

УДК 548.4:549.5

DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-1

УСЛОВИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В КИСЛЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, СВЯЗАННЫХ С ФОРМИРОВАНИЕМ КОЛЧЕДАНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УРАЛА И АЛТАЕ-САЯНСКОЙ ОБЛАСТИ

В.А. Симонов^{1,3,4}, В.В. Масленников², А.В. Котляров^{1,4}¹ *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, пр. Академика Коптюга 3,
г. Новосибирск, 630090 Россия; kotlyarov@igm.nsc.ru*² *Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская область, 456317 Россия*³ *Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,
ул. Пирогова 1, г. Новосибирск, 630090 Россия*⁴ *Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская 18, г. Казань, 420008 Россия*

Статья поступила в редакцию 01.11.2021 г., принята к печати 17.11.2021 г.

MINERAL FORMATION CONDITIONS IN ACID MAGMATIC SYSTEMS RELATED TO THE FORMATION OF MASSIVE SULFIDE DEPOSITS OF THE URALS AND ALTAI-SAYANY AREA

V.A. Simonov^{1,3,4}, V.V. Maslennikov², A.V. Kotlyarov^{1,4}¹ *Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, pr. Akademika Koptugy 3, Novosibirsk, 630090 Russia;
kotlyarov@igm.nsc.ru*² *South Urals Federal Research Center of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Miass,
Chelyabinsk oblast, 456317 Russia*³ *Novosibirsk National Research State University, ul. Pirogova 1, Novosibirsk, 630090 Russia*⁴ *Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya 18, Kazan, 420008 Russia*

Received 01.11.2021, accepted 17.11.2021

Аннотация. Исследования расплавных включений в кварце свидетельствуют о сходстве кислых магматических систем колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области. Во всех рассмотренных случаях месторождения возникли при участии расплавов, отвечающих по своему составу риодацитам и риолитам нормальной щелочности, относящимся к толентовской серии. Установлен однотипный характер эволюции кислых магм с падением содержания петрогенных компонентов (TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O) на фоне роста содержания SiO_2 . Результаты изучения включений в кварце показывают накопление Cu в относительно маловодных кислых расплавах древних (кембрийских) месторождений Алтае-Саянской области при пониженных содержаниях металла в промежуточных по возрасту (силур–девон) водонасыщенных магмах Урала. Наиболее молодые (девонские) магмы Сибири развиваются одновременно по этим двум направлениям. Анализ включений в кварце говорит о том, что минимальные содержания редких и редкоземельных элементов характерны для силурийско-девонских кислых расплавов на уральских колчеданных месторождениях при максимальном накоплении этих компонентов в наиболее молодых (девонских) магмах и промежуточном составе древних (кембрийских) магматических систем Алтае-Саянской области. Особенности распределения редких и редкоземельных элементов во включениях в кварце свидетельствуют о сходстве кислых магматических систем колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области с современными надсубдукционными расплавами в переходных зонах океан–континент. Расчетное моделирование с использованием данных по расплавным включениям в кварце подтверждает наши выводы (Симонов, Масленников, 2020) о том, что сонахождение контрастных (базитовых и кислых) вулканогенных комплексов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Алтае-Саянской области, является результатом закономерной эволюции базальтоидных магм.

Ключевые слова: условия кристаллизации минералов, базальт-риолитовые комплексы, колчеданные месторождения, расплавные включения в кварце, кислые расплавы.

Abstract. Studies of melt inclusions in quartz indicate the similarity of acid magmatic systems of massive sulfide deposits in the Urals and Altai-Sayany region. The melts of normal alkalinity corresponding to rhyodacite and rhyolite compositions related to the tholeiitic series are dominant in all the deposits considered. The magmas are characterized by the same type evolution with a decreasing content of main oxides (TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O) and an increasing SiO_2 content. Our results show the accumulation of Cu in relatively low- H_2O acidic melts of ancient (Cambrian) deposits of the Altai-Sayany region and low metal contents in the intermediate (Silurian–Devonian) and H_2O -saturated magmas of the Urals. The youngest (Devonian) magmas of Siberia evolve simultaneously along these two directions. The analysis of melt inclusions in quartz suggests that the minimum contents of trace and rare earth elements are characteristic of the Silurian–Devonian acid melts of the Urals, with their maximum contents in the youngest (Devonian) magmas and the intermediate contents of ancient (Cambrian) magmatic systems of the Altai-Sayany region. The features of rare and rare earth element patterns in melt inclusions in quartz indicate the similarity of acid magmatic systems of massive sulfide deposits in the Urals and Altai-Sayany region with present-day suprasubduction melts in the ocean-continent transition zones. Computational modeling using data on melt inclusions in quartz confirms our previous conclusions (Simonov, Maslennikov, 2020) that the occurrence of contrasting (basic and felsic) volcanic complexes with massive sulfide deposits in the Urals and Altai-Sayany region is a result of evolution of basaltoid magmas.

Keywords: conditions of mineral crystallization, basaltic-rhyolitic complexes, massive sulfide deposits, melt inclusions, quartz, acidic melts.

Для цитирования: Симонов В.А., Масленников В.В., Котляров А.В. Условия минералообразующих процессов в кислых магматических системах, связанных с формированием колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области. Минералогия, 7(4), 5–32. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-1

For citation: Simonov V.A., Maslennikov V.V., Kotlyarov A.V. Mineral formation conditions in acid magmatic systems related to the formation of massive sulfide deposits of the Urals and Altai-Sayany area. Mineralogy, 7(4), 5–32. DOI: 10.35597/2313-545X-2021-7-4-1.

Введение

Исследования колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области показывают их тесную ассоциацию с эффузивами основного и кислого составов. Приуроченность данных месторождений к древним вулканическим структурам является очевидным фактом. В связи с этим, важно выяснить условия формирования базальт-риолитовых комплексов, вмещающих колчеданные руды.

Большую помощь для определения параметров кристаллизации минералов в магматических системах, формирующих эффузивные ассоциации колчеданных месторождений, может оказать изучение расплавных включений. В этом направлении получены важные данные для базальтовых комплексов ряда колчеданных месторождений Урала и Сибири (Симонов, Масленников, 2020). Несмотря на имеющиеся данные по расплавным включениям (Наумов и др., 1999; Симонов и др., 1999, 2005, 2006; Лапухов и др., 2001; Гаськов и др., 2006, 2008; Карпухина и др., 2013; Simonov

et al., 2010), многие вопросы происхождения кислых вулканитов из базальт-риолитовых комплексов остаются дискуссионными и требуют дальнейших исследований. В частности, не решены проблемы происхождения первичных магм, ответственных за формирование кислых магматических систем, образующих совместно с расплавами базитового состава базальт-риолитовые комплексы колчеданных месторождений.

В последние годы в результате изучения расплавных включений в кварце нами получен значительный объем информации об условиях минералообразования в кислых магматических системах, ответственных за образование комплексов пород, обладающих тесной связью с формированием колчеданных месторождений. Исследованы образцы, собранные авторами во время многочисленных (в том числе совместных, начиная с 1998 г.) экспедиционных работ. В случае месторождения Юбилейное (Рудный Алтай) и объектов Салаирского рудного поля использованы образцы, предоставленные И.В. Гаськовым и А.С. Лапуховым (Ин-

ститут геологии и минералогии СО РАН (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск), результаты изучения которых частично опубликованы в совместных статьях (Лапухов и др., 2001; Симонов и др., 2005; Гаськов и др., 2006, 2008; Simonov et al., 2010). В настоящее время у авторов имеется представительное количество оригинальных данных (более 250 анализов) по составам расплавных включений в кварце из пород месторождений Урала (Яман-Касинское и Вишневокское) и Алтае-Саянской области (Кызыл-Таштыгское, Юбилейное и Салаирское рудное поле в Сибири, а также Николаевское в Казахстане). Для этих же месторождений нами получен существенный объем (около 70 анализов) данных по содержанию во включениях в кварце редких, редкоземельных элементов, рудных компонентов и воды. При обработке результатов исследования расплавных включений в кварце из эффузивов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Алтае-Саянской области, дополнительно использована информация по включениям в кварце месторождений Верхнеуральского рудного района на Южном Урале, включающая данные по валовым составам, а также по содержанию рудных, редких и редкоземельных элементов (Наумов и др., 1999; Карпухина и др., 2013).

Судя по результатам предыдущих работ, большинство отмеченных выше колчеданных месторождений формировалось в древних субдукционных (переходных океан-континент) зонах в условиях развития островных дуг и окраинных морей (или задуговых бассейнов) различного возраста (Масленников, Зайков, 1998; Симонов и др., 1999; Лапухов и др., 2001; Зайков, 2006). К наиболее древним (кембрийским) структурам принадлежат месторождения Тувы (Кызыл-Таштыгское) и Салаира. Для сульфидных месторождений Урала возраст вмещающих толщ варьирует от силура (Яман-Касинское) до девона (Вишневокское и месторождения Верхнеуральского района). Месторождения Рудного Алтая (Юбилейное и Николаевское) формировались в девоне. Таким образом, на основе изучения расплавных включений в кварце имеется возможность выяснить особенности эволюции во времени параметров кислых магматических систем, имеющих тесную связь с формированием колчеданных месторождений. В данной статье обобщены опубликованные ранее авторские данные и приводится новая информация об условиях минералообразующих процессов в кислых магматических системах, ответственных за формирова-

ние эффузивных комплексов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Алтае-Саянской области. Особое значение имеют новые результаты сравнительного анализа представительного объема информации по расплавным включениям в кварце из эффузивов месторождений различного возраста Урала и Сибири, а также расчетное моделирование на основе изучения включений в кварце, позволившее получить новые данные, подтверждающие формирование базальт-риолитовых комплексов колчеданных месторождений в ходе эволюции глубинных исходных базальтоидных магм.

Методы исследования

Основой для выяснения физико-химических условий в кислых магматических системах, принимавших участие в формировании базальт-риолитовых комплексов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Алтае-Саянской области, послужили результаты исследования расплавных включений в кварце. Исследования расплавных включений выполнены в ИГМ СО РАН. Эксперименты по гомогенизации расплавных включений при высоких температурах проводились в микро-термокамере с инертной средой (Соболев, Слуцкий, 1984) с применением методик (Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994; и др.). Особое внимание уделялось времени эксперимента. В частности, во время высокотемпературных опытов необходимо учитывать образование во включениях кислого расплава повышенной вязкости. В связи с этим необходимы несколько умеренных по длительности (15–20 мин) выдержек при температурах свыше 900 °C (Симонов и др., 2005; Simonov et al., 2010). В итоге, в ходе исследования включений в кварце при температурах около 900 °C и выше проводились, как минимум, три выдержки по 15–20 мин и продолжительность опыта в целом достигала 80 мин.

Большое значение для получения наиболее достоверной информации при анализе расплавных включений в древних комплексах имеют методические работы при изучении включений в минералах из современных эталонных ассоциаций. Проведенные нами исследования расплавных включений в кварце из эффузивов Камчатки (современная субдукционная переходная зона океан–континент) показали, что составы стекол прогретых и закаленных включений совместно со стеклами негретых изначально стекловатых включений по большин-

ству химических компонентов формируют единые компактные поля на вариационных диаграммах. Таким образом, даже если часть изученных нами включений в кварце из эффузивов колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области могла быть перегрета в ходе высокотемпературных опытов, то это не могло существенно исказить состав этих включений.

Химический состав расплавных включений определен в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) и в ИГМ СО РАН. Гомогенные закалочные стекла прогретых включений и стекла изначально гомогенных непрогретых включений в кварце изучались на рентгеновском микроанализаторе Camebax-Micro. Пределы обнаружения (мас. %) компонентов следующие: SiO_2 – 0.007, TiO_2 – 0.032, Al_2O_3 – 0.011, Cr_2O_3 – 0.019, FeO – 0.019, MnO – 0.034, MgO – 0.011, CaO – 0.008, Na_2O – 0.017, K_2O – 0.009, Cl – 0.017, P_2O_5 – 0.011. Стандартами служили ортоклаз (OR), альбит (AB), диопсид (DI), базальтовое стекло (GL). Содержания редких, редкоземельных элементов, рудных компонентов и воды в гомогенных стеклах расплавных включений определены методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Ярославском филиале Физико-технологического института РАН (ЯФ ФТИАН) по методике (Соболев, 1996). Пределы обнаружения: H_2O – 0.05 мас. %, редкие, редкоземельные элементы и рудные компоненты – 0.01 г/т. Использовались международные стандарты – NIST 610 и NIST 611.

Особенности эволюции магматических систем при кристаллизации минералов эффузивных комплексов, вмещающих колчеданные месторождения, рассмотрены с помощью расчетного моделирования на основе данных по расплавленным включениям с использованием программы COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004).

Геолого-петрологические особенности колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области

В ходе работ по выяснению условий минералообразующих процессов в кислых магматических системах исследованы образцы, представляющие эффузивные комплексы колчеданных месторождений Урала (Яман-Касинское и Вишневское) и Алтае-Саянской складчатой области (Кызыл-Таштыгское, Юбилейное и Салаирское рудное поле

в Сибири, а также Николаевское в Казахстане); (рис. 1). Этим месторождениям посвящено множество публикаций, содержащих значительный объем геолого-петрологической и минералогической информации, как по сульфидным рудам, так и по вмещающим магматическим комплексам. Учитывая задачи проводимых нами исследований (установить физико-химические параметры кислых магматических систем) и методы их решения (изучение расплавных включений в кварце) в данном разделе приводится только краткое описание основных геолого-петрологических особенностей рассмотренных месторождений.

Яман-Касинское месторождение привлекает к себе внимание в связи с тем, что данные по составу руд, околорудных осадков и оруденелой фауне позволяют сопоставить эту рудную залежь с современными «черными курильщиками» (Зайков и др., 1995; Масленников и др., 1997; Масленников, Зайков, 1998; Масленников, 1999). Месторождение располагается в Сакмарской зоне (Южный Урал) и приурочено к риолит-базальтовому комплексу силурийского возраста, сложенному преимущественно риолитами, дацитами и, в меньшей степени, андезитами и базальтами (рис. 2) (Зайков и др., 1995). По геологическим данным разрез рудоносной структуры отличается от разрезов островодужных рудных полей отсутствием собственно андезит-базальтовой формации. Породы риолит-базальтового комплекса по химическому составу являются промежуточными между окраинно-морскими толеитовыми и островодужными известково-щелочными сериями (Серавкин, Родичева, 1990). Данные по петрохимии и геохимии пород с использованием редких элементов, распределение которых не меняется при вторичных процессах, близки к характеристикам базальтовых серий задуговых бассейнов (Симонов и др., 2001), что подтверждает представления о формировании магматических комплексов колчеданного Яман-Касинского месторождения (Южный Урал) в структурах древнего окраинного моря – задугового бассейна (Масленников, Зайков, 1998; Зайков, 2006; Симонов и др., 2006).

Вишневское месторождение располагается в Баймак-Бурибайском рудном районе (Южный Урал). Рудовмещающими породами являются среднедевонские измененные дациты с подчиненным количеством андезитов и риолитов (Мелекесцева и др., 2008). Надрудную толщу составляют красноцветные и пестроцветные дацитовые лавы, а также дациты и риолиты с гиалокластитам. Подрудная

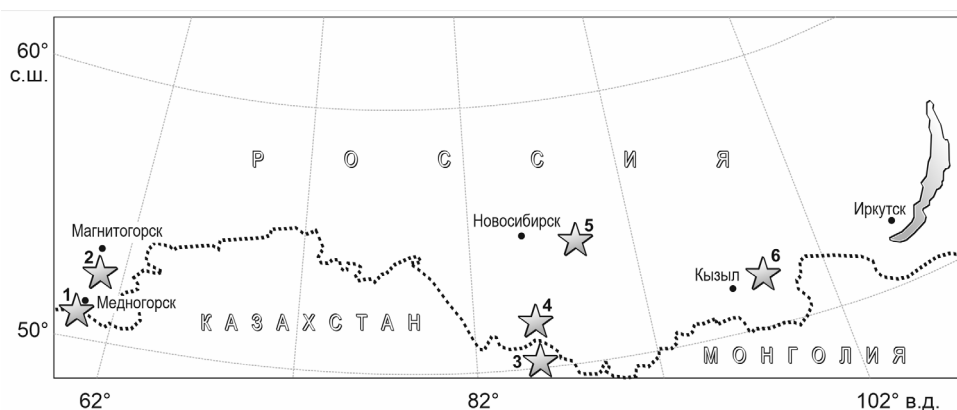


Рис. 1. Расположение исследованных колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

1–6 – колчеданные месторождения: 1 – Яман-Касинское, 2 – Вишневское, 3 – Николаевское, 4 – Юбилейное, 5 – Салаирское рудное поле, 6 – Кызыл-Таштыгское.

Fig. 1. Location of studied massive sulfide deposits of the Urals and Altai-Sayany region.

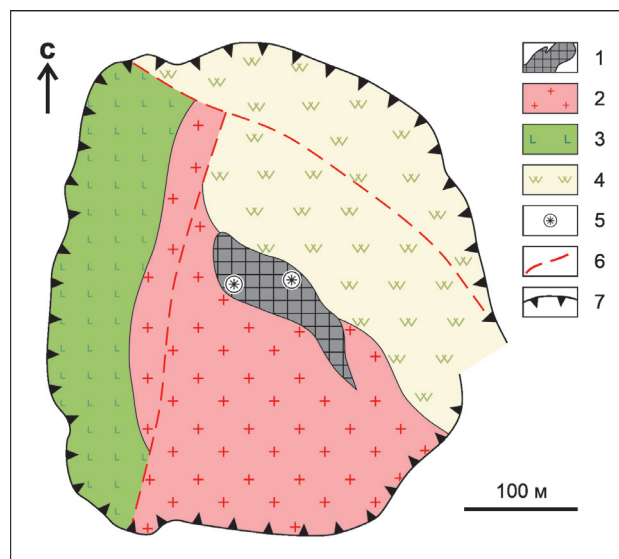
1–6 – massive sulfide deposits: 1 – Yaman-Kasy, 2 – Vishnevskoe, 3 – Nikolaevskoe, 4 – Yubileinoe, 5 – Salair ore field, 6 – Kyzyl-Tashtyg.

Рис. 2. Схема геологического строения в карьере Яман-Касинского месторождения, по (Зайков и др., 1995; Зайков, 2006; Симонов и др., 2006) с изменениями.

1 – медно-цинково-колчеданные руды; 2 – риолитовые и дацитовые лавы, гиалокластиты; 3 – базальтовые лавы, вулканомиктовые отложения, алевролиты; 4 – серицит-кварцевые метасоматиты; 5 – биостромы; 6 – разломы; 7 – борта карьера.

Fig. 2. Schematic geological structure in the open-pit of the Yaman-Kasy deposit, modified after (Zaikov et al., 1995; Zaikov, 2006; Simonov et al., 2006).

1 – Cu–Zn massive sulfide ores; 2 – rhyolitic and dacitic lava, hyaloclastite; 3 – basaltic lava, volcanomictic rocks, siltstone; 4 – sericite-quartz metasomatite; 5 – biostrome; 6 – faults; 7 – contours of the open pit.



толща представлена дацитами, андезитами и серицит-кварцевыми метасоматитами. Широко развиты пострудные дайки риолитов и дацитов (рис. 3). Исследования образцов из скважин показали, что породы кислого состава существенно изменены. В связи с этим, наиболее достоверные результаты по расплавленным включениям удалось получить только для кварц-полевошпатового порфира из первого надрудного интервала, выполненного дацитами и риолитами с сульфидизированными участками.

Николаевское месторождение находится в пределах Прииртышского рудного района и локализуется на вершине и склонах риолит-дацитового экструзивного купола гериховской свиты (живетфран) (рис. 4) (Наумов, 1975; Барышев и др., 1976;

Дергачев и др., 1989). На месторождении были найдены фрагменты сульфидных труб, свидетельствующих о том, что формирование колчеданных руд происходило в ходе развития гидротермальных систем типа современных «черных курильщиков» (Масленников и др., 2007; Масленников, Симонов, 2012). Нами детально изучены образцы мелкозернистых кварцевых порфиров, отобранные из интрузивного тела мощностью 5–10 м, находящегося на дне карьера непосредственно рядом с сульфидными рудами. По этим характеристикам рассмотренные породы наиболее близки к «липаритовым» порфирам сопки Памятник, к которым приурочена рудная залежь Николаевского месторождения (Мергенов, 1987).

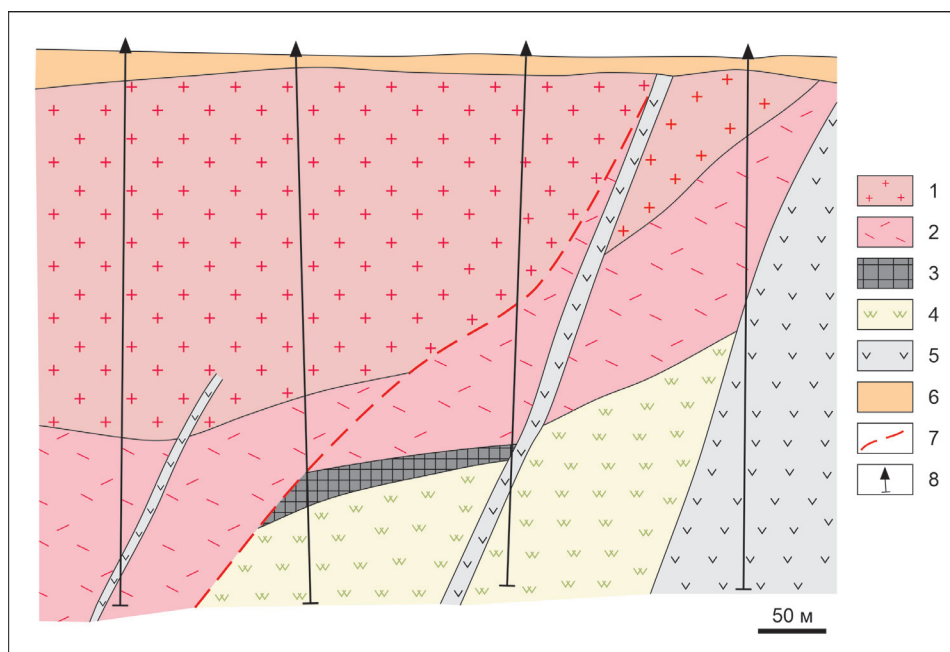


Рис. 3. Геологический разрез Вишневого месторождения, построен на основе схемы В.В. Зайкова.

1 – красноцветные и пестроцветные дацитовые лавы (2-я надрудная толща); 2 – дациты и риолиты с гиалокластитами (1-я надрудная толща); 3 – рудный интервал; 4 – дациты, андезиты, серицит-кварцевые метасоматиты (подрудная толща); 5 – пострудные дайки риолитов и дацитов; 6 – современные осадочные отложения; 7 – разломы; 8 – скважины.

Fig. 3. Geological cross-section of the Vishnevskoe deposit, composed on the basis of scheme of V.V. Zaykov.

1 – red and variegated dacite lava (second hanging-wall stratum); 2 – dacite and rhyolite with hyaloclastite (first hanging-wall stratum); 3 – ore interval; 4 – dacite, andesite, sericite-quartz metasomatites (footwall stratum); 5 – post-ore dikes of rhyolite and dacite; 6 – Quaternary sediments; 7 – faults; 8 – boreholes.

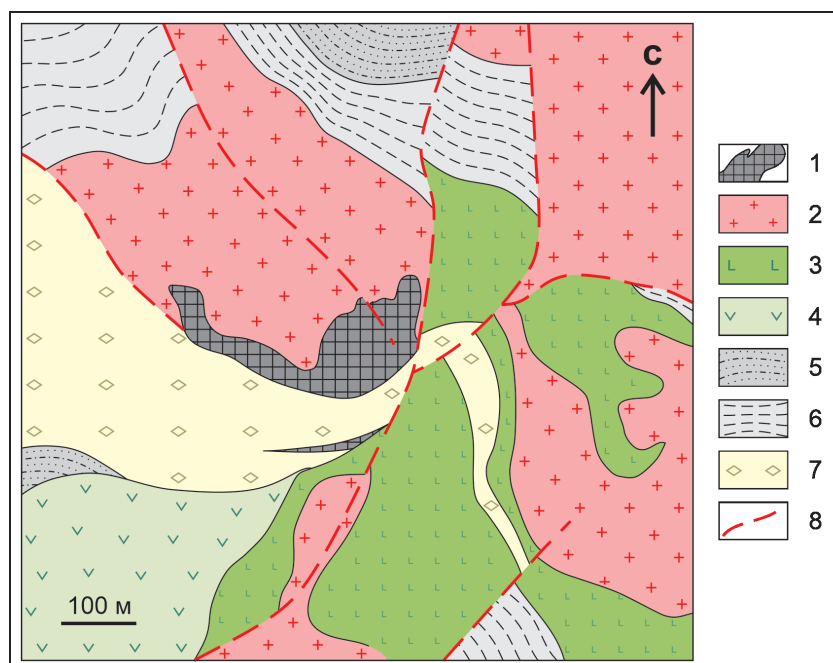


Рис. 4. Схема геологического строения месторождения Николаевское, по (Дергачев и др., 1989) с изменениями.

1 – колчеданно-полиметаллические руды; 2 – риолиты, лавобрекчии риолитов; 3 – базальты; 4 – туфы; 5 – туфогравеллиты, туфопесчаники; 6 – алевролиты; 7 – оползневые брекчии; 8 – разломы.

Fig. 4. Schematic geological structure of the Nikolaevskoe deposit, modified after (Dergachev et al., 1989).

1 – massive sulfide polymetallic ores; 2 – rhyolite, rhyolitic lava breccias; 3 – basalt; 4 – tuff; 5 – tuff gravelite, tuff sandstone; 6 – siltstone; 7 – landslide breccias; 8 – faults.

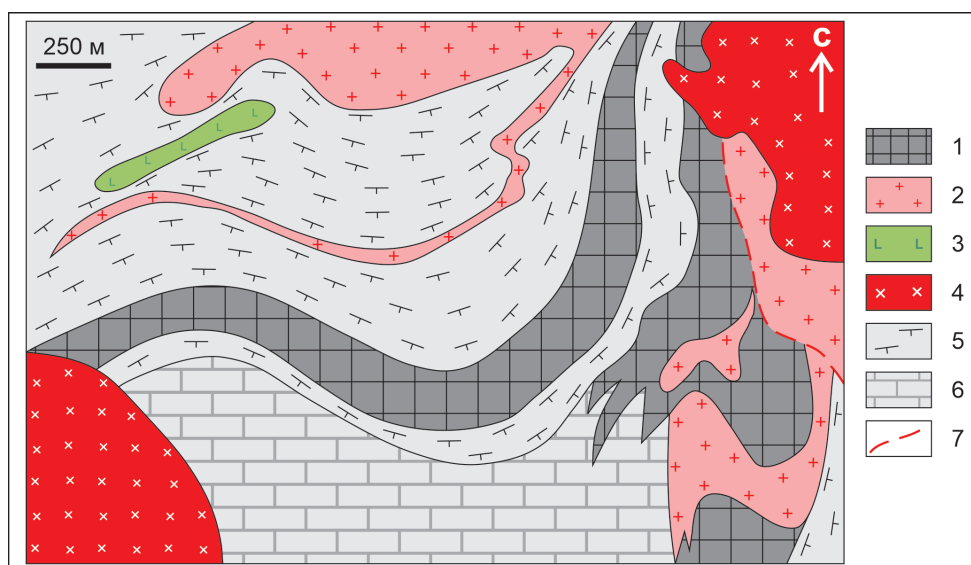


Рис. 5. Схема геологического строения месторождения Юбилейное, по (Гаськов и др., 1991) с изменениями.

1 – рудовмещающие алевролиты, песчаники; 2 – рудоносные риолит-дацитовые порфиры, туфы и лавы кислого состава; 3 – андезитовые порфиры; 4 – граниты; 5 – туфопесчаники; 6 – известняки; 7 – разломы.

Fig. 5. Schematic geological structure of the Yubileinoe deposit, modified after (Gaskov et al., 1991).

1 – ore-bearing siltstone, sandstone; 2 – ore-bearing porphyritic rhyolite-dacite, felsic tuff and lava; 3 – porphyritic andesite; 4 – granite; 5 – tuffaceous sandstone; 6 – limestone; 7 – faults.

Месторождение Юбилейное входит в состав Золотушинского рудного района на северо-западе Рудно-Алтайского полиметаллического пояса, который развит в пределах одноименной палеоостроводужной области. Оруденение генетически связано с многоактным вулканизмом контрастной базальт-риолитовой формации средневерхнедевонского возраста. Вулканогенные образования представлены лавами и туфами кислого состава, развитыми в низах разреза месторождения и субвулканическими телами риолитовых и риолит-дацитовых порфиров (рис. 5). Среди последних выделяются субогласные тела риолитовых порфиров, генетически и пространственно ассоциирующие с колчеданно-полиметаллическим оруденением, и субвулканические риолит-дациновые и дациновые силлы, проявившиеся в пострудный период (Гаськов и др., 1999, 2006). В пределах месторождения Юбилейное выделяются разновозрастные кварцосодержащие вулканогенные образования: лавовые потоки живетского возраста (дорудные), франские субвулканические тела риолитовых порфиров (рудонесные) и субвулканические риолит-дациновые порфиры фаменского возраста (пострудные).

Салаирское рудное поле локализовано в пределах небольшой линзы (4×1.5 км) интенсивно рассланцованных и метаморфизованных вулканогенно-осадочных пород нижнекембрийского воз-

раста. Магматические комплексы представлены субвулканическими телами микропорфиров и полевошпатовых порфиров, гипабиссальной интрузией мелко- и крупнопорфировых кварцевых порфиров, а также дайками диабазов и диабазовых порфиров (рис. 6) (Лапухов, 1975; Лапухов и др., 2001). По мнению некоторых авторов (Поспелов, Лапухов, 1971), с кислыми расплавами связано формирование и развитие систем, образующих салаирские барит-полиметаллические месторождения, рудные тела которых пространственно приурочены к зонам субвулканических тел кварцевых порфиров. Имеющиеся материалы по составам магматических пород свидетельствуют о том, что часть магматических комплексов Салаирского рудного поля формировалась в условиях задугового бассейна. Скорее всего, фиксируются начальные стадии развития бассейна в тылу островной дуги (Лапухов и др., 2001).

Кызыл-Таптыгское месторождение в Восточной Туве располагается среди нижнекембрийских вулканогенных пород, представленных, преимущественно, базальтами с подчиненными дацитами, перемежающимися с базальтовыми и андезибазальтовыми порфиритами, андезитами, туфами и сланцами (рис. 7) (Зайков, 2006). Рудоносные серии представлены двумя толщами: нижней, сложенной базальтами с горизонтами и пачками вул-

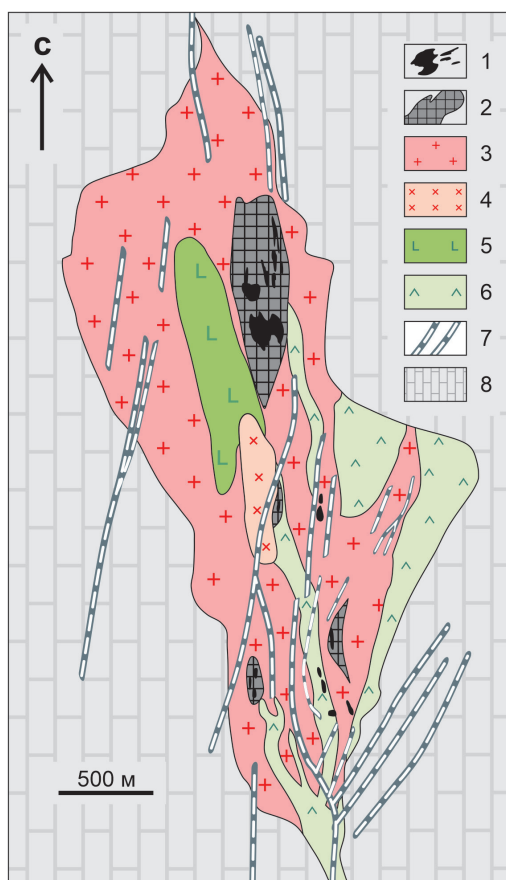


Рис. 6. Схема геологического строения Салаирского рудного поля, по (Лапухов и др., 2001) с изменениями.

1 – сплошные сульфидно-баритовые руды; 2 – вкрапленные руды; 3 – кварцевые порфиры; 4 – микропорфиры; 5 – полевошпатовые порфиры; 6 – метаморфизованные туфогенно-осадочные породы; 7 – дайки диабазов; 8 – известняки.

Fig. 6. Schematic geological structure of the Salair ore field, modified after (Lapukhov et al., 2001).

1 – massive sulfide-barite ores; 2 – disseminated ores; 3 – quartz porphyry rocks; 4 – microporphyrific rocks; 5 – feldspar porphyry rocks; 6 – metamorphosed tuffaceous-sedimentary rocks; 7 – diabase dikes; 8 – limestone.

канокластических брекчий, и верхней сложного состава с базальтами, андезибазальтами, дацитами, риолитами, вулканомиктовыми брекчиями и туфами (Берман, 1960; Кузечный и др., 1990, 2001; Зайков, 2006; Гасков, 2020; Кузнецов и др., 2020; Herrington et al., 1999). Присутствуют прослои и холмообразные постройки гематит-кварцевых и карбонатно-гематит-кварцевых пород (Зайков, 2006). Палеогидротермальное поле с промышленными колчеданно-полиметаллическими рудами находится в низах разреза верхней толщи. Рудоподводящая часть гидротермальной системы, сложенная серицит-кварцевыми метасоматитами с сульфидными и баритовыми жилами, локализована преимущественно в нижней толще. Геологические данные свидетельствуют о тесной связи базальт-риолитового магматизма и сульфидных руд не только пространственно, но и генетически. Проведенные ранее исследования (Симонов и др., 1999) говорят о формировании Кызыл-Таштыгского месторождения в палеогеодинамических условиях сложной системы, состоявшей из островной дуги и развивающегося задугового бассейна.

Расплавные включения в кварце из эффузивов колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области

Детальные исследования образцов из базальт-риолитовых комплексов рассмотренных колчеданных месторождений позволили охарактеризовать расплавные включения в кварце из риолитов, риолитовых порфиров, андезитов, кварцевых и кварц-полевошпатовых порфиров. Различные виды расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области показаны на рисунке 8. Первоначально (до высокотемпературных опытов) включения обычно заполнены темной микрозернистой массой (рис. 8.1, 8.3). Рядом с микрозернистыми включениями могут присутствовать природно закаленные включения, содержащие, главным образом, светлое стекло (рис. 8.5). В ходе высокотемпературных экспериментов в микротермокамере содержимое многофазных включений переплавляется с образованием гомогенного расплава. При последующей закалке даже полностью гомогенных включений в них появляется газовый пузырек, четко видимый в светлом стекле (рис. 8.2, 8.4, 8.6).

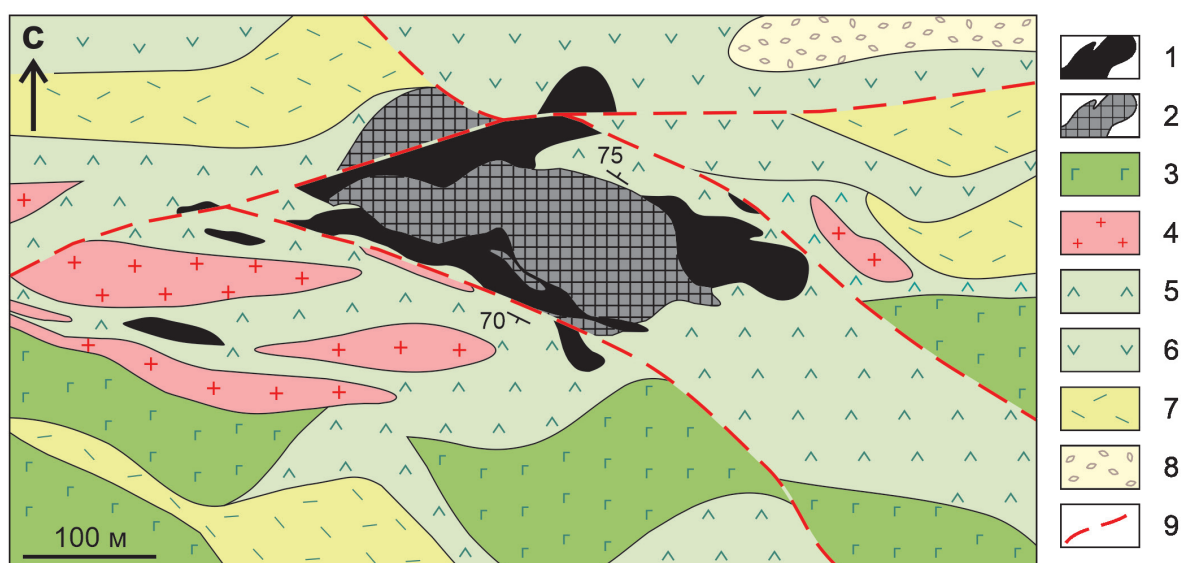


Рис. 7. Схема геологического строения месторождения Кызыл-Таштыг, по (Кузевный и др., 2001; Зайков, 2006; Лебедев, 2012; Гаськов, 2020) с изменениями.

1 – полиметаллические руды; 2 – серноколчеданные руды; 3 – базальты, диабазы; 4 – дациты, риолиты; 5 – рудовмещающие базальтовые и андезибазальтовые порфиры, дацит-риолитовые порфиры, туффиты, сланцы; 6 – андезибазальты; 7 – кислые и основные лавы и туффиты, песчаники, алевролиты, известняки; 8 – пески, галечники; 9 – тектонические разломы.

Fig. 7. Schematic geological structure of the Kyzyl-Tashtyg deposit, modified after (Kuzebny et al., 2001; Zaykov, 2006; Lebedev, 2012; Gaskov, 2020).

1 – polymetallic ores; 2 – massive sulfide ores; 3 – basalt, diabase; 4 – dacite, rhyolite; 5 – ore-bearing basaltic and porphyritic basaltic andesite, porphyritic dacite-rhyolite, tuffite, shale; 6 – basaltic andesite; 7 – felsic and mafic lava, tuffite, sandstone, siltstone, limestone; 8 – sands, pebbles; 9 – faults.

Яман-Касинское месторождение. В кристаллах кварца из риолитов месторождения найдены равномерно располагающиеся первичные расплавные включения размером 10–75 мкм. Формы включений в основном округлые, часто с гексагональной огранкой. Они обычно содержат множество мелких коричневатых раскристаллизованных фаз, среди которых располагаются более крупные газовые пузырьки. Реже наблюдаются разности со светлым стеклом. При нагреве в термокамере включения становятся полностью гомогенными при температурах 910–945 °С. Эти значения существенно ниже таковых для расплавных включений в кварце из кислых магматических пород колчеданных месторождений Сибири (Симонов и др., 1999, 2000, 2005).

Вишневское месторождение. В кварце из кварц-полевошпатовых порфиров найдены первичные расплавные включения размером 10–45 мкм, равномерно располагающиеся в центре вкрапленника и по зонам роста кристалла. Форма включений в основном округлая, часто с гексагональной огранкой. Включения многофазные: множество

мелких темных и светлых раскристаллизованных фаз + светлое стекло по краям включений. При нагреве в микротермокамере включения гомогенизируются при температурах 1180–1190 °С, что близко к данным по расплавным включениям в кварце из рудоносных порфиров Юбилейного колчеданного месторождения (1050–1180 °С) (Симонов и др., 2005; Simonov et al., 2010) и существенно выше температур для Яман-Касинского месторождения (910–945 °С) (Симонов и др., 2006).

Николаевское месторождение. Во вкрапленниках кварца, расположенных в мелко-среднезернистой кварц-полевошпатовой основной массе кварцевого порфира, найдены первичные расплавные включения (от 10–50 до 200 мкм), располагающиеся равномерно в объеме кристалла. Включения преимущественно округлые, четырехугольные или шестигранные. По внутреннему содержанию можно выделить три типа включений, часто находящихся совместно в одной зоне. Преобладают однофазные включения, выполненные чистым гомогенным стеклом. Часть включений содержит в стекле газовый пузырек с рудными микрокристаллами на

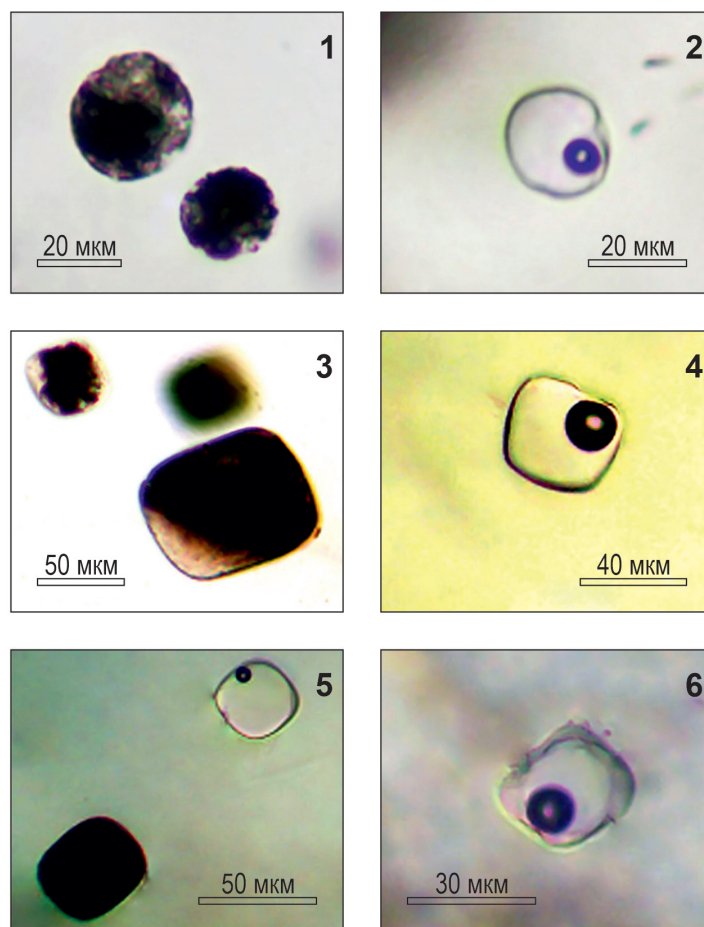


Рис. 8. Представительные виды расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

8.1–8.6 – расплавные включения до (8.1, 8.3, 8.5) и после (8.2, 8.4, 8.6) высокотемпературных экспериментов и закалки; 8.1, 8.2 – Вишневское месторождение; 8.3–8.6 – месторождения Юбилейное (8.3, 8.4) и Николаевское (8.5, 8.6).

Fig. 8. Representative types of melt inclusions in quartz from effusive rocks of the Urals and Altai-Sayany region.

8.1–8.6 – melt inclusions before (8.1, 8.3, 8.5) and after (8.2, 8.4, 8.6) high-temperature experiments and quenching; 8.1, 8.2 – Vishnevskoe deposit; 8.3–8.6 – Yubileinoe (8.3, 8.4) and Nikolaevskoe (8.5, 8.6) deposits.

поверхности, а также округло-ограниченные рудные фазы и удлиненные светлые кристаллиты. Третий тип включений содержит множество мелких темных фаз и стекло. В ходе высокотемпературных экспериментов в микротермокамере большинство расплавных включений разгерметизировались, что свидетельствует о значительном флюидном давлении. Температуры гомогенизации сохранившихся включений составляли около 1080 °С, что близко к температурам гомогенизации расплавных включений в кварце порфиров сопки Памятник, непосредственно ассоциирующих с рудной залежью Николаевского месторождения – до 1000–1090 °С (Мергенов, 1987).

Месторождение Юбилейное. Первичные расплавные включения (8–30, до 60 мкм) располагаются по зонам роста в кварце дорудных, рудоносных и пострудных риолитовых порфиров. Присутствуют два типа включений: заполненные микрозернистой массой и содержащие светлое гомогенное стекло с газовым пузырьком. В ходе высокотемпературных экспериментов установлены следующие температуры гомогенизации: 1050–1180 °С (рудоносные порфиры) и 1050–1170 °С (пострудные порфиры). В случае дорудных порфиров определены аномально высокие температуры гомогенизации (около 1200 °С), что наиболее вероятно связано с разгерметизацией этих включений (Simonov et al., 2010).

Салаирское рудное поле. Во вкрапленниках кварца из порфиров содержатся первичные расплавные включения размером 10–60 мкм. Форма включений округлая, часто с отрицательной огранкой. Включения обычно содержат множество мелких коричневатых раскристаллизованных фаз, среди которых располагаются более крупные газовые пузырьки. Реже наблюдаются включения заполненные стекловатой или слабо раскристаллизованной массой. При нагреве в микротермокамере, начиная от 500–600 °С, содержимое включений темнеет. Полная гомогенизация с растворением в расплаве последнего пузырька устанавливается в диапазоне 1050–1165 °С.

Кызыл-Таштыгское месторождение. Расплавные включения изучены в кварце дорудных риолитов и андезитов. Первичные включения размером 10–50 мкм располагаются в центральных частях кварцевых вкрапленников и содержат множество мелких и темных фаз. После высокотемпературных экспериментов и закалки во включениях наблюдается светлое стекло с мелким газовым пузырьком. Температуры гомогенизации включений в кварце из риолитов выше (1160–1180 °С), чем в андезитах (910–1150 °С).

Состав расплавных включения в кварце из эффузивов колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской складчатой области

Анализ гомогенных стекол расплавных включений в кварце позволил выяснить не только состав петрохимических компонентов кислых магматических систем, связанных с формированием колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области, но и выяснить особенности распределения редких, редкоземельных элементов, рудных компонентов и воды в этих расплавах (табл. 1, 2).

Петрогенные компоненты. По химическому составу расплавные включения в кварце из эффузивов в подавляющем большинстве случаев соответствуют риодацитам и риолитам нормальной щелочности. Минимальное количество щелочей ($K_2O + Na_2O$ 2.1–4.8 мас. %) характерно для древних (кембрийских) расплавов (Кызыл-Таштыгское месторождение и Салаирское рудное поле на юге Сибири), а максимальное (с широким диапазоном суммы щелочей от 2.2 до 8 мас. %, в единичных случаях до 9 мас. %) – для наиболее молодых (девонских) месторождений в Рудном Алтае – Юбилейное в Сибири. Для промежуточных по возрасту

(силур–девон) месторождений Урала установлен также промежуточный характер магматизма. Он выражен двумя трендами эволюции расплавов с уменьшением содержаний щелочей на фоне роста содержаний SiO_2 . Один тренд, характерный для Яман-Касинского месторождения с суммой щелочей 3.0–3.6 мас. %, совпадает с данными по кембрийским системам и минимальными значениями для девонских. Другой тренд, типичный для Вишневого месторождения с суммой щелочей 7.4–4.7 мас. %, тяготеет к максимальным данным для девонских расплавов (рис. 9).

По соотношению $FeO/MgO-SiO_2$ (критерий А. Мияширо) подавляющее большинство точек составов расплавных включений в кварце располагается в поле толеитовой серии. Все данные разбиваются на две группы по значениям FeO/MgO : 5–14 и 15–26. Особенно четко это заметно для включений в кварце Кызыл-Таштыгского месторождения. В случае девонских месторождений повышенной железистостью обладают только риодацитовые (содержание SiO_2 до 74–75 мас. %) расплавы. Эволюция кислых расплавов Урала происходила с увеличением железистости на фоне накопления SiO_2 в отличие от магм Алтае-Саянской области, для которых значения FeO/MgO падают на фоне роста содержаний SiO_2 (рис. 9).

Для включений в кварце месторождений Алтае-Саянской области характерны вариации отношения K_2O / Na_2O в диапазоне 0.4–2.4, соответствующие K-Na сериям. Включения в кварце месторождений Урала обладают гораздо более низкими значениями K_2O/Na_2O (0.15–0.44) и располагаются на границе между K-Na и Na сериями.

На вариационных диаграммах содержания петрогенных компонентов (TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O) падают на фоне роста содержаний SiO_2 во включениях в кварце независимо от возраста и местоположения месторождений (рис. 10, 11). Это хорошо видно на примере Al_2O_3 , количество которого отчетливо уменьшается от 17 до 8 мас. % при накоплении SiO_2 , что свидетельствует о фракционировании плагиоклазов с образованием вкрапленников в ходе дифференциации расплавов (рис. 10).

Показывая единообразные направления трендов фракционирования на вариационных диаграммах, расплавные включения в кварце из различных месторождений обладают некоторыми особенностями поведения отдельных химических компонентов. Обращает на себя внимание контрастное

Таблица 1

Представительные анализы (мас. %) гомогенных стекол расплавных включений в кварце из эффузивных пород колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области

Table 1

Representative analyses (wt. %) of homogenous glasses of melt inclusions in quartz from effusive rocks of massive sulfide deposits of the Urals and Altai-Sayany region

№ п/п	№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Сумма
1	1	74.52	0.25	10.91	2.89	0.09	0.14	2.36	2.21	0.79	0.06	0.20	94.41
2	5	78.82	0.20	9.77	2.37	0.07	0.10	1.76	2.52	0.78	0.05	0.16	96.61
3	6	79.65	0.13	9.34	2.28	0.07	0.11	1.65	2.39	0.80	0.05	0.16	96.63
4	7	79.41	0.16	9.47	2.31	0.09	0.11	1.70	2.19	0.82	0.06	0.18	96.49
5	8	76.28	0.21	10.13	2.79	0.09	0.13	2.12	2.53	0.81	0.07	0.17	95.33
6	10	75.69	0.19	10.83	2.63	0.10	0.12	2.14	2.32	0.85	0.07	0.18	95.12
7	12	71.81	0.20	12.23	3.19	0.12	0.21	2.60	2.68	0.91	0.06	0.19	94.20
8	13	71.83	0.24	12.20	3.22	0.09	0.19	2.53	2.58	0.87	0.08	0.22	94.05
9	14	76.75	0.15	9.92	2.65	0.09	0.12	1.94	2.48	0.74	0.05	0.16	95.06
10	15	75.95	0.17	10.31	2.65	0.12	0.13	2.10	2.67	0.74	0.08	0.18	95.09
11	17	76.54	0.21	10.15	2.75	0.10	0.16	1.98	2.46	0.78	0.04	0.18	95.35
12	19	76.45	0.13	9.87	2.62	0.09	0.14	1.97	2.22	0.77	0.07	0.15	94.48
13	63	78.34	0.19	10.80	1.00	н.а.	0.17	1.74	4.31	1.04	0.01	0.11	97.71
14	64	77.08	0.16	11.68	1.02	н.а.	0.17	1.90	4.50	1.06	0.04	0.13	97.74
15	65	79.37	0.22	9.91	0.87	н.а.	0.15	1.46	4.73	1.08	0.04	0.07	97.90
16	68	72.39	0.10	15.25	1.12	н.а.	0.18	3.12	5.69	1.14	0.03	0.05	99.07
17	69	71.41	0.26	15.45	1.16	н.а.	0.19	3.16	5.71	1.15	н.о.	0.06	98.55
18	71	72.71	0.17	13.98	1.29	н.а.	0.26	2.45	5.99	1.30	0.04	0.05	98.24
19	72	70.65	0.10	14.60	1.36	н.а.	0.26	2.73	6.15	1.21	0.08	0.05	97.19
20	75	76.61	0.19	12.53	1.39	н.а.	0.23	2.20	4.01	1.24	0.01	0.08	98.49
21	76	78.97	0.14	11.45	1.32	н.а.	0.18	1.88	3.69	1.24	0.05	0.07	98.99
22	77	77.85	0.24	12.36	1.37	н.а.	0.19	1.96	3.47	1.27	0.01	0.09	98.81
23	80	79.80	0.12	9.45	1.11	н.а.	0.17	1.52	4.64	1.13	0.04	0.06	98.04
24	7/28	70.95	0.09	13.76	1.90	0.10	0.11	0.99	4.53	1.87	н.а.	н.а.	94.30
25	7/29	77.08	0.04	11.51	1.82	0.07	0.07	0.75	3.03	1.79	н.а.	н.а.	96.16
26	8/30	73.68	0.14	12.33	2.45	0.10	0.11	1.13	2.59	1.80	н.а.	н.а.	94.33
27	8/31	75.32	0.06	11.63	2.38	0.10	0.09	0.96	2.74	1.77	н.а.	н.а.	95.05
28	8/41	76.31	0.19	11.17	2.37	0.10	0.09	0.96	2.32	1.62	н.а.	н.а.	95.13
29	11/39	73.01	0.15	14.52	3.52	0.09	0.12	1.79	1.85	1.93	н.а.	н.а.	96.98
30	12/34	73.70	0.06	12.33	2.43	0.08	0.12	1.48	3.21	1.59	н.а.	н.а.	95.00
31	12/43	72.76	0.07	13.26	2.50	0.12	0.13	1.70	2.62	1.68	н.а.	н.а.	94.84
32	3	76.03	0.11	12.20	2.03	0.13	0.11	1.50	2.35	1.69	н.о.	0.45	96.59
33	7	77.94	0.08	11.29	2.10	0.11	0.08	1.33	1.85	1.69	н.о.	0.43	96.90
34	8	78.57	0.57	9.39	1.93	0.13	0.08	1.07	1.28	1.52	0.02	0.33	94.90
35	12	82.43	0.10	9.36	1.58	0.10	0.08	1.31	1.74	1.66	0.03	0.30	98.69
36	16	79.98	0.24	11.06	1.86	0.13	0.09	1.41	2.05	1.61	0.01	0.44	98.88
37	1	71.81	0.16	14.75	1.95	н.а.	0.20	2.02	1.72	2.10	н.а.	0.45	95.16
38	2	73.07	0.18	14.18	1.87	н.а.	0.17	1.94	1.28	2.07	н.а.	0.42	95.18
39	3	74.15	0.22	13.40	1.78	н.а.	0.16	1.71	1.35	2.08	н.а.	0.39	95.24
40	6	80.78	0.17	10.36	1.21	н.а.	0.19	0.62	0.89	1.69	н.а.	0.34	96.24
41	7	78.48	0.25	10.08	1.43	н.а.	0.14	1.34	1.38	2.01	н.а.	0.22	95.32
42	8	79.06	0.18	9.97	1.35	н.а.	0.12	1.29	1.31	1.99	н.а.	0.19	95.46
43	10	79.85	0.18	9.89	1.27	н.а.	0.13	1.30	1.57	2.66	н.а.	0.28	97.13
44	14	76.67	0.18	11.56	1.54	н.а.	0.21	0.64	1.22	2.04	н.а.	0.31	94.37
45	15	75.78	0.16	12.46	1.56	н.а.	0.22	0.76	1.22	2.01	н.а.	0.29	94.45
46	16	77.24	0.21	11.17	1.45	н.а.	0.36	0.59	1.50	2.13	н.а.	0.05	94.70

№ п/п	№ ан.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Cl	Сумма
47	20	78.15	0.25	12.19	1.35	н.а.	0.24	0.99	1.74	2.81	н.а.	0.11	97.82
48	2	70.63	0.04	16.92	1.83	0.11	0.14	0.57	2.08	1.86	н.о.	н.о.	94.18
49	11	75.29	0.02	14.23	1.51	0.13	0.14	0.61	2.08	1.73	0.01	н.о.	95.74
50	14	75.68	0.10	14.95	1.50	0.09	0.13	0.45	2.63	1.08	н.о.	н.о.	96.60
51	16	77.28	н.о.	14.44	1.41	0.12	0.14	0.51	2.49	1.67	н.о.	0.01	98.07
52	20	80.21	0.04	11.83	0.91	0.05	0.12	0.37	2.29	1.40	н.о.	н.о.	97.22
53	3	71.69	0.08	15.34	1.53	0.09	0.15	0.80	2.72	3.13	0.02	0.17	95.72
54	4	77.49	0.14	10.79	0.94	н.о.	0.11	0.94	2.09	2.89	н.а.	н.а.	95.38
55	12	75.50	0.13	11.27	0.97	0.03	0.12	1.02	3.11	3.21	н.а.	н.а.	95.35
56	20	78.53	0.15	10.59	0.97	0.02	0.12	0.95	2.21	2.89	н.а.	н.а.	96.42
57	8	78.23	0.15	10.57	1.02	0.05	0.12	0.86	1.65	3.08	н.о.	0.18	95.91
58	12	77.16	0.19	11.92	1.04	0.02	0.14	1.19	2.28	3.09	н.о.	0.20	97.23
59	16	77.68	0.38	11.24	0.91	0.03	0.11	0.76	2.02	3.13	н.о.	0.22	96.47
60	21	77.68	0.13	11.13	1.07	0.05	0.12	0.88	1.66	3.08	н.о.	0.21	96.01
61	26	73.81	0.14	13.97	1.15	0.06	0.09	0.98	4.98	3.45	н.а.	н.а.	98.63
62	31	71.88	0.27	13.66	1.46	0.07	0.15	1.92	5.19	2.38	н.а.	н.а.	96.98
63	33	74.50	0.12	14.37	1.15	0.05	0.06	0.87	3.66	3.87	н.а.	н.а.	98.64
64	36	71.34	0.11	14.52	1.49	0.02	0.05	0.53	5.20	3.54	н.а.	н.а.	96.79
65	38	70.46	0.32	14.59	2.03	0.13	0.17	1.79	5.18	2.95	н.а.	н.а.	97.61
66	40	73.06	0.12	14.26	1.27	0.07	0.08	0.88	5.16	3.81	н.а.	н.а.	98.71
67	6/4	75.60	0.24	13.38	3.01	0.11	0.30	2.73	0.90	1.96	н.а.	н.а.	98.22
68	6/5	73.51	0.26	13.94	3.10	0.11	0.31	2.92	0.73	2.07	н.а.	н.а.	96.95
69	5/12	77.59	0.15	10.06	2.08	0.07	0.22	1.93	0.83	1.22	н.а.	н.а.	94.14
70	5/15	73.83	0.21	12.46	2.59	0.09	0.36	2.11	1.11	1.36	н.а.	н.а.	94.12
71	5/16	74.71	0.21	11.96	2.52	0.08	0.32	1.87	1.00	1.35	н.а.	н.а.	94.02
72	4/18	78.04	0.09	10.80	2.00	0.08	0.19	1.90	0.99	1.24	н.а.	н.а.	95.33
73	4/19	77.19	0.11	11.25	2.05	0.08	0.22	1.94	0.97	1.25	н.а.	н.а.	95.06
74	3/24	76.79	0.16	12.06	2.18	0.08	0.25	2.18	1.08	1.26	н.а.	н.а.	96.04
75	3/25	75.72	0.26	12.52	2.31	0.10	0.26	2.40	1.37	1.27	н.а.	н.а.	96.20
76	3/26	77.72	0.13	11.77	2.11	0.08	0.23	2.10	1.12	1.24	н.а.	н.а.	96.50
77	24	73.35	0.18	11.80	2.06	н.а.	0.12	1.43	3.41	1.80	0.02	0.13	94.29
78	28	73.03	0.38	11.28	2.51	н.а.	0.32	2.32	2.78	1.27	0.04	0.07	94.00
79	39	74.66	0.09	11.62	1.92	н.а.	0.12	1.31	3.06	1.27	0.01	0.15	94.21
80	43	73.55	0.24	11.57	1.94	н.а.	0.09	1.26	3.49	1.84	0.01	0.13	94.11
81	45	74.28	0.14	11.32	1.87	н.а.	0.09	1.19	3.42	1.80	н.о.	0.15	94.26
82	47	74.28	0.15	11.39	2.00	н.а.	0.09	1.18	3.06	1.81	0.01	0.17	94.13
83	48	74.14	0.13	11.32	1.91	н.а.	0.09	1.13	3.33	1.85	0.04	0.17	94.11
84	53	78.67	0.11	9.93	1.69	н.а.	0.12	1.05	2.98	1.13	0.03	0.13	95.85
85	54	78.21	0.16	10.36	1.74	н.а.	0.14	1.18	3.17	1.13	н.о.	0.14	96.22
86	55	78.66	0.18	10.45	1.60	н.а.	0.12	1.13	3.11	1.14	0.02	0.11	96.52
87	56	78.43	0.17	10.16	1.78	н.а.	0.13	1.17	3.04	1.15	0.03	0.13	96.18
88	57	77.88	0.08	11.22	1.81	н.а.	0.14	1.31	2.95	1.14	0.02	0.15	96.70

Примечание. Включения в кварце из эффузивных пород колчеданных месторождений: Яман-Касинское (1–12), Вишневское (13–23), Кызыл-Таштыгское (24–47), Юбилейное (48–66), Салаирское рудное поле (67–76), Николаевское (77–88). Здесь и в табл. 2, н.а. – не анализировалось; н.о. – ниже предела обнаружения.

Note. Inclusions in quartz from effusive rocks of massive sulfide deposits: Yaman-Kasy (1–12), Vishnevskoe (13–23), Kyzyl-Tashtyg (24–47), Yubileinoe (48–66), Salair ore field (67–76), Nikolaevskoe (77–88). Here and in Table 2, н.а. – not analyzed; н.о. – below detection limit.

распределение FeO в кислых расплавах Урала с максимальными содержаниями для Яман-Касинского месторождения (3.2 мас. %) и минимумом – для Вишневского (0.9 мас. %), между которыми

располагаются точки составов древних (кембрийских) расплавов. В целом наименьшее количество железа характерно для молодых (девонских) расплавов (рис. 10).

Таблица 2

Представительные содержания редких, редкоземельных элементов, рудных компонентов (г/т) и воды (мас. %) в гомогенных стеклах расплавных включений в кварце из эффузивных пород колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области

Table 2

Representative contents of trace, rare earth elements and ore components (ppm) and H₂O (wt. %) in homogenous glasses of melt inclusions in quartz from effusive rocks of massive sulfide deposits of the Urals and Altai-Sayany region

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
№ ан.	Q2 1	VA8	Q3 1	VA9	VA10	Q4 1	Q4 2	Q6 1	VA11	N14	N15	N16	933
Ba	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	140	309	297	149
Rb	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	13.0	21.0	21.0	13.0
Th	н.а.	0.83	н.а.	0.81	0.79	н.а.	н.а.	н.а.	0.81	0.95	1.22	1.67	1.94
Sr	85.0	117	104	106	111	97.0	100	60.0	100	61.0	144	107	69.0
V	3.60	5.70	4.80	5.20	4.00	4.20	4.50	1.80	4.00	5.60	6.90	8.90	4.10
La	3.76	5.60	4.81	4.90	5.35	4.57	4.72	2.81	4.79	4.07	7.24	14.05	4.90
Ce	10.21	13.71	12.49	12.86	14.15	11.91	12.44	7.38	12.78	8.64	15.12	22.33	11.09
Nd	6.39	8.95	7.99	7.76	9.13	7.52	7.71	4.48	7.79	4.07	7.59	9.03	5.48
Sm	1.99	2.59	2.30	2.29	2.80	2.37	2.17	1.37	2.24	1.12	1.72	4.21	1.29
Eu	0.24	0.57	0.34	0.54	0.80	0.29	0.44	0.32	0.55	0.10	0.56	0.42	0.22
Gd	н.а.	2.13	н.а.	2.37	3.59	н.а.	н.а.	н.а.	2.35	0.62	0.88	0.62	1.64
Dy	2.50	3.29	2.86	2.91	3.66	2.83	3.18	1.74	2.77	1.13	1.80	2.00	1.78
Er	1.56	2.95	2.19	2.37	2.78	2.25	2.39	1.43	2.57	1.01	1.61	1.62	1.07
Yb	1.94	3.09	2.08	2.88	3.31	2.18	2.24	1.34	2.58	1.27	2.10	2.08	1.56
Y	17.1	22.4	19.8	19.2	22.2	19.5	19.4	12.0	19.7	8.3	13.4	13.2	11.2
Zr	46.8	62.1	52.5	54.6	64.3	53.3	55.9	32.9	55.4	49.3	73.8	68.3	71.8
Nb	н.а.	2.20	н.а.	1.70	2.10	н.а.	н.а.	н.а.	1.90	1.40	2.50	1.70	3.10
Hf	н.а.	2.60	н.а.	2.27	2.64	н.а.	н.а.	н.а.	2.10	1.53	2.10	2.20	н.а.
Cu	н.а.	42	н.а.	74	43	н.а.	н.а.	н.а.	30	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
Pb	н.а.	1.71	н.а.	1.70	2.10	н.а.	н.а.	н.а.	4.30	8.40	1.70	2.60	0.40
H ₂ O	3.83	2.67	4.84	5.24	2.98	4.71	3.47	2.93	1.94	0.57	0.53	0.25	0.15

№ п/п	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
№ ан.	M17	M18	M19	M20	M21	VA12	VA13	VA14	17 1	18 1
Ba	955	554	940	413	616	н.а.	н.а.	н.а.	213	162
Rb	20.0	19.0	24.0	16.0	21.0	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
Th	0.80	2.10	2.07	0.80	2.13	2.30	1.10	4.20	н.а.	н.а.
Sr	116	57.0	132	81.0	60.0	114	60.0	127	57.0	109
V	5.90	5.20	6.60	3.60	5.20	11.00	4.80	6.90	2.90	7.20
La	1.16	10.85	2.87	0.96	12.94	17.42	7.74	27.56	4.50	7.24
Ce	2.78	23.60	6.79	2.32	27.29	40.57	18.76	60.64	9.81	16.32
Nd	2.52	12.92	4.16	1.59	16.26	22.67	11.27	38.03	5.05	8.78
Sm	0.68	3.24	1.16	0.41	3.87	6.99	3.05	9.34	1.28	2.45
Eu	0.06	0.42	0.09	0.05	0.69	0.71	0.46	1.82	1.21	0.56
Gd	0.82	3.79	1.14	0.45	3.49	8.38	3.63	10.67	н.а.	н.а.
Dy	1.35	4.28	1.96	1.05	4.78	8.72	4.28	13.06	1.69	3.49
Er	1.92	3.40	2.47	1.50	3.74	6.85	3.52	10.01	н.а.	н.а.
Yb	2.66	3.91	3.40	2.06	4.22	7.41	3.63	10.8	1.18	2.39
Y	13.7	30.1	18.2	10.1	35.8	55.3	26.4	80.1	11.8	22.5
Zr	125.0	116.4	143.6	105.8	111.8	192.9	85.7	234.1	44.6	62.9
Nb	7.10	5.20	6.20	4.20	5.10	10.1	3.80	12.40	1.10	4.10
Hf	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	6.49	2.99	9.86	н.а.	н.а.
Cu	3227	2061	1835	975	409	350	1028	325	н.а.	н.а.
Pb	1.50	0.90	0.90	0.70	1.40	3.30	1.20	2.60	н.а.	н.а.
H ₂ O	0.51	0.08	0.48	0.39	0.64	0.87	0.41	0.49	0.99	2.15

№ п/п	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
№ ан.	4/1	4/5	4/6	9/2	9/11	9/12	7	9	12	N10	N11	N12	N13
Ba	701	537	650	564	600	472	557	574	431	328	343	320	261
Rb	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	37.0	40.0	36.0	30.0
Th	11.1	11.0	11.2	10.9	10.2	9.40	10.5	11.9	8.10	5.82	6.34	6.12	4.16
Sr	12.0	10.0	17.0	41.0	41.0	24.0	43.0	32.0	29.0	79.0	65.0	62.0	46.0
V	4.30	5.00	6.40	2.00	4.70	2.40	5.50	4.70	5.20	6.40	4.90	4.70	3.90
La	37.57	29.28	35.07	27.51	22.22	22.7	29.03	31.81	21.33	17.29	18.73	17.96	14.0
Ce	84.91	63.01	75.65	52.74	46.50	46.44	57.98	66.15	47.22	41.02	43.10	41.35	30.35
Nd	40.01	30.62	35.64	21.38	16.57	17.99	31.03	32.97	22.87	20.65	21.52	20.37	15.95
Sm	9.97	7.77	8.41	3.89	3.53	3.81	6.70	7.62	5.10	5.90	6.28	5.81	4.38
Eu	0.76	0.35	1.56	0.46	0.16	0.29	0.77	0.41	0.32	0.63	0.52	0.66	0.55
Gd	11.38	9.40	10.95	4.25	3.21	3.49	6.47	5.89	4.93	0.40	1.75	2.48	0.77
Dy	11.90	10.09	11.40	4.72	3.71	3.88	8.60	8.80	6.13	7.78	8.54	8.20	6.46
Er	9.53	7.90	7.94	3.29	3.25	3.37	5.69	6.22	4.70	6.91	7.27	6.72	5.28
Yb	10.26	8.57	8.03	3.47	3.97	3.88	6.29	6.81	4.85	8.21	8.62	8.07	6.53
Y	75.8	60.9	69.2	32.3	27.4	29.8	58.8	62.8	44.7	50.1	55.7	52.8	40.0
Zr	160.4	162.8	158.6	96.4	88.8	85.3	139.8	143.2	102.2	154.0	160.4	141.9	123.8
Nb	14.0	12.70	14.7	9.30	9.40	9.50	10.40	9.90	7.60	7.80	8.60	8.10	6.20
Hf	7.14	6.72	6.27	н.а.	2.92	3.41	н.а.	н.а.	н.а.	5.91	6.09	5.77	4.59
Cu	844	1059	4067	264	246	361	45	97	25	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
Pb	9.00	7.30	10.50	10.20	7.00	4.90	15.0	15.0	10.0	5.60	6.00	5.10	4.80
H ₂ O	0.65	0.45	0.60	4.30	2.31	3.20	1.84	1.56	0.94	5.48	5.65	4.83	2.36

Примечание. Включения в кварце из эффузивных пород колчеданных месторождений: Яман-Касинское (1–9), Вишневское (10–13), Кызыл-Таштыгское (14–21), Салаирское рудное поле (22–23), Юбилейное (24–32), Николаевское (33–36).

Note. Inclusions in quartz from effusive rocks of massive sulfide deposits: Yaman-Kasy (1–9), Vishnevskoe (10–13), Kyzyl-Tashtyg (14–21), Salair ore field (22–23), Yubileinoe (24–32), Nikolaevskoe (33–36).

Расплавы месторождений Урала обладают максимальными содержаниями CaO по сравнению с магмами Алтае-Саянской области (рис. 10). Для K₂O установлена обратная картина со значительным обогащением (до 3.9 мас. %) расплавов Рудного Алтая при минимальных его содержаниях (до 0.8 мас. %) в магмах Яман-Касинского месторождения (рис. 11).

Отношения K₂O/TiO₂ в стеклах должны быть наиболее близки к исходным глубинным характеристикам магматических систем, т. к. в ходе фракционирования расплавов в них одновременно растут содержания обоих компонентов. Это положение подтверждается данными по включениям в кварце из пород месторождений Урала, в которых значения K₂O/TiO₂ находятся в относительно узком (3–10) диапазоне независимо от количества SiO₂. Минимальные и выдержанные относительно накопления SiO₂ значения K₂O/TiO₂ свидетельствуют о единообразном глубинном источнике кислых магматических систем колчеданных месторождений Урала по сравнению с данными по включениям в кварце из девонских пород Алтае-Саянской области, для которых выделяются три уровня значений

отношения K₂O/TiO₂ (рис. 11). Это говорит о возможности существования более сложной системы глубинных очагов с кислыми магмами для месторождений Рудного Алтая в отличие от Урала.

Рудные компоненты. Большое значение для выяснения источников Cu при формировании колчеданных руд имеет изучение ее поведения в кислых расплавах. Исследования включений в кварце показали, что для рассмотренных месторождений Урала и Алтае-Саянской области рост SiO₂ сопровождается накоплением Cu в расплавах (рис. 12).

В рудообразующих процессах значительную роль играет вода. Одновременный анализ Cu и H₂O в стеклах расплавных включений позволил выявить некоторые особенности взаимоотношений этих компонентов. Минимальные содержания Cu (325 г/т) и H₂O (0.5 мас. %) характерны для Кызыл-Таштыгского месторождения. Затем эволюция идет по двум разным направлениям. В одном случае (месторождения Кызыл-Таштыгское и Юбилейное, соответственно) резко растут содержания Cu (до 4100 г/т) на фоне минимальных значений H₂O (до 0.75 мас. %). Для других расплавов (месторождения Яман-Касинское и Юбилейное) установлена

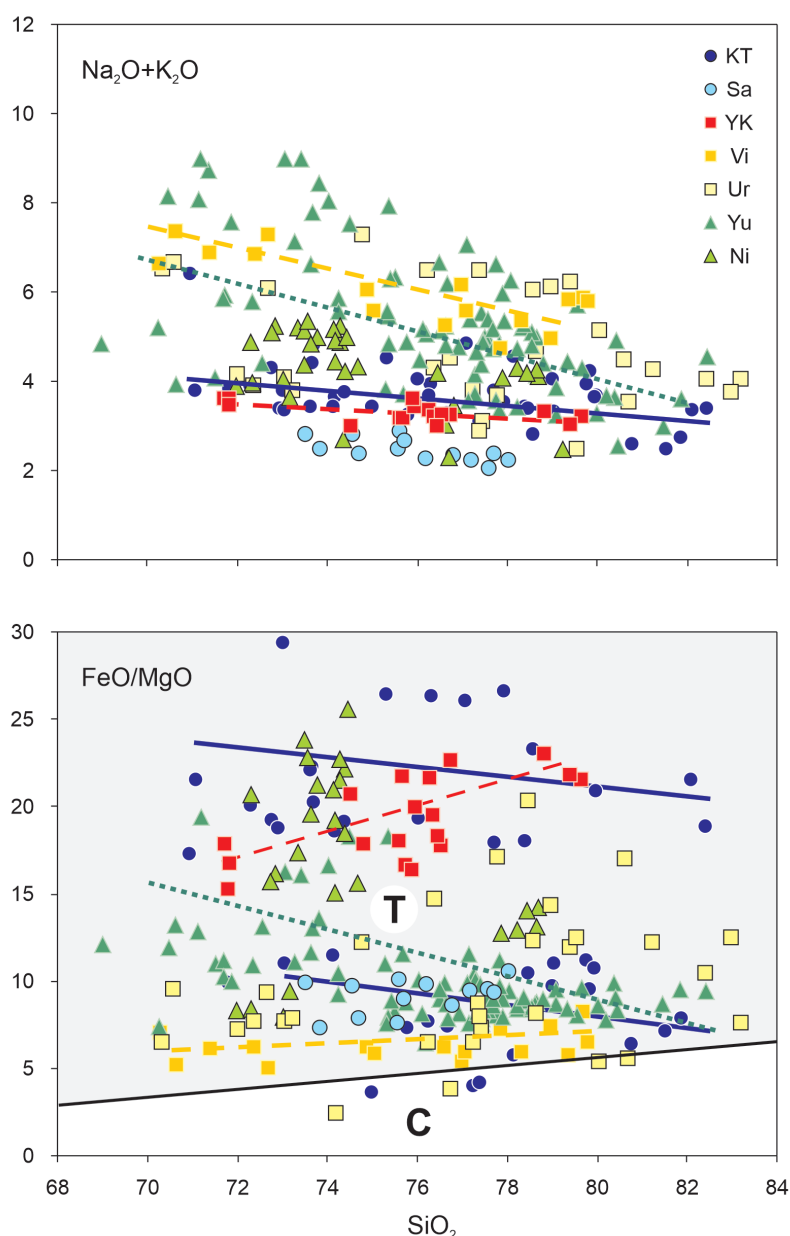


Рис. 9. Зависимость содержания суммы щелочей и железистости (FeO/MgO) от количества SiO_2 (мас. %) в составе расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

Расплавные включения в кварце из кембрийских (Кызыл-Таштыгское – KT, Салаирское рудное поле – Sa), силурийских и девонских (Яман-Касинское – YK, Вишневское – Vi, Верхнеуральский рудный район – Ur), девонских (Юбилейное – Yu, Николаевское – Ni) пород колчеданных месторождений. Серии пород: толеитовая (T) и известково-щелочная (C). Тренды данных по расплавным включениям в кварце из месторождений: Кызыл-Таштыгское (сплошные линии), Яман-Касинское и Вишневское (пунктирные линии), Юбилейное (точечные линии). Здесь и на рис. 10 и 11 – рисунки построены на основе оригинальных данных с использованием материалов из работы (Наумов и др., 1999).

Fig. 9. Correlation between alkali sum and FeO/MgO ratio and SiO_2 content (wt. %) in composition of melt inclusions in quartz from effusive rocks of the Urals and Altai-Sayany region.

Melt inclusions in quartz from Cambrian (Kyzyl-Tashtyg – KT, Salair ore field – Sa), Silurian and Devonian (Yaman-Kasy – YK, Vishnevskoe – Vi, Verkhneuralsky ore region – Ur) and Devonian (Yubileinoe – Yu, Nikolaevskoe – Ni) rocks of massive sulfide deposits. Rock series: tholeiitic (T) and calc-alkaline (C). Trends in data on melt inclusions in quartz from deposits: Kyzyl-Tashtyg (solid lines), Yaman-Kasy and Vishnevskoe (dashed lines), Yubileinoe (dotted lines). Here and in Figs. 10 and 11, figures are based on original data and materials from (Naumov et al., 1999).

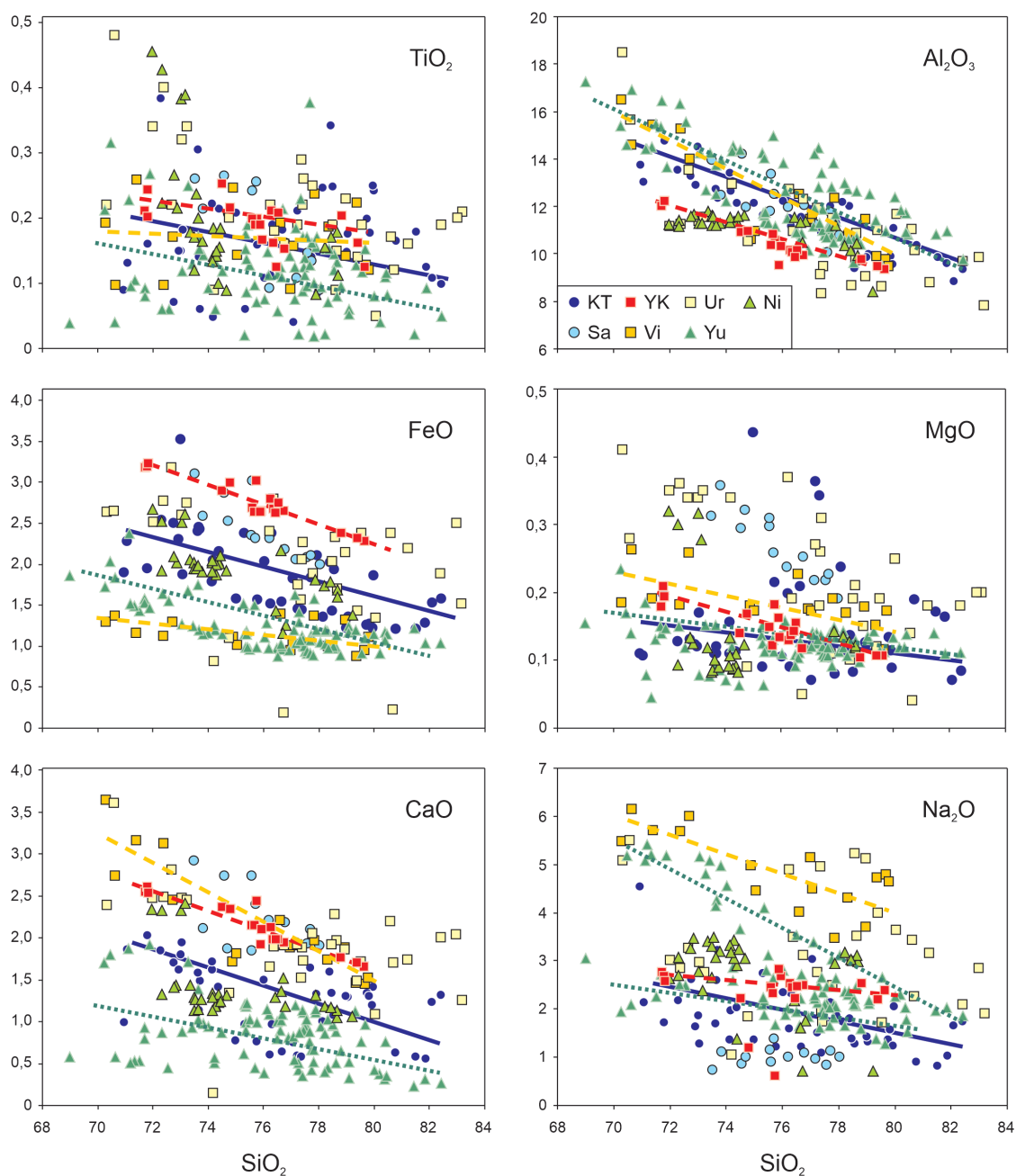


Рис. 10. Вариационные диаграммы для составов (мас. %) расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

Здесь и на рис. 11–13, условные обозначения см. на рис. 9.

Fig. 10. Discriminant diagrams for compositions (wt. %) of melt inclusions in quartz from effusive rocks of the Urals and Altai-Sayany region.

Here and in Figs. 11–13, for symbols, see Fig. 9.

обратная зависимость с относительно небольшими вариациями содержаний Cu (до 1100–1400 г/т) при максимальном накоплении (до 4.3–5.3 мас. %) H_2O (рис. 13). Второй группе соответствуют данные по расплавным включениям Верхнеуральского рудно-

го района: 1100 г/т Cu и 2.9 мас. % H_2O (Викентьев и др., 2012; Карпухина и др., 2013).

Основной объем информации по содержанию рудных элементов в расплавных включениях в кварце из пород колчеданных месторождений по-

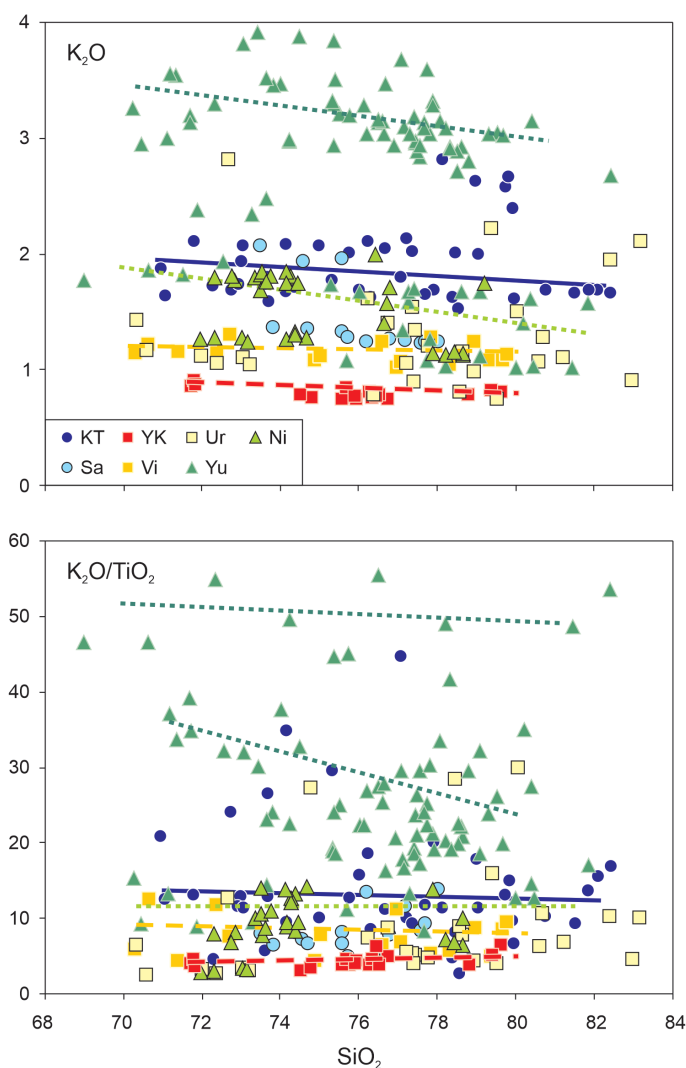


Рис. 11. Диаграммы K_2O-SiO_2 и K_2O/TiO_2-SiO_2 для составов (мас. %) расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

Fig. 11. K_2O-SiO_2 and K_2O/TiO_2-SiO_2 diagrams for compositions (wt. %) of melt inclusions in quartz from effusive rocks of the Urals and Altai-Sayany region.

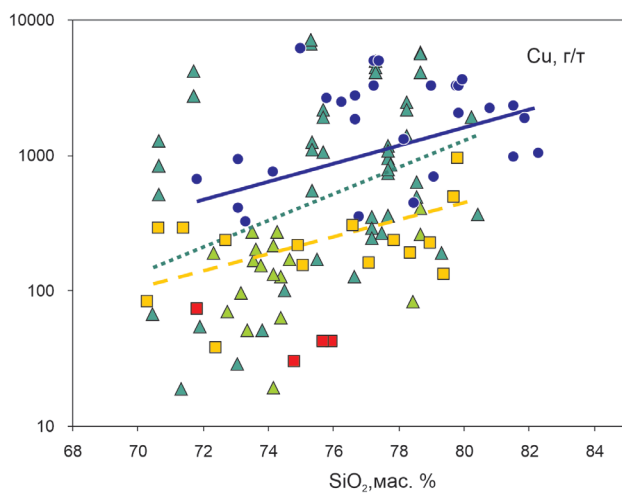


Рис. 12. Корреляция между содержаниями Cu и SiO_2 в составе расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

Fig. 12. $Cu-SiO_2$ correlation in compositions of melt inclusions in quartz from effusive rocks of the Urals and Altai-Sayany region.

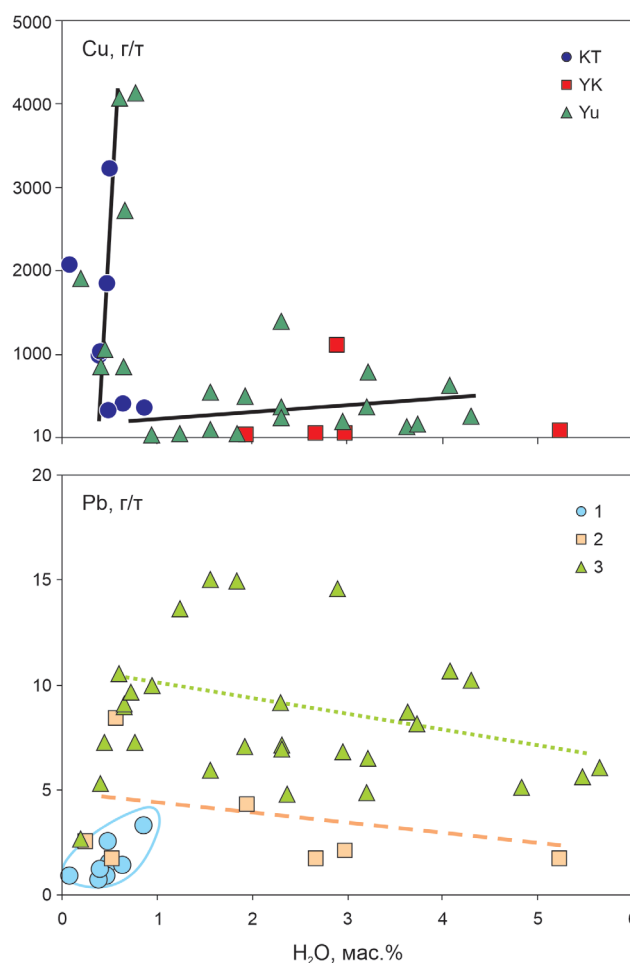


Рис. 13. Зависимость содержаний Cu, Pb и H_2O в составе расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

Здесь и на рис. 14: 1–3 – расплавные включения в кварце из пород кембрийских (1 – Кызыл-Таштыгское), силурийских и девонских (2 – Яман-Касинское + Вишневокское), девонских (3 – Юбилейное + Николаевское) месторождений.

Fig. 13. Correlation between Cu, Pb and H_2O contents in composition of melt inclusions in quartz from effusive deposits of the Urals and Altai-Sayany region.

Here and Fig. 14: 1–3 – melt inclusions in quartz from rocks of Cambrian (1 – Kyzyl-Tashtyg), Silurian and Devonian (2 – Yaman-Kasy + Vishnevskoe) and Devonian (3 – Yubileinoe + Nikolaevskoe) deposits.

лучен с помощью ионного зонда. В то же время, для Вишневокского месторождения количество Cu в расплавных включениях также оценено с помощью рентгеновского микроанализатора. Установлено, что содержания Cu достигают 780–820 г/т (редко, 1490 г/т). При содержании H_2O во включениях около 0.5 мас. % данные по Вишневокскому месторождению располагаются в начале отмеченных выше трендов.

Анализ содержания Pb в расплавных включениях в кварце показал, что наиболее древние (кембрийские) расплавы содержат его минимальные

количества при минимальных содержаниях H_2O (до 3.3 г/т Pb и 0.9 мас. % H_2O на Кызыл-Таштыгском месторождении), располагаясь (по количеству H_2O) в начале трендов более молодых систем силурийско-девонских (до 8.4 г/т Pb и до 5.2 мас.% H_2O для Яман-Касинского и Вишневокского) и девонских (до 15 г/т Pb и до 5.7 мас. % H_2O для Юбилейного и Николаевского) месторождений (рис. 13). Несмотря на представительный объем данных (проанализировано более 50 включений в кварце из разных колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области), содержания Pb выше 15 г/т не уста-

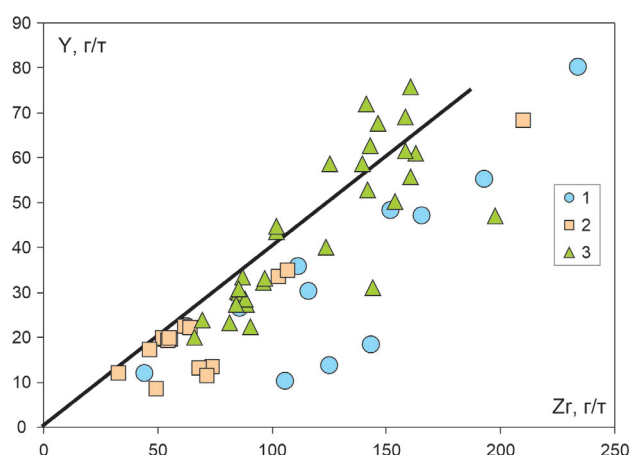


Рис. 14. Корреляция между содержаниями Y и Zr в составе расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

Fig. 14. Y–Zr correlation in compositions of melt inclusions in quartz from effusive rocks of the Urals and Altai-Sayany region.

новлены, что соответствует его среднему содержанию в островодужных расплавах кислого состава (Наумов и др., 2010). В то же время, имеется информация о существенно более высоком содержании Pb (258 г/т) в расплавных включениях в кварце кислых вулканитов колчеданных месторождений Верхнеуральского рудного района (Викентьев и др., 2012; Карпукхина и др., 2013).

Редкие и редкоземельные элементы. По содержанию редких индикаторных элементов расплавные включения в кварце разбиваются на две группы, располагаясь согласно общему островодужному тренду одновременного накопления Y и Zr. Минимальные содержания Y характерны для расплавов силурийских и девонских месторождений Урала. В эту же группу попадает большинство расплавных включений из древних (кембрийских) комплексов. Составы стекол в кварце из наиболее молодых (девонских) месторождений Рудного Алтая формируют основную часть обогащенной (до 75 г/т Y и до 210 г/т Zr) группы (рис. 14).

Отмеченные для редких компонентов особенности подтверждаются распределением РЗЭ. На рис. 15 видно, что наименьшими средними содержаниями РЗЭ обладают включения в кварце из пород силурийско-девонских месторождений, максимально обогащены ими девонские расплавы, а кембрийские кислые магмы содержат промежуточные количества РЗЭ. Спектры РЗЭ характеризуются накоплением ЛРЗЭ и отчетливым Eu мини-

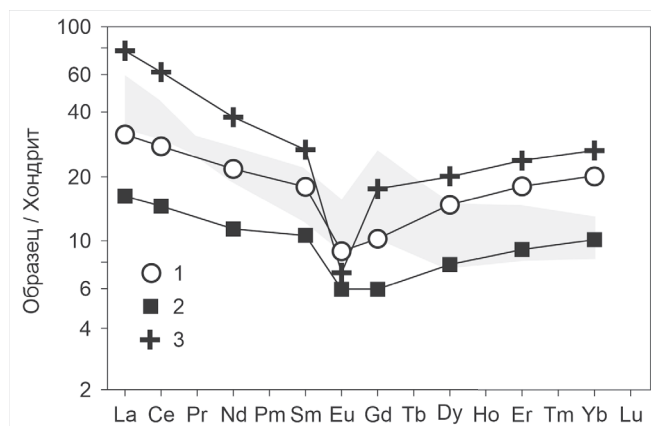


Рис. 15. Хондрит-нормализованные спектры РЗЭ расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

1–3 – расплавные включения в кварце из пород кембрийских (1 – Кызыл-Таштыгское, Салаирское рудное поле), силурийских и девонских (2 – Яман-Касинское, Вишнево, Верхнеуральский рудный район), девонских (3 – Юбилейное, Николаевское) месторождений.

Здесь и на рис. 16 использованы средние значения. Серое – поле надсубдукционных кислых расплавов. Содержания элементов нормированы к хондриту по (Boynton, 1984). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Наумов и др., 2010; Карпукхина и др., 2013).

Fig. 15. Chondrite-normalized REE patterns of melt inclusions in quartz from effusive rocks of the Urals and Altai-Sayany region.

1–3 – melt inclusions in quartz of rocks from Cambrian (1 – Kyzyl-Tashtyg, Salair ore field), Silurian and Devonian (2 – Yaman-Kasy, Vishnevskoe, Verkhneuralsky ore region), Devonian (3 – Yubileinoe, Nikolaevskoe) deposits.

Here and in Fig. 16, the average values are used. Gray – area of suprasubduction acidic melts. The element contents are normalized to chondrite after (Boynton, 1984). The figure is based on original data and materials from (Naumov et al., 2010; Karpukhina et al., 2013).

мумом (свидетельствующим об эволюции кислых расплавов при фракционировании плагиоклазов) и согласуются с данными по кислым магматическим системам островных дуг и задуговых бассейнов, развивающимися над зонами субдукции (рис. 15).

На спайдер-диаграмме спектры распределения редких и редкоземельных элементов в расплавных включениях в кварце характеризуются отрицательным наклоном с понижением при переходе от мобильных несовместимых к совместимым немобильным элементам, совпадая с данными по остро-

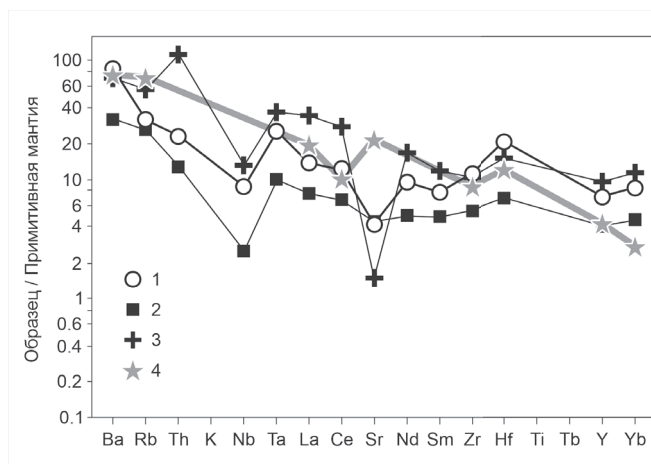


Рис. 16. Спайдер-диаграммы для составов расплавных включений в кварце из эффузивов месторождений Урала и Алтае-Саянской области.

4 – данные по островодужным дацитам. Остальные условные обозначения см. на рис. 15. Содержания элементов нормированы к примитивной мантии по (McDonough et al., 1992; Rollinson, 1993). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Кузьмин, 1985; Наумов и др., 2010; Карпукхина и др., 2013).

Fig. 16. Spider diagrams for compositions of melt inclusions in quartz from effusive rocks of the Urals and Altai-Sayan region.

4 – data on island-arc dacites. For other symbols, see Fig. 15. The element contents are normalized to primitive mantle after (McDonough et al., 1992; Rollinson, 1993). The figure is based on original data and materials from (Kuzmin, 1985; Naumov et al., 2010; Karpukhina et al., 2013).

водужным дацитам. Графики разновозрастных расплавов изменяются синхронно с минимумами Nb и Sr и максимумом Hf. Для молодых (девонских) спектров отмечается Th максимум, отсутствующий в других случаях. Таким образом, наиболее примитивные кислые расплавы характерны для силурийско-девонских месторождений Урала, а максимум обогащения редкими и редкоземельными элементами установлен в девонских магматических системах Рудного Алтая при промежуточном положении самых древних (кембрийских) магм Тувы и Салаира (рис 16).

Обсуждение результатов

Проведенные исследования показали, что на основе данных по расплавным включениям в кварце возможно выяснить не только условия формирования кислых пород, входящих в состав базальт-

риолитовых комплексов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Алтае-Саянской области, но и рассмотреть особенности взаимоотношений рудоносных магматических систем базальтоидного и гранитоидного составов.

Физико-химические условия минералообразующих процессов в кислых магматических системах, связанных с формированием колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области, установлены с помощью изучения расплавных включений в кварце. Включения в кварце эффузивов, вмещающих месторождения Алтае-Саянской области, становятся полностью гомогенными при температурах 1050–1180 °C (при более низких значениях температур гомогенизации (910–1150 °C) в случае андезитов Кызыл-Таштыгского месторождения). Для месторождений Урала определен практически такой же диапазон температур гомогенизации (910–1190 °C) с минимальными значениями для Яман-Касинского месторождения (910–945 °C). Близкие температуры гомогенизации расплавных включений в кварце эффузивов получены и другими исследователями (Мергенов, 1987; Бабанский и др., 1995; Титов и др., 1996; Карпукхина и др., 1998; Наумов и др., 1999). О реальности высоких температур кислых расплавов колчеданных месторождений свидетельствуют и результаты моделирования с помощью программы COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004), основанные на составах расплавных включений в кварце. Расчетные параметры кислых расплавов (1050–960 °C) согласуются с данными по температурам гомогенизации (1150–910 °C) расплавных включений в кварце из эффузивов Кызыл-Таштыгского месторождения.

Несмотря на несколько выдержек при температурах около 900 °C и выше со значительно большей продолжительностью опыта, чем в случае включений в минералах из базитовых пород, не исключено, что часть полученных высоких температур гомогенизации включений в кварце (>1100 °C) может быть следствием их перегрева. Однако эксперименты с расплавными включениями в кварце из эталонных современных эффузивов Камчатки показали, что даже если некоторые из изученных нами включений в кварце могли быть в ходе высокотемпературных опытов перегреты, то это не искажает составы этих включений.

Исследования состава гомогенных стекол расплавных включений в кварце позволили установить как сходство, так и черты различия кислых маг-

магматических систем колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области. В подавляющем большинстве случаев включения в кварце месторождений соответствуют риодацитам и риолитам нормальной щелочности и относятся к толеитовой серии по соотношению $\text{FeO}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$. Эволюция кислых расплавов на изученных колчеданных месторождениях Урала происходила с увеличением железистости на фоне накопления SiO_2 в отличие от магм Алтае-Саянской области, для которых значения FeO/MgO падают. Для рассмотренных месторождений Урала и Алтае-Саянской области составы расплавных включений свидетельствуют об однотипном характере эволюции кислых магматических систем с падением содержания петрогенных компонентов (TiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O) на фоне роста содержаний SiO_2 .

Анализ рудных компонентов во включениях в кварце показал, что для месторождений Урала и Алтае-Саянской области имеется сложная взаимосвязь между содержаниями Cu и H_2O . Минимальные содержания Cu и H_2O характерны для наиболее древних (кембрийских) расплавов (Кызыл-Таштыгское месторождение). Затем эволюция идет по двум разным направлениям. В одном случае (данные по кембрийским и девонским расплавам, месторождения Кызыл-Таштыгское и Юбилейное, соответственно) резко растут содержания Cu (до 4100 г/т) на фоне минимальных значений H_2O (до 0.75 мас. %). Для других (силурийских и девонских, месторождения Яман-Касинское и Юбилейное) расплавов устанавливается обратная зависимость с относительно небольшими вариациями Cu (до 1400 г/т) при максимальном накоплении (до 5.3 мас. %) H_2O .

По содержанию редких индикаторных элементов расплавные включения в кварце рассмотренных месторождений Урала и Алтае-Саянской области располагаются согласно общему островодужному тренду одновременного накопления Y и Zr . Эти особенности подтверждаются данными по распределению РЗЭ, спектры которых согласуются с данными по кислым магматическим системам, развивающимся над зонами субдукции.

Взаимосвязь магматических систем основного и кислого составов, формировавших базальт-риолитовые комплексы, вмещающие колчеданные месторождения Урала и Алтае-Саянской области, были частично рассмотрены нами ранее в результате расчетного моделирования по программе COMAGMAT с использованием составов расплав-

ных включений в клинопироксене (Симонов, Масленников, 2020). Подобное моделирование было продолжено с использованием данных по составам расплавных включений в кварце из эффузивов, ассоциирующих с сульфидными рудами. На примере Кызыл-Таштыгского месторождения моделировалась равновесная декомпрессионная кристаллизация кислых расплавов (SiO_2 70.8 мас. %, MgO 1.34 мас. %), являющихся конечным продуктом фракционирования базальтовых магм, судя по предыдущим расчетам (Симонов, Масленников, 2020). Давление задавалось в 1 кбар, содержание H_2O 0.5 мас. % (согласно данным анализа включений в кварце) при буфере QFM. В результате (совместно с данными по расчетам на основе расплавных включений в клинопироксене из базальтов) установлена многоступенчатая эволюция магматических систем, ответственных за формирование базальт-риолитовых комплексов, вмещающих Кызыл-Таштыгское месторождение. На рисунке 17 видны три тренда: высокомагнезиальный, умеренно магнезиальный и с минимумом содержаний MgO при максимуме содержаний SiO_2 . Первый тренд показывает повышенные содержания MgO (9.5–7.5 мас. %) и высокие расчетные температуры (1250–1190 °C). Он проходит через основную группу расплавных включений в клинопироксене с близкими содержаниями MgO (10–8 мас. %) и значениями температур гомогенизации (1210–1170 °C). В дальнейшем в расплаве падают содержания MgO (до 5.8–5 мас. %) и температуры (до 1140–1130 °C), что фиксируется второй группой включений (рис. 17) с содержанием MgO 5.8–5.4 мас. % и температурами гомогенизации 1140–1120 °C. Выявленное сходство результатов экспериментального изучения расплавных включений (температуры гомогенизации) в клинопироксене с расчетными данными подтверждает достоверность последних.

Второй расчетный тренд начинается от второй группы включений в клинопироксене с содержанием SiO_2 около 56 мас. % и показывает непрерывное изменение (трассируемое точками пород от андезита до риолитов) состава расплава до содержания SiO_2 73 мас. % (рис. 17). Расчетные температуры кислых (содержание SiO_2 более 70 мас. %) расплавов составляли 1065–1045 °C. Эти параметры согласуются с экспериментальными исследованиями, попадая в интервал температур гомогенизации расплавных включений (с содержанием SiO_2 более 71 мас. %) в кварце из андезитов и риолитов Кызыл-Таштыгского месторождения.

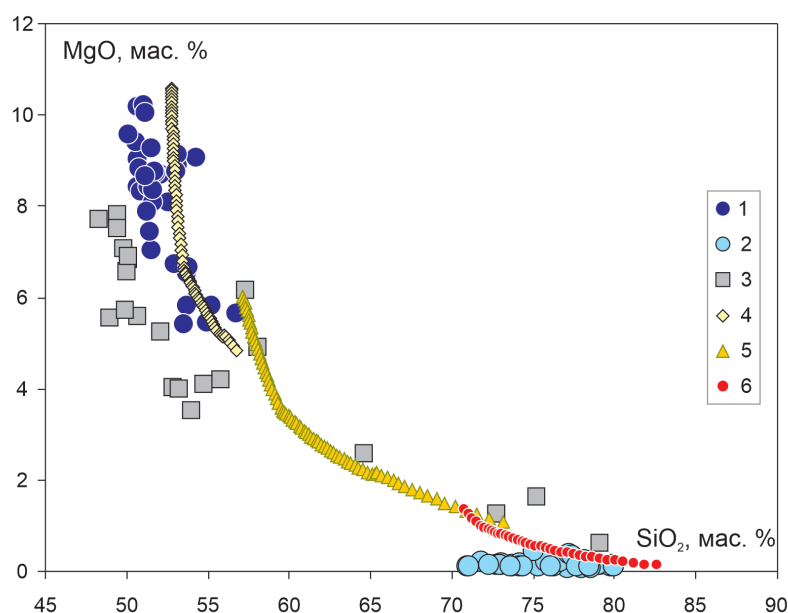


Рис. 17. Эволюция магматических систем при кристаллизации минералов базальт-риолитовых комплексов Кызыл-Таштыгского месторождения.

1, 2 – расплавные включения в клинопироксене (1) и кварце (2); 3 – эффузивные породы, вмещающие Кызыл-Таштыгское месторождение; 4–6 – эволюция расплавов с максимальными (4) и умеренными (5) содержаниями MgO и с максимальным количеством SiO₂ (6).

Fig. 17. Evolution of magmatic systems during crystallization of minerals of basaltic-rhyolitic complexes of the Kyzyl-Tashtyg deposit.

1, 2 – melt inclusions in clinopyroxene (1) and quartz (2); 3 – host effusive rocks for the Kyzyl-Tashtyg deposit; 4–6 – evolution of melts with maximum (4) and moderate (5) MgO contents and maximum SiO₂ contents (6).

Третий тренд с минимумом содержаний MgO (1.34–0.12 мас. %) и максимумом содержаний SiO₂ (до 82.6 мас. %) соответствует риолитам и расплавным включениям в кварце (рис. 17). Расчетные температуры максимально кислых расплавов (1050–960 °C) согласуются с минимальными данными по температурам гомогенизации (1150–910 °C) расплавных включений в кварце из эффузивов Кызыл-Таштыгского месторождения.

Основные выводы

1. Результаты исследования расплавных включений в кварце свидетельствуют об общих характеристиках минералообразующих процессов в кислых магматических системах для всех рассмотренных колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области, независимо от их возраста и местоположения. В подавляющем большинстве случаев включения соответствуют риодацитам и риолитам нормальной щелочности и по соотношению FeO/MgO–SiO₂ относятся к толеитовой серии. Установлен однотипный характер эволюции кис-

лых магматических систем с падением содержаний петрогенных компонентов (TiO₂, Al₂O₃, FeO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O) на фоне роста содержаний SiO₂.

2. Экспериментальные исследования показали, что температуры гомогенизации расплавных включений в кварце эффузивов, вмещающих месторождения Алтае-Саянской области и Урала, практически совпадают (910–1180 и 910–1190 °C, соответственно). Реальность этих параметров подтверждается моделированием с помощью программы COMAGMAT на основе составов включений в кварце, свидетельствующим о достаточно высоких расчетных температурах (960–1050 °C).

3. Результаты исследования включений свидетельствуют о существенном накоплении Cu в относительно маловодных кислых расплавах кембрийских месторождений Алтае-Саянской области при относительно пониженных содержаниях этого металла в силурийско-девонских водонасыщенных магмах Урала. Самые молодые девонские магмы Алтае-Саянской области развиваются одновременно по этим двум разным направлениям.

4. Анализ включений в кварце показал, что минимальные содержания редких и редкоземельных элементов характерны для силурийско-девонских кислых расплавов Урала при максимальном накоплении этих компонентов в девонских магмах и промежуточном положении кембрийских магматических систем Алтае-Саянской области.

5. Особенности распределения редких и редкоземельных элементов во включениях в кварце свидетельствуют о сходстве кислых магматических систем, участвовавших в формировании колчеданных месторождений Урала и Алтае-Саянской области, с современными надсубдукционными расплавами в переходных зонах океан-континент.

6. Расчетное моделирование с использованием программы COMAGMAT на основе данных по составам расплавных включений в клинопироксене и в кварце на примере Кызыл-Таштыгского месторождения подтверждает предыдущие выводы (Симонов, Масленников, 2020) о том, что соположение базитовых и кислых вулканогенных комплексов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Алтае-Саянской области не случайный факт, а результат закономерной сложной эволюции глубинных исходных базальтоидных магм.

Авторы выражают благодарность рецензенту за критические замечания, способствовавшие улучшению статьи. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН, при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации и договора № 14.Y26.31.0029, а также в рамках государственной бюджетной темы Института минералогии ЮУ ФНЦ МиГ УрО РАН (AAAA-A19-119061790049-3).

Литература

Бабанский А.Д., Ашихмина Н.А., Коваленко В.И., Лятифова Е.Н., Кононкова Н.Н. (1995) Исходная магма пород Верхнекемского кальдерного комплекса (Северный Кавказ) по данным изучения включений в минералах. *Доклады Академии наук*, **344**(2), 226–228.

Барышев А.Н., Цетлин В.П., Швайковский М.И. (1976) Основные черты геологического строения и генезиса колчеданного оруденения Николаевского месторождения (Рудный Алтай). *Геология рудных месторождений*, (5), 38–52.

Берман Б.И. (1960) Геология Кызыл-Таштыгского месторождения. *Труды регионального совещания по развитию производительных сил Тувинской АО*. Новосибирск: СО АН СССР, 137–146.

Викентьев И.В., Борисова А.Ю., Карпухина В.С., Наумов В.Б., Рябчиков И.Д. (2012). Прямые данные о рудоносности кислых магм Узельгинского рудного поля (Южный Урал, Россия). *Доклады Академии наук*, **443**(3), 347–351.

Гаськов И.В. (2020) Кызыл-Таштыгское месторождение в Восточной Туве – эталон древнего вулканогенного образования колчеданно-полиметаллических руд. *Геология и геофизика*, **61**(2), 175–193.

Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Калугин И.А., Тикуннов Ю.В. (1999) Металлогеническая специализация и петрохимические особенности девонского вулканизма Рудного и Горного Алтая. *Геология и геофизика*, **40**(5), 703–715.

Гаськов И.В., Дистанов Э.Г., Миронова Н.Ю., Чекалин В.М. (1991) Колчеданно-полиметаллические месторождения верхнего девона северо-западной части Рудного Алтая. Новосибирск, Наука. 121 с.

Гаськов И.В., Симонов В.А., Ковязин С.В. (2006) Эволюция физико-химических параметров и геохимических особенностей магматических расплавов при развитии колчеданных рудно-магматических систем Рудного Алтая и Тувы. *Геология и геофизика*, **47**(12), 1360–1370.

Гаськов И.В., Симонов В.А., Ковязин С.В. (2008) Общие закономерности геохимической эволюции кислых расплавов при развитии колчеданных рудно-магматических систем (по данным изучения расплавных включений). *Геохимия*, (11), 1176–1186.

Дергачев А.Л., Сергеева Н.Е., Авдонин В.В., Старостин В.И. (1989) Повторяемость процессов рудообразования на Николаевском рудном поле на Рудном Алтае. *Геология рудных месторождений*, (4), 38–48.

Зайков В.В. (2006) Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин: на примере колчеданоносных зон Урала и Сибири. Издание второе, дополненное. М., Наука, 429 с.

Зайков В.В., Шадлун Т.Н., Масленников В.В., Бортников Н.С. (1995) Сульфидная залежь Яман-Касы (Южный Урал) – руины древнего «черного курильщика» на дне Уральского палеоокеана. *Геология рудных месторождений*, (37), 511–529.

Карпухина В.С., Наумов В.Б., Баранов Э.Н., Кононкова Н.Н. (1998) Состав расплавов кислых вулканитов Верхнеуральского рудного района (Южный Урал) по данным изучения включений в кварце. *Доклады Академии наук*, **358**(1), 100–103.

Карпухина В.С., Наумов В.Б., Викентьев И.В. (2013) Генезис колчеданных месторождений Верхнеуральского рудного района (Южный Урал, Россия): свидетельства магматического вклада металлов и флюида. *Геология рудных месторождений*, **55**(2), 145–165.

Кузбный В.С., Калеев В.А., Макаров В.А. (1990) Вулканогенно-осадочное колчеданное оруденение Кызыл-Таштыгского рудного поля Восточной Тувы. *Геология рудных месторождений*, (1), 110–116.

- Кузбный В.С., Макаров В.А., Калеев Е.А., Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Бухаров Н.С., Глазунов С.П., Чупахин Л.М.** (2001) Кызыл-Таштыгский колчеданно-полиметаллический рудный узел Восточной Тувы. Красноярск, 292 с.
- Кузнецов В.В., Серавина Т.В., Кузнецова С.В., Елшина С.Л.** (2020) Условия локализации колчеданно-полиметаллического оруденения Улугуйской минералогической зоны (Республика Тыва). *Отечественная геология*, (3), 3–17.
- Кузьмин М.И.** (1985) Геохимия магматических пород фанерозойских подвижных поясов. Новосибирск, Наука, 198 с.
- Лапухов А.С.** (1975) Зональность колчеданно-полиметаллических месторождений. Новосибирск, Наука, 264 с.
- Лапухов А.С., Симонов В.А., Ковязин С.В.** (2001) Особенности формирования магматических комплексов Салаирского колчеданно-полиметаллического рудного поля (Западная Сибирь). *Геология и геофизика*, 42(8), 1186–1195.
- Лебедев В.И.** (2012) Минеральные ресурсы Тувы: обзор и анализ полезных ископаемых. Кызыл, ТувИ-КОПР СО РАН, 284 с.
- Масленников В.В.** (1999) Седиментогенез, гальмиролиз и экология колчеданосных палеогидротермальных полей (на примере Южного Урала). Миасс, Геотур, 348 с.
- Масленников В.В., Зайков В.В.** (1998) Колчеданосные палеогидротермальные поля окраинно-океанических структур Урала (классификация, рудные фации, модель развития). Миасс, ИМин УрО РАН, 92 с.
- Масленников В.В., Симонов В.А.** (2012) Некоторые проблемы развития пригидротермальной фауны в зонах действия палеозойских «черных курильщиков» Рудного Алтая. *Металлогения древних и современных океанов-2012. Гидротермальные поля и руды*. Миасс, ИМин УрО РАН, с. 65–68.
- Масленников В.В., Симонов В.А., Жуков И.Г., Третьяков Г.А., Херрингтон Р., Масленникова С.П., Каныгин А.В.** (2007) Первые находки сульфидных труб палеозойских «черных курильщиков» в Центральной Азии. *Геология морей и океанов. Материалы XVII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии*. М., ГЕОС. Т. II, с. 47–49.
- Масленников В.В., Шпанская А.Ю., Литтл К.** (1997) О вестиментиферах, альвинеллидах и палеоэкологии гидротермальных оазисов Уральского палеоокеана. *Металлогения древних и современных океанов-97. Процессы рудообразования*. Миасс, ИМин УрО РАН, 150–160.
- Мелекесцева И.Ю., Зайков В.В., Котляров В.А.** (2008) Рудные фации Вишневого колчеданного месторождения, Южный Урал. *Металлогения древних и современных океанов-2008. Рудоносные комплексы и рудные фации*. Миасс, ИМин УрО РАН, с. 94–98.
- Мергенов Б.М.** (1987) Физико-химические особенности формирования порфировых пород и оруденения Николаевского месторождения (Рудный Алтай). *Геология рудных месторождений*, (1), 59–65.
- Наумов В.А.** (1975) Субвулканические порфиры и оруденение Николаевского месторождения. *Известия АН КазССР. Серия: Геология*, 9я, (5), 55–99.
- Наумов В.Б., Карпущина В.С., Баранов Э.Н., Кононкова Н.Н.** (1999) Составы расплавов, содержания летучих компонентов и элементов-примесей, температуры кристаллизации кварца кислых вулканитов Верхнеуральского рудного района (Южный Урал). *Геохимия*, (4), 339–351.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолюк В.В.** (2010) Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород. *Геохимия*, (12), 1266–1288.
- Поспелов Г.Л., Лапухов А.С.** (1971) Строение и развитие флюидных динамических систем с полиморфной зональностью (на примере Салаирского рудного поля). Физические и физико-химические процессы в динамических рудообразующих системах. Новосибирск, Наука, 8–56.
- Серавкин И.Б., Родичева З.А.** (1990) Кракинско-Медногорский палеовулканический пояс. Уфа, БНЦ УрО АН СССР, 53 с.
- Симонов В.А., Лапухов А.С., Ковязин С.В.** (2000) Физико-химические параметры кислых расплавов, связанных с колчеданными месторождениями Алтае-Саянской складчатой области. *Геохимия магматических пород. XIX Всероссийский семинар с участием стран СНГ*. М.: ГЕОХИ РАН, с. 130.
- Симонов В.А., Гаськов И.В., Ковязин С.В., Борисенко А.С.** (2005) Эволюция геохимических параметров кислых расплавов при формировании колчеданных месторождений Рудного Алтая. *Доклады Академии наук*, 403 (5), 674–677.
- Симонов В.А., Зайков В.В., Ковязин С.В.** (1999) Палеогеодинамические условия развития гидротермальных систем Кызыл-Таштыгского месторождения (Восточная Тува). *Металлогения древних и современных океанов-1999. Рудоносность гидротермальных систем*. Миасс, ИМин УрО РАН, с. 16–23.
- Симонов В.А., Ковязин С.В., Колмогоров Ю.П.** (2001) Условия формирования магматических комплексов колчеданных месторождений Яман-Касы и Блявинское (Южный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2001. История месторождений и эволюция рудообразования*. Миасс, ИМин УрО РАН, с. 240–247.
- Симонов В.А., Ковязин С.В., Тереня Е.О., Масленников В.В., Зайков В.В., Масленникова С.П.** (2006) Физико-химические параметры магматических и гидротермальных процессов на колчеданном месторождении Яман-Касы, Южный Урал. *Геология рудных месторождений*, 48(5), 423–438.

Симонов В.А. (1993) Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 247 с.

Симонов В.А., Масленников В.В. (2020) Физико-химические условия кристаллизации минералов-вкрапленников в базальтовых комплексах, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Сибири. *Минералогия*, **6**(4), 82–102.

Соболев А.В. (1996) Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации. *Петрология*, **4**(3), 228–239.

Соболев А.В., Слуцкий А.Б. (1984) Состав и условия кристаллизации исходного расплава сибирских меймечитов в связи с общей проблемой ультраосновных магм. *Геология и геофизика*, (12), 97–110.

Титов А.В., Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Палеский С.В., Тютин М.А. (1996) Петрогенезис и возраст вулканитов Кызылрабатской структуры (Юго-Восточный Памир). *Геология и геофизика*, **37**(5), 62–72.

Ariskin A.A., Barmina G.S. (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, **42** (Supp. 1), S1–S157.

Boynton W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry*. Eds. P. Henderson. Oxford-Amsterdam, Elsevier, 63–114.

Herrington R.J., Maslennikov V.V., Zaykov V.V., Simonov V.A., Spiro B., Tornos F. (1999) Geological setting of the Cambrian VHMS deposits of Kyzyl Tashtyg, East Tuva, Siberia. *SGA Meeting. Processes to processing*. Rotterdam, Balkema, 523–526.

McDonough W.F., Sun S., Ringwood A.E., Jagoutz E., Hofman A.W. (1992) K, Rb and Cs in the earth and moon and the evolution of the earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, 1001–1012.

Rollinson H.R. (1993) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical. London, 352 p.

Simonov V.A., Gaskov I.V., Kovyazin S.V. (2010) Physico-chemical parameters from melt inclusions for the formation of the massive sulfide deposits in the Altai–Sayan Region, Central Asia. *Australian Journal of Earth Sciences*, **57**, 737–754.

Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. (1994) Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas. *Journal of Petrology*, **35**, 1183–1211.

References

Ariskin A.A., Barmina G.S. (2004) COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications. *Geochemistry International*, **42** (Supp. 1), S1–S157.

Babansky A.D., Ashikhmina N.A., Kovalenko V.I., Lyatifova Ye.N., Kononkova N.N. (1995) [Inclusions in minerals and parental magma for the Late Chegem caldera complex, North Caucasus]. *Doklady Akademii nauk [Doklady Academy of Sciences]*, **344**(2), 226–228. (in Russian)

Baryshev A.N., Tsetlin V.P., Shvaikovsky M.I. (1976) [Main features of geological structure and genesis of massive sulfide mineralization of the Nikolaevskoe deposit, Rudny Altai]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, (5), 38–52. (in Russian)

Berman B.I. (1960) [Geology of the Kyzyl-Tashtyg field]. *Trudy regional'nogo soveshchaniya po razvitiyu proizvoditel'nykh sil Tuvinskoi AO [Proceedings of the Regional Meeting on the Development of Productive Forces of the Tuva Autonomous District]*. Novosibirsk: SO AN SSSR, 137–146. (in Russian)

Boynton W.V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry*. Eds. P. Henderson, Oxford-Amsterdam, Elsevier, 63–114.

Dergachev A.L., Sergeeva N.E., Avdonin V.V., Starostin V.I. (1989) [Recurrence of ore formation processes in the Nikolaevsky ore field in Rudny Altai]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, (4), 38–48. (in Russian)

Gaskov I.V. (2020) The Kyzyl-Tashtyg ore deposit of Eastern Tuva – a standard for the ancient volcanogenic formation of pyrite-polymetallic ores. *Russian Geology and Geophysics*, **61**(2), 139–154.

Gaskov I.V., Simonov V.A., Kovyazin S.V. (2006) Evolution of physicochemical parameters and geochemical characteristics of magmas during the development of ore-bearing pyrite systems in Rudny Altai and Tuva. *Russian Geology and Geophysics*, **47** (12), 1335–1347.

Gaskov I.V., Simonov V.A., Kovyazin S.V. (2008) General characteristics of the geochemical evolution of silicic melts during the development of massive sulfide magmatic ore systems: evidence from the investigation of melt inclusions. *Geochemistry International*, **46**(11), 1107–1116.

Gaskov I.V., Distanov E.G., Mironova N.Yu., Chekalin V.M. (1991) [Upper Devonian massive sulfide polymetallic deposits of the northwestern part of Rudny Altai]. Novosibirsk, Nauka, 121 p. (in Russian)

Gaskov I.V., Distanov E.G., Kalugin I.A., Tikunov Yu.V. (1999) Metallogeny and petrochemical features of Devonian volcanism in Rudny Altai and Gorny Altai. *Russian Geology and Geophysics*, **40** (5), 686–699.

Herrington R.J., Maslennikov V.V., Zaykov V.V., Simonov V.A., Spiro B., Tornos F. (1999) Geological

setting of the Cambrian VHMS deposits of Kyzyl Tashtyg, East Tuva, Siberia. *SGA Meeting. Processes to processing*. Rotterdam, Balkema, 523–526.

Karpukhina V.S., Naumov V.B., Baranov E.N., Kononkova N.N. (1998) [Composition of felsic volcanic melts of the Verkhneural'sk ore region (South Urals) according to the study of inclusions in quartz]. *Doklady Akademii nauk [Doklady Academy of Sciences]*, **358**(1), 100–103. (in Russian)

Karpukhina V.S., Naumov V.B., Vikentiev I.V. (2013) [Genesis of massive sulfide deposits in the Verkhneural'sk ore district, the South Urals, Russia: Evidence for magmatic contribution of metals and fluids]. *Geology of Ore Deposits*, **55**(2), 125–143.

Kuzebny V.S., Makarov V.A., Kaleev E.A. et al. (2001) [Kyzyl-Tashtyg massive sulfide polymetallic ore cluster in East Tuva]. Krasnoyarsk, 292 p. (in Russian)

Kuzebny V.S., Kaleev E.A., Makarov V.A. (1990) [Volcanosedimentary massive sulfide mineralization of the Kyzyl-Tashtyg ore field of Eastern Tuva]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, (1), 110–116. (in Russian)

Kuznetsov V.V., Seravina T.V., Kuznetsova S.V., Elshina S.L. (2020) [Localization conditions of massive sulfide polymetallic mineralization of the Ulugoi mineragenic zone (Republic of Tyva)]. *Otechestvennaya geologiya [National Geology]*, (3), 3–17. (in Russian)

Kuzmin M.I. (1985) [Geochemistry of igneous rocks of the Phanerozoic mobile belts]. Novosibirsk, Nauka, 198 p. (in Russian)

Lapukhov A.S., Simonov V.A., Kovyazin S.V. (2001) [Features of the formation of igneous complexes of the Salair massive sulfide polymetallic ore field (Western Siberia)]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, **42** (8), 1186–1195. (in Russian)

Lapukhov A.S. (1975) [Zonation of massive sulfide polymetallic deposits]. Novosibirsk, Nauka, 264 p. (in Russian)

Lebedev V.I. (2012) [Mineral resources of Tuva: review and analysis of mineral resources]. Kyzyl, TuvIKOPR SO RAN, 284 p. (in Russian)

Maslennikov V.V., Shpanskaya A.Yu., Little C. (1997) [Vestimentifera, alvinellids and paleoecology of hydrothermal oases of the Uralian paleocean]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-97. Protsessy rudoobrazovaniya [Metallogeny of ancient and modern oceans-97. Ore formation processes]*. Miass, IMin UrO RAN, 150–160. (in Russian)

Maslennikov V.V., Simonov V.A., Zhukov I.G., Tretyakov G.A., Herrington R., Maslennikova S.P., Kanygin A.V. (2007) [First finds of sulfide chimneys of the Paleozoic black smokers in Central Asia]. *Geologiya morei i okeanov. Materialy XVII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Shkoly) po morskoi geologii [Geology of Seas and Oceans. Proceedings of the XVII International Scientific*

Conference (School) on Marine Geology]. Moscow, GEOS. Vol. II, 47–49. (in Russian)

Maslennikov V.V. (1999) [Sedimentogenesis, halmyrolysis and ecology of paleohydrothermal massive sulfide fields: example of the South Urals]. Miass, Geotur, 348 p. (in Russian)

Maslennikov V.V., Zaikov V.V. (1998) [Paleohydrothermal massive sulfide fields of marginal oceanic structures of the Urals: classification, ore facies, evolution]. Miass, IMin UrO RAN, 92 p. (in Russian)

Maslennikov V.V., Simonov V.A. (2012) [Some problems of evolution of hydrothermal fauna in the impact zones of the Paleozoic black smokers of Rudny Altai]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2012. Gidrotermal'nye polya i rudy [Metallogeny of ancient and modern oceans. Hydrothermal fields and ores]*. Miass, IMin UrO RAN, 65–68. (in Russian)

McDonough W.F., Sun S., Ringwood A.E., Jagoutz E., Hofman A.W. (1992) K, Rb and Cs in the earth and moon and the evolution of the earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **56**, 1001–1012.

Melekestseva I.Yu., Zaykov V.V., Kotlyarov V.A. (2008) [Ore facies of the Vishnevskoe massive sulfide deposit, South Urals]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2008. Rudonosnye komplekсы i rudnye fatsii. [Metallogeny of ancient and modern oceans-2008. Ore-bearing complexes and ore facies]*. Miass, IMin UrO RAN, 16–23. (in Russian)

Mergenov B.M. (1997) [Physicochemical features of the formation of porphyry rocks and mineralization of the Nikolaevskoe deposit, Rudny Altai]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, (1), 59–65. (in Russian)

Naumov V.A. (1975) [Subvolcanic porphyry rocks and mineralization of the Nikolaevskoe deposit]. *Izvestiya AN KazSSR. Seriya Geologiya [Reports of Academy of Sciences of the Kazakh SSR. Series: Geology]*, (5), 55–99. (in Russian)

Naumov V.B., Karpukhina V.S., Baranov E.N., Kononkova N.N. (1999) [Compositions of melts, contents of volatile components and trace elements, crystallization temperatures of quartz from felsic volcanics of the Verkhneural'sk ore region (South Urals)]. *Geokhimiya [Geochemistry]*, (4), 339–351. (in Russian)

Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A., Giris A.V., Yarmolyuk V.V. (2010) Average compositions of igneous melts from main geodynamic settings according to the investigation of melt inclusions in minerals and quenched glasses of rocks. *Geochemistry International*, (12), 1185–1207.

Pospelov G.L., Lapukhov A.S. (1971) [Structure and evolution of fluid dynamic systems with polymorphic zonation: example of the Salair ore field]. In: *Fizicheskie i fiziko-khimicheskie protsessy v dinamicheskikh rudoobrazuyushchikh sistemakh [Physical and*

Physicochemical Processes in Dynamic Ore-Forming Systems. Novosibirsk, Nauka, 8–56. (in Russian)

Rollinson H.R. (1993) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Scientific and Technical, London, 352 p.

Seravkin I.B., Rodicheva Z.A. (1990) [A Kraka-Mednogorsk paleovolcanic belt]. Ufa, BNTs UrO AN SSSR, 53 p. (in Russian)

Simonov V.A. (1993) [Petrogenesis of ophiolites: thermobarogeochemical studies]. Novosibirsk, OIGGM SO RAN, 247 p. (in Russian)

Simonov V.A., Maslennikov V.V. (2020) [Physicochemical conditions of crystallization of minerals-phenocrysts in basaltic complexes hosting massive sulfide deposits of the Urals and Siberia]. *Mineralogiya [Mineralogy]*, **6**(4), 82–102. (in Russian)

Simonov V.A., Gaskov I.V., Kovyazin S.V. (2010) Physicochemical parameters from melt inclusions for the formation of the massive sulfide deposits in the Altai–Sayan Region, Central Asia. *Australian Journal of Earth Sciences*, **57**, 737–754.

Simonov V.A., Gaskov I.V., Kovyazin S.V., Borisenko A.S. (2005) Evolution of the geochemical parameters of silicic melts during the formation of the massive sulfide deposits in Rudnyi Altai. *Doklady Earth Sciences*, **403** (6), 935–938.

Simonov V.A., Kovyazin S.V., Kolmogorov Yu.P. (2001) [Formation conditions of igneous complexes of the Yaman-Kasy and Blyava massive sulfide deposits (South Urals)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2001. Istoriya mestorozhdeniy i evolyutsiya rudoobrazovaniya [Metallogeny of ancient and modern oceans-2001. History of deposits and evolution of ore formation]*. Miass, IMin UrO RAN, 240–247. (in Russian)

Simonov V.A., Kovyazin S.V., Terenya E.O., Maslennikov V.V., Zaykov V.V., Maslennikova S.P. (2006) Physicochemical parameters of magmatic and hydrothermal processes at the Yaman-Kasy massive sulfide deposit, the southern Urals. *Geology of Ore Deposits*, **48**(5), 369–383.

Simonov V.A., Lapukhov A.S., Kovyazin S.V. (2000) [Physicochemical parameters of acidic melts associated with massive sulfide deposits of the Altai-Sayan fold region]. *Geokhimiya magmaticheskikh porod. XIX Vserossiyskiy seminar s uchastiyem stran SNG [Geochemistry of Igneous Rocks. XIX All-Russian Seminar with the Participation of the CIS Countries]*. Moscow, GEOKHI RAN, p. 130. (in Russian)

Simonov V.A., Zaykov V.V., Kovyazin S.V. (1999) [Paleogeodynamic settings of the evolution of hydrothermal systems of the Kyzyl-Tashtyg deposit, East Tuva]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-1999. Rudonosnost gidrotermalnykh sistem [Metallogeny of ancient and modern oceans-1999. Ore potential of the hydrothermal systems]*. Miass, IMin UrO RAN, 16–23. (in Russian)

Sobolev A.V. (1996) [Melt inclusions in minerals as a source of principle petrological information]. *Petrologiya [Petrology]*, **4**(3), 209–220. (in Russian)

Sobolev A.V., Danyushevsky L.V. (1994) Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga Trench: constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas. *Journal of Petrology*, **35**, 1183–1211.

Sobolev A.V., Slutsky A.B. (1984) [Composition and crystallization conditions of parental melts of the Siberian meimechites related to a general problem of ultrabasic magmas]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, (12), 97–110. (in Russian)

Titov A.V., Vladimirov A.G., Kruk N.N., Palesky S.V., Tyutin M.A. (1996) [Petrogenesis and age of volcanic rocks of the Kizilrabad structure (SE Pamir)]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, **37**(5), 62–72 (in Russian)

Vikent'ev I.V., Borisova A.Yu., Karpukhina V.S., Naumov V.B., Ryabchikov I.D. (2012) Direct data on the ore potential of acid magmas of the Uzel'ginskoe ore field (Southern Urals, Russia). *Doklady Earth Sciences*, **443**, 401–405.

Zaykov V.V. (2006) [Volcanism and sulfide mounds of the paleoceanic margins: example of massive sulfide zones of the Urals and Siberia]. Moscow, Nauka, second edition, 429 p. (in Russian)

Zaykov V.V., Shadlun T.N., Maslennikov V.V., Bortnikov N.S. (1995) The Yaman-Kasy massive sulfide deposit (Southern Urals) – the ruins of an ancient black smoker at the seafloor of the Urals paleocean. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, (37), 511–529. (in Russian)