practice of geological exploration. Moscow, Nedra Publ., 237 p. (In Russ.)
- Goryachev N.A. (1992) Vein quartz of gold deposits of the Yana-Kolyma belt. Magadan, 136 p. (In Russ.)
- Gvozdev V.I., Grebennikova A.A., Vakh A.S., Goryachev N.A., Fedoseev D.G. (2020) Evolution of mineral formation processes during the formation of gold-rare metal ores of the Sredne-Golgotai deposit (Eastern Transbaikalia). *Pacific Geol.*, **39**(1), 70-91 (translated from *Tikhookeanskaya Geologiya*, **39**(1), 70-91).
- Konstantinov M.M., Kosovets T.N., Kryazhev S.G., Natalenko M.V., Struzhkov S.V., Ustinov V.I. (2002) Structure of gold-bearing ore-forming systems. Moscow, TsNIGRI Publ., 190 p. (In Russ.)
- Korobeinikov A.F., Pshenichkin A.Ya. (1985) Geochemical features of pyrite from gold deposits. *Geokhimiya*, **1**, 93-104. (In Russ.)
- Kozachenko A.A., Yurgenson G.A. (1973) Attachment to Thermolum-I and TU-1m instruments for accurate temperature measurement. *Geology, exploration and evaluation of deposits in Transbaikalia*. Chita, NTGO ZabNII Publ., 53-55. (In Russ.)
- Laz'ko E.M., Lyakhov Yu.V., Piznyur F.V. (1981) Physico-chemical basis for predicting post-magmatic mineralization. Moscow, Nedra Publ., 256 p. (In Russ.)
- Narseev V.A. (1973) Endogenous zoning of gold deposits in Kazakhstan. Alma-Ata, IMS Publ., 237 p. (In Russ.)
- Peskov A.V., Alekina E.V., Tarasova E.Yu. (2020) Typomorphic features of quartz. *Uspekhi Sovremennogo Etestvoznaniya*, (11), 95-100. (In Russ.)
- Research in Solid State Physics. (1973) V. 2. Irkutsk, Publishing house of the Irkutsk university, 187 p. (In Russ.)
- Rutshtein I.G., Bogach G.I., Vinnichenko E.L., Karasev V.V., Negoda V.M., Shivokhin E.A., Abdukarimova T.F., Nadezhdina T.N., Pinaeva T.A. (2002) State Geological Map of the Russian Federation, scale 1 : 200,000. M-50-IV (Shelopugino). (Ed. N.N. Chaban). St.Petersburg, Publishing house of the St.Petersburg map factory VSEGEI, 120 p. (In Russ.)
- Sadovnichii R.V., Mikhailina A.A., Rozhkova N.N., Inina S.I. (2016) Morphological and structural features of quartz from shungite rocks of the Maksovskaya deposit. *Trudy Karel'skogo NTs RAN. Ser. Geol. Dokembriya*, (2), 73-89. (In Russ.)
- Shirokii O.I. (1986) Typomorphic features of quartz and their use in the search, evaluation and exploration of vein deposits of gold and tin. Abstract ... cand. geol. and min. sci. diss. Irkutsk, 20 p. (In Russ.)
- Spiridonov A.M., Zorina L.D., Kitaev N.A. (2006) Gold-bearing ore-magmatic systems of Transbaikalia. Novosibirsk, GEO Publ., 291 p. (In Russ.)
- Tsinzerling E.V. (1961) Artificial twinning of quartz. Moscow, Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 174 p. (In Russ.)
- Volarovich G.P., Nikolaeva L.N., Barkhudaryan N.B. (1980) Typomorphic properties of native gold and quartz from near-surface deposits. *Scientific foundations and practical use of mineral typomorphism*. Moscow, Nauka Publ., 204-212. (In Russ.)
- Vorotyntsev A.A., Krasnikov V.I., Landa V.E., Sumatokhin V.A., Rogov A.V., Vanin N.I. (1983) Typomorphic properties of ore minerals and zoning of one gold-sulfide deposit. *Typomorphism of minerals and its applied significance*. Chita, ONTI ZabNII Publ., 42-44. (In Russ.)
- Yurgenson G.A. (2003) Typomorphism and ore formations. Novosibirsk, Nauka Publ., 369 p. (In Russ.)
- Yurgenson G.A. (2021) Features of the chemical composition of pyrite in the superore zone of the Taseevskoye gold-silver deposit (Russia, Transbaikalia). *Vestnik ZabGU*, **27**(5), 44-52. (In Russ.) <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-5-44-52>
- Yurgenson G.A., Perevertaev V.D., Anoshkin V.N., Kozachenko A.A., Zapkov V.T. (1973) Conductivity and α - β transitions in artificial and natural quartz. *Spectroscopy of dielectrics and transport processes*. Proc. of the All-Union Conf. "Physics of Dielectrics and Prospects of Its Development". Leningrad, October 22–26, 1973. V. I. Leningrad, Publishing House of the Leningrad Polytechnic Institute, 198-199. (In Russ.)
- Yurgenson G.A., Tumurov G.T. (1980) On the perfection of the crystalline structure of vein quartz. *Izvestiya VUZov. Ser. Geologiya i Razvedka*, **6**, 50-59. (In Russ.)
- Yurgenson G.A., Tumurov G.T. (1977) Perfection of the crystalline structure of vein quartz as a criterion for the conditions of formation and types of zoning of ore deposits. *Geological and structural features of ore fields and deposits of Transbaikalia*. Proceedings of the extended meeting of the academic council of ZabNII, dedicated to academician S.S. Smirnov, February 22–23, 1977. Chita, ZabNII Publ., 27-30.
- Yurgenson G.A., Tupyakov V.E., Shirokii O.I. (1979) Variations in the composition and properties of vein quartz from a gold-sulfide-quartz formation deposit as a reflection of ore zoning and formation conditions. *Geol. Ores Depos.*, **21**(3), 56-67. (In Russ.)
- Yurgenson G.A., Yurgenson T.N. (1991) Mineralogical-geochemical method for determining the ore-formational affiliation and assessing the erosion cut of medium-deep gold deposits. Moscow, Mingeo SSSR Publ., 97 p. (In Russ.)