

УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КВАРЦ-ЛАЗУЛИТОВОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ НА ГОРЕ ЧЕРНАЯ, ПРИПОЛЯРНЫЙ УРАЛ (ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ)

© 2022 г. Н. В. Сокерина^а, *, Н. Ю. Никулова^а, *, М. Ю. Сокерин^а, *,
С. И. Исаенко^а, *, С. О. Зорина^б, **

^аИнститут геологии имени академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН,
Первомайская, д. 54, Сыктывкар, 167982 Россия

^бКазанский (Приволжский) федеральный университет, Кремлевская ул. 18, Казань, 420008 Россия

*e-mail: nvsokerina@rambler.ru

**e-mail: svzorina@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.04.2021 г.

После доработки 25.01.2022 г.

Принята к публикации 27.01.2022 г.

Впервые проведено изучение флюидных включений в кварце и лазулите ($Mg, Fe^{2+}Al_2(OH, PO_4)_2$ в кварц-лазулит-гематит-турмалиновых жилах горы Черная на Приполярном Урале. Флюидные включения в лазулите и в кварце очень похожи. Гомогенизация основной массы включений в лазулите происходит при 155–220°C, в кварце 147–235°C, соленость меняется в пределах 12.5–15.0, и 10.7–15.7 мас. % $NaCl_{\text{кв}}$ соответственно. Температура эвтектики водно-солевого раствора в обоих случаях изменяется в пределах –31...–40°C, что свидетельствует о присутствии в минералообразующем флюиде солей магния, натрия и железа. Газовая фаза флюидных включений представлена углекислым газом и азотом приблизительно в равных пропорциях.

Ключевые слова: лазулит, гематит, кварц, флюидные включения, условия образования

DOI: 10.31857/S0016752522090072

ВВЕДЕНИЕ

На Приполярном Урале широко развиты кварцевые жилы, формирование которых происходило на разных этапах геологического развития региона, в широком возрастном диапазоне. Масштабное изучение кварцевых жил, метасоматических изменений вмещающих пород и условий их образования проводилось в связи с определением технологических свойств кварца и выявлением в них золото-сульфидной минерализации (Кузнецов, 2012; Сокерина, 2011 и др.). В то же время, условия образования кварцевых жил с лазулитовой минерализацией до настоящего времени остаются слабо изученными. Мы предприняли попытку выяснения генезиса таких жил на основе оценки физико-химических особенностей минералообразования, установленных при изучении флюидных включений в кварце и лазулите из жильной минерализации проявления горы Черной, расположенного в северной части Желаннинского кварцевожильного поля.

Проявление приурочено к зоне крутопадающего разлома взбросового характера в поле развития кварцитопесчаников обеизской свиты ниж-

него ордовика. Лазулитсодержащие кварцевые жилы мощностью до 1 м выявлены в элювиальных развалах и коренных выходах обеизских кварцитопесчаников и контролируются многочисленными опережающими трещинами. Их формирование связывается с ранней хрусталеносной стадией кварцевожильной минерализации Желаннинского кварцевожильного поля. Кварц в жилах молочно-белый с участками бесцветного, с параллельно-шестоватой крупнозернистой структурой и редкими хрусталеносными пустотами, содержит минеральные включения (Репина, 2016). Наиболее распространенными минералами являются турмалин, лазулит и гематит. Кроме того, присутствуют дистен, хлоритоид, рутил, мусковит, алунит, андалузит, апатит, аугелит, флоренсит и сванбергит (Литошко, Буканов, 1989; Репина, 2015; Репина, 2016). Лазулит встречается в кварцевых жилах, образуя в них рассеянную вкрапленность, гнезда и скопления неправильной формы. Он имеет ярко выраженный синий цвет, полупрозрачный, местами почти непрозрачный. Размер зерен и частично ограненных кристаллов обычно не превышает первых миллиметров, но есть и более крупные. С.А. Репиной описаны еди-

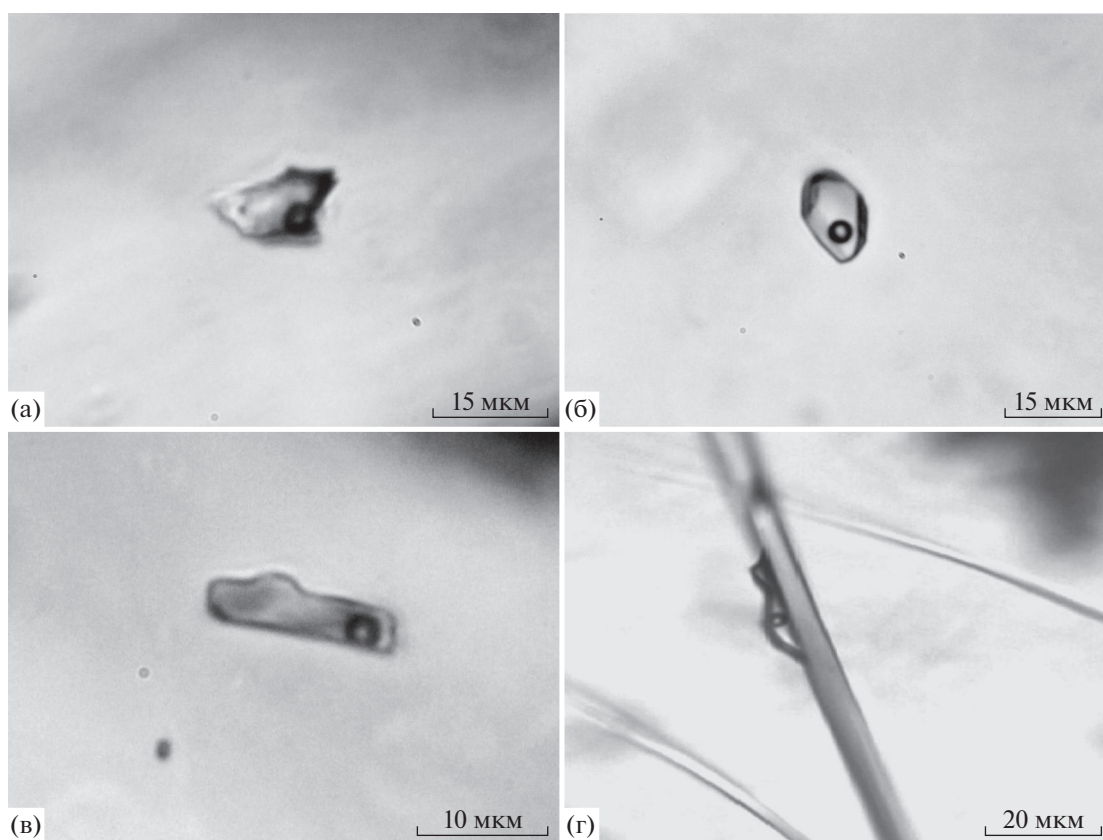


Рис. 1. Типичные первичные флюидные включения в: а – лазулите; б, в – крупнозернистом кварце; г – на границе кварца и турмалина.

нические образцы размером в 10 см (Репина, Попова, 2015). Более подробно с геологическим строением и минералогическими особенностями проявления можно ознакомиться в работах (Ефанова и др., 2004; Литошко, Буканов, 1989; Никулова и др., 2003; Репина, Попова, 2015; Репина, 2016).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение флюидных включений в кварце проведено в Институте геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН в полированных пластинах методами гомогенизации и криометрии с использованием термо-криосталика THMSG600 фирмы Linkam. Погрешность измерений $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Соленость растворов во включениях измерялась по температуре плавления льда (Bodnar, Vityk, 1996). Солевой состав включений определялся по температуре эвтектики водно-солевой системы (Борисенко, 1977). Газовый состав индивидуальных включений изучался на высокоразрешающем рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon) при комнатной температуре. Для регистрации спектров применялась решетка спектрометра 600 ш/мм, размер конфокального отверстия составлял 300 и 500 мкм, щель – 100 мкм, мощность

возбуждающего излучения He-Ne лазера (длина волны 632.8 нм) – 20 мВт, Ar⁺ лазера – 120 мВт (514.5 нм). Содержания газов подсчитывались по методике (Burke, 2001).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения условий минералообразования нами изучены первичные и первично-вторичные включения в лазулите и кварце. К первичным отнесены те, которые встречаются поодиночке или небольшими группами, к первично-вторичным – в мелких трещинах, не выходящих за пределы индивидов. За температуру минералообразования условно принята температура гомогенизации флюидных включений, которая является минимально возможной температурой минералообразования. Для определения истинной температуры минералообразования необходимо ввести поправку на давление. Так для кварца месторождения Желанное, которое расположено в непосредственной близости и, вероятно, образовано при близких температурах и давлениях, эта поправка не превышает 15°C (Козлов, 1998).

В лазулите изучены первичные включения (рис. 1а). Они содержат 5–10 об. % газовой фазы.

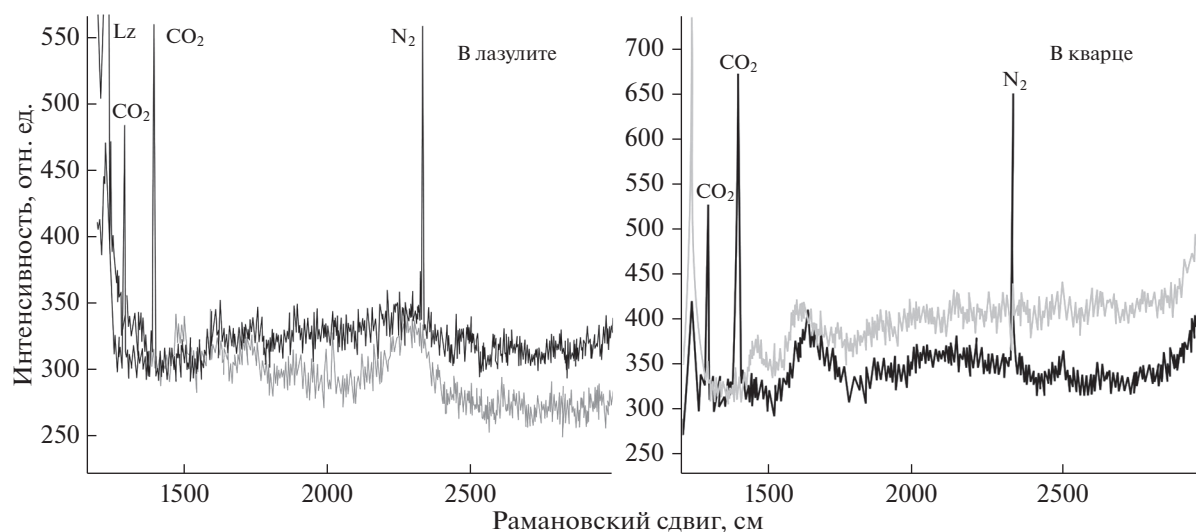


Рис. 2. Типичные рамановские спектры газовой фазы флюидных включений в лазулите и кварце.

Температура гомогенизации составляет 155–220°C. Плавление эвтектики происходит при –31...–40°C, что может свидетельствовать о присутствии в жидкой фазе солей магния, натрия и железа, соленость меняется от 12.5 до 15.0 мас. % $\text{NaCl}_{\text{экв}}$. Включения имеют разнообразную форму, иногда с элементами огранки, размер включений не превышает 30 мкм. При охлаждении гетерогенизация газовой фазы не наблюдается (это касается и ниже описанных включений). Вместе с лазулитом практически всегда встречается гематит, что, вероятно, вызвано близостью условий их образования.

В крупнозернистом кварце изучены первичные и первично-вторичные включения. Первичные включения содержат 5–10 об. % газовой фазы (рис. 1б, 1в) и характеризуются температурой гомогенизации 204–235°C. Плавление эвтектики наблюдается при температурах –31...–40°C, что может свидетельствовать о присутствии в жидкой фазе солей магния, натрия и железа. Соленость меняется от 11.0 до 15.7 мас. % $\text{NaCl}_{\text{экв}}$. Форма включений разнообразная, иногда с элементами

огранки, размер включений не превышает 30 мкм. Встречены единичные включения, содержащее до 25 об. % газовой фазы с температурой гомогенизации до 393°C, соленостью до 17.7 мас. % $\text{NaCl}_{\text{экв}}$ и температурой эвтектики –44, –52°C.

Первично-вторичные включения в крупнозернистом кварце содержат 5–10 об. % газовой фазы, температура гомогенизации равна 147–182°C. Температура эвтектики колеблется от –31 до –39°C, что характерно для водных растворов солей магния, натрия и железа. Соленость меняется от 10.7 до 15.7 мас. % $\text{NaCl}_{\text{экв}}$. Форма включений разнообразная, иногда с элементами огранки, размер включений не превышает 30 мкм.

Кварц иногда содержит тонкие игольчатые кристаллы турмалина. В самом турмалине видимые флюидные включения нами не обнаружены. Но на границе кварц-турмалин нами встречено единичное флюидное включение (рис. 1г), которое содержит 5–10 об. % газовой фазы и гомогенизируется при температуре около 130–140°C. Плавление эвтектики в нем наблюдается при температуре –23°C, что, вероятно, свидетельствует о присутствии в составе жидкой фазы хлорида натрия. Соленость раствора равна 12.8 мас. % $\text{NaCl}_{\text{экв}}$.

Методом рамановской спектроскопии установлено, что газовый состав флюидных включений в лазулите и кварце весьма схож и состоит из углекислого газа и азота приблизительно в равных пропорциях с незначительными вариациями (табл. 1, рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сопоставление результатов изучения флюидных включений в лазулите и кварце выявило их

Таблица 1. Состав газов в флюидных включениях

№	CO ₂	N ₂	№	CO ₂	N ₂
	мол. %			мол. %	
В лазулите			В кварце		
1	37.9	62.1	7	47.0	53.0
2	63.8	36.2	8	51.4	48.6
3	40.9	59.1	9	45.1	54.9
4	54.8	45.2	10	57.7	42.3
5	48.9	51.1			
6	50.6	49.4			

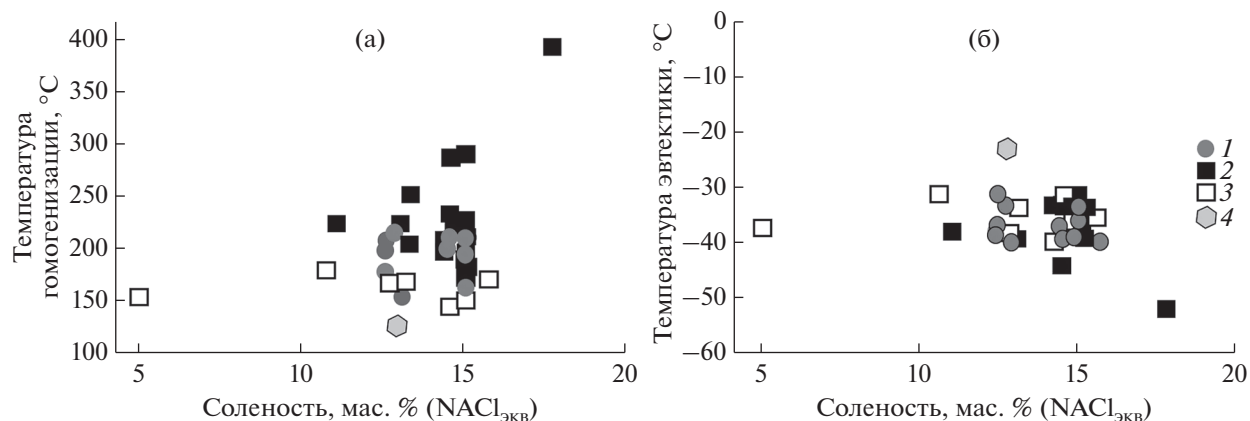


Рис. 3. а – Соотношение между температурой гомогенизации и соленостью жидкой фазы флюидных включений; б – соотношение между температурой эвтектики и соленостью жидкой фазы флюидных включений: 1 – первичные включения в лазулите; 2 – первичные включения в крупнозернистом кварце; 3 – первично-вторичные включения в крупнозернистом кварце; 4 – включение на границе кварц-турмалин.

схожесть. Гомогенизация основной массы первичных включений в лазулите происходит при 155–220°C, в кварце 204–235°C, соленость меняется в пределах 12.5–15.0 и 11.0–15.7 мас. % $\text{NaCl}_{\text{экв}}$ соответственно (рис. 3а). Температура эвтектики водно-солевого раствора в обоих случаях обычно изменяется в пределах –31...–40°C (рис. 3б), что свидетельствует о присутствии в минералообразующем флюиде солей магния, натрия и железа.

Газовый состав минералообразующего флюида также практически постоянен и представлен углекислым газом и азотом приблизительно в равных количествах (табл. 1). Все перечисленные факторы и наличие участков индукционных поверхностей совместного роста минералов (Репина, Попова, 2015) доказывают, что формирование кварцевой и лазулитовой минерализаций произошло близкоодновременно из одного флюида. Температура гомогенизации первичных включений в кварце немного выше, чем в лазулите, это связано с его более ранним началом кристаллизации при более высоких температурах.

Вариации температур эвтектик (–31...–40°C) являются следствием неоднородности солевого состава в сингенетичных включениях и, скорее всего, связаны с образованием в условиях колеблющихся концентраций минералообразующих флюидов.

Лазулит в жилах обычно встречается с гематитом, что, вероятно, свидетельствует о близких условиях образования.

Присутствие единичных первичных включений с более высокой соленостью, температурой гомогенизации и отличающиеся по составу растворенных солей в жидкой фазе может указывать на существование реликтов более ранней генерации кварца. Наличие большого количества рас-

шнурованных включений свидетельствует о преобразовании кварцевых жил.

Источником вещества для образования лазулит-гематитовой минерализации могли быть как вмещающие породы, так и глубинные растворы. Высокая тектоническая нарушенность данного района сделала его весьма проницаемым для гидротермальных флюидов различного происхождения. Фосфор и другие компоненты могли поступать из отложений алькесвожской толщи, сложенной переотложенными продуктами кембрийской коры выветривания по вендским базальтоидам. В эту толщу железо и фосфор, вероятнее всего, попали при размыве фосфатоносных кор выветривания по подстилающим базитам саблегорской свиты позднерифейско-ранневендского возраста. Далее, при метаморфизме, фосфорсодержащие гидроокислы железа могли образовать лазулит-гематитовую минерализацию (Юдович и др., 2002).

Изотопные исследования флюидных включений кристаллов горного хрусталя месторождения Желанного, расположенного в 5 км к югу от описываемого проявления, выявили повышенные содержания радиогенных аргона и гелия, источником которых считаются породы протерозойского возраста (Козлов и др., 1998). Предположение о существовании глубинного источника вещества согласуется, также с данными (Никулова и др., 2003), полученными при изучении сванбергитовой минерализации в обейских песчаниках, которые вмещают изученные нами кварцевые жилы.

Как было показано выше, газовый состав флюидных включений в жильном кварце и лазулите характеризуется высоким содержанием азота (около 50 мол. %). К сожалению, в литературе очень мало данных по газовому составу флюидных включений в лазулите других регионов. Так, например, гималайские лазулиты содержат в ос-

новном углекислый газ (Chauhan et al., 2019). Сведений не достаточно для выводов, но, возможно, углекислотно-азотный состав, в близких пропорциях, является характерной особенностью лазулитов данного проявления.

По температурам гомогенизации флюидных включений лазулит и кварц похожи на жильный кварц месторождения Желанное (Сокерина, Шанина, 2001; и др.), что подтверждает предположение об их близкоодновременном образовании (Репина, Попова 2015; и др.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кварц-лазулитовая минерализация формировалась при температурах близких 155–235°C из флюида, содержащего соли магния, натрия и железа в условиях колеблющихся концентраций минералообразующего флюида, который был обогащен углекислым газом и азотом.

Исследование проведено по теме НИР ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (ГРН № АААА-А17-117121270036-7). Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета, за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания № 671-2020-0049 в сфере научной деятельности, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору № 14.Y26.31.0029 в рамках реализации постановления Правительства № 220.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Борисенко А.С. (1977) Изучение солевого состава растворов газовой-жидких включений в минералах методом криометрии. *Геология и геофизика*. (8), 16-27.

Ефанова Л.И., Никулова Н.Ю., Швецова И.В. (2004) Лазулит в кварцито-песчаниках тельпосской свиты (O₁t1) на Приполярном Урале. *Лито-генез и геохимия осадочных формаций Тимано-Уральского региона*. Сыктывкар: Геопринт, № 5. 131-132.

Козлов А.В. (1998) Хрусталеобразующие гидротермальные системы / Диссертация доктора геолого-минералогических наук. Санкт-Петербург: СПбГГИ, 446 с.

Кузнецов С.К., Светова Е.Н., Шанина С.Н., Филиппов В.Н. (2012) Элементы примеси в кварце гидротермально-метаморфогенных жил Приполярноуральской провинции. *Геохимия*. (11), 1016-1031.

Kuznetsov S.K., Svetova E.N., Shanina S.N., Filippov V.N. (2012) Minor elements in quartz from hydrothermal-metamorphic veins in the Nether Polar Ural province. *Geochem. Int.* **50**(11), 911-925.

Литошко Д.Н., Буканов В.В. (1989) Лазулит севера Урала. *Записки ВМО*. Ч.СХVIII. Вып. 1. 35-41.

Никулова Н.Ю., Ефанова Л.И., Швецова И.В. (2003) Сванбергит в песчаниках тельпосской свиты на Приполярном Урале. *Сыктывкарский минералогический сборник* № 33. Сыктывкар: Геопринт. 143-148.

Репина С.А., Попова В.И. (2015) Алюмосульфат-фосфаты в хрусталоносных жилах Желаннинского рудного поля (Приполярный Урал). *Минералогия*. (4), 123-134.

Репина С.А. (2016) *Месторождение жильного кварца и горного хрусталя Желанное*. Екатеринбург: УрО РАН. 287 с.

Сокерина Н.В., Пискунова Н.Н. (2011) Условия роста кристаллов кварца на месторождении Желанное, Приполярный Урал (по данным изучения флюидных и твердых включений). *Геохимия*. (2), 192-202.

Sokerina N.V. and Piskunova N.N. (2011) Growth Condition of Quartz Crystals at the Zhelannoe Deposit in the Nether Polar Urals: Evidence from Fluid and Solid Inclusions. *Geochem. Int.* **49**(2), 181-190.

Сокерина Н.В., Шанина С.Н. (2001) Газово-жидкие включения в жильном кварце месторождения Желанное. *ЗРМО*. (4), 71-78.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Швецова И.В. (2002) Золотоносные кианитовые кварциты в тельпосской свите. *Геохимия древних толщ Севера Урала*. Сыктывкар: Геопринт. 127-130.

Bodnar R.J., Vityk M.O. (1994) Interpretation of microthermometric data for H₂O–NaCl fluid inclusions. *Fluid inclusions in minerals: methods and applications*. Pontignano: Siena. 117-130.

Burke E.A.J. (2001) Raman microspectrometry of fluid inclusions. *Lithos*. **55**, 139-158.

Chauhan D.S., Rajesh S., Rao D. R. (2019) A new occurrence of lazulite from the Main Central Thrust in Kumaun Himalaya, India: fluid inclusion, EPMA and Raman spectroscopy focusing on lazulite in a highly tectonized zone. *Geological Society, London, Special Publications*. **481**, 211-230.