

УДК 548.4: 549.5

DOI: 10.35597/2313-545X-2020-6-4-6

# ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МИНЕРАЛОВ-ВКРАПЛЕННИКОВ В БАЗАЛЬТОВЫХ КОМПЛЕКСАХ, ВМЕЩАЮЩИХ КОЛЧЕДАННЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАЛА И СИБИРИ

В.А. Симонов<sup>1,2,3</sup>, В.В. Масленников<sup>4</sup><sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, просп. Академика Коптюга 3,  
г. Новосибирск, 630090 Россия; zima.simonova1989@yandex.ru, simonov@igm.nsc.ru<sup>2</sup>Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, ул. Пирогова 1,  
г. Новосибирск, 630090 Россия<sup>3</sup>Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская 18, г. Казань, 420008 Россия<sup>4</sup>Южно-Уральский федеральный научный центр минералогии и геоэкологии УрО РАН,  
Институт минералогии, г. Миасс, Челябинская область, 456317 Россия; maslennikov@mineralogy.ru

## PHYSICO-CHEMICAL CONDITIONS OF CRYSTALLIZATION OF MINERALS-PHENOCRYSTS IN BASALTIC COMPLEXES HOSTING MASSIVE SULFIDE DEPOSITS OF THE URALS AND SIBERIA

V.A. Simonov<sup>1,2,3</sup>, V.V. Maslennikov<sup>4</sup><sup>1</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, pr. Akademika Koptuyuga 3, Novosibirsk, 630090  
Russia; zima.simonova1989@yandex.ru, simonov@igm.nsc.ru<sup>2</sup>Novosibirsk National Research State University, ul. Pirogova 1, Novosibirsk, 630090 Russia<sup>3</sup>Kazan Federal University, ul. Kremlevskaya 18, Kazan, 420008 Russia<sup>4</sup>South Urals Federal Research Centre of Mineralogy and Geoecology UB RAS, Institute of Mineralogy,  
Miass, Chelyabinsk district, 456317 Russia; maslennikov@mineralogy.ru

**Аннотация.** В статье рассматриваются физико-химические условия формирования минералов-вкрапленников в базальтовых комплексах, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Сибири. В результате исследования расплавных включений установлено, что клинопироксен из базальтов Валенторского (Северный Урал) и Кызыл-Таштыгского (Южная Сибирь) месторождений кристаллизовался из расплавов, имеющих сходные температурные (1165–1130 и 1210–1085 °С, соответственно) и химические параметры. В обоих случаях эволюция состава базальт-андезитовых магм (с характеристиками магматических систем островных дуг и задуговых бассейнов) происходила с падением содержаний FeO, MgO и CaO и ростом содержаний K<sub>2</sub>O на фоне накопления SiO<sub>2</sub>. Моделирование на основе данных о составе включений и клинопироксена показало, что вкрапленники минералов кристаллизовались в трех промежуточных магматических камерах разной глубины, параметры которых согласуются между собой и с данными по современному надсубдукционному магматизму: Валенторское месторождение – 33–27, 23–13 и 10–3 км, 1185–1090 °С; Кызыл-Таштыгское месторождение – 27–20, 15.0–6.7, 5.0–1.7 км, 1215–1105 °С. Расчеты с использованием составов расплавных включений показывают последовательное изменение расплавов от базальтов до риолитов, свидетельствующее о том, что сочетание контрастных вулканогенных комплексов изученных месторождений является результатом эволюции исходных базальтоидных магм при их подъеме в верхние горизонты. Проведенные исследования пород, клинопироксена и расплавных включений свидетельствуют о том, что базальтовые комплексы Валенторского и Кызыл-Таштыгского месторождений формировались в древней надсубдукционной системе: островная дуга – задуговой бассейн.

**Ключевые слова:** условия кристаллизации минералов, базальтовые комплексы, сульфидные месторождения, клинопироксен, расплавные включения.

**Abstract.** The paper discusses the physico-chemical formation conditions of minerals-phenocrysts in basaltic complexes, which host massive sulfide deposits of the Urals and Siberia. It is found as a result of study of melt inclusions that clinopyroxene from basalts of the Valentorka (North Urals) and Kyzyl-Tashtyg (South Siberia) deposits crystallized from melts with similar temperature (1165–1130 and 1210–1085 °C, respectively) and chemical parameters. In both cases, the compositions of basalt-andesite magmas (with features of igneous island arc and back-arc basin systems) evolved with a decrease in FeO, MgO, and CaO contents and increase in K<sub>2</sub>O and SiO<sub>2</sub> contents. Modeling, which is based on the compositions of inclusions and clinopyroxene, showed that minerals-phenocrysts crystallized from intermediate magma chambers of different depth, the parameters of which are consistent with each other and with data on present-day suprasubduction magmatism: Valentorka deposit – 33–27, 23–13, and 10–3 km, 1185–1090 °C; Kyzyl-Tashtyg deposit – 27–20, 15.0–6.7, and 5.0–1.7 km, 1215–1105 °C. Calculations using compositions of melt inclusions show a consistent change of melts from basalts to rhyolites, indicating that the combination of contrasting volcanic complexes of the deposits studied are a result of the evolution of initial basaltic magmas during their uplift to the upper crustal horizons. Our studies of rocks, clinopyroxene and melt inclusions indicate that the basaltic complexes of the Valentorka and Kyzyl-Tashtyg deposits formed in an ancient suprasubduction island arc – back-arc basin system.

**Key words:** conditions of mineral crystallization, basaltic complexes, massive sulfide deposits, clinopyroxene, melt inclusions.

## Введение

Интенсивные исследования океанических областей свидетельствуют о том, что современные сульфидные рудообразующие системы «черных курильщиков» приурочены к зонам активного магматизма в океанах и задуговых бассейнах. Подобная связь магматических комплексов и гидротермальных сульфидных руд характерна и для древних месторождений (Медноколчеданные..., 1988; Hannington et al., 1998; Кузбный и др., 2001; Зайков, 2006; Масленников, 2006; Симонов и др., 2006; Simonov et al., 2010; Monecke et al., 2016; Симонов, Масленников, 2018). Учитывая это, мы обратили внимание на базальт-риолитовые ассоциации, вмещающие колчеданные месторождения. Всесторонние исследования эталонных объектов с использованием геолого-петрологических, минералогических и термобарогеохимических методов позволили рассмотреть проблемы генетической минералогии, связанные с выяснением физико-химических условий кристаллизации минералов в магматических комплексах, вмещающих колчеданные руды Урала и Сибири. Анализ результатов многолетних работ, проведенных авторами по этой теме (Симонов и др., 1999; 2006; 2009; Симонов, Масленников, 2018; Симонов, Котляров, 2019), показал, что наиболее детальная и представительная информация получена для месторождений Южной Сибири.

В случае этих месторождений (также как и многих других) обращает на себя внимание контрастный состав пород, входящих в базальт-риолитовые комплексы. Данные особенности магматических ассоциаций, вмещающих колчеданные руды, обычно являются следствием целого ряда процессов, крайними вариантами которых могут быть либо совершенно случайное совмещение базальтоидных и гранитоидных магм, либо развитие контрастных расплавов из единого глубинного источника. Большую помощь в решении этих проблем оказывают исследования расплавных включений, несущих прямую информацию о магматических системах, из которых кристаллизовались минералы эффузивных толщ, вмещающих колчеданные месторождения.

При изучении колчеданных месторождений важно установить геологическую обстановку, в которой формировались рудообразующие структуры. Изучение состава клинопироксенов и расплавных включений позволяет установить палеогеодинамические условия развития магматических комплексов, вмещающих колчеданные месторождения. Основой приведенной в статье информации являются результаты исследования образцов, собранных авторами во время совместных (начиная с 1998 г.) экспедиционных работ на Валенторском и Кызыл-Таштыгском колчеданных месторождениях. В статье обобщены опубликованные в тезисах совещаний авторские данные и приводится новая оригинальная информация.

### Методы исследования

Физико-химические условия кристаллизации минералов-вкрапленников в базальтовых комплексах определены с помощью термобарогеохимических исследований включений минералообразующих сред в минералах. В процессе аналитической обработки собранных на Валенторском (Урал) и Кызыл-Таштыгском (Сибирь) месторождениях коллекций эффузивных пород использованы петрологические, минералогические и термобарогеохимические методы, а также расчетное моделирование (на основе данных, полученных по клинопироксенам и расплавленным включениям) физико-химических условий кристаллизации минералов-вкрапленников в базальтовых порфиритах. Все исследования проводились в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск) и в ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

В начале работ были просмотрены петрографические шлифы для выяснения особенностей минерального состава пород, а также тонкие (около 0.2 мм) пластинки, полированные с обеих сторон, для изучения расплавленных включений в минералах. Петрохимический состав пород определен с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на рентгеновском спектрометре ARL-9900-XP фирмы Thermo Electron Corporation. Состав минералов проанализирован на рентгеновском микроанализаторе Camebax-micro. Пределы обнаружения (мас. %) компонентов этим методом следующие:  $\text{SiO}_2$  – 0.007,  $\text{TiO}_2$  – 0.032,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0.011,  $\text{FeO}$  – 0.019,  $\text{MnO}$  – 0.034,  $\text{MgO}$  – 0.011,  $\text{CaO}$  – 0.008,  $\text{Na}_2\text{O}$  – 0.017,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0.009. Стандартами при анализе послужили: ортоклаз (OR), диопсид (DI) и гранат (O-145).

При исследовании расплавленных включений в минералах использовался метод гомогенизации, основанный на классических работах по расплавленным включениям (Магматогенная ..., 1975; Соболев и др., 1976; Бакуменко, 1986). Эксперименты по гомогенизации расплавленных включений при высоких температурах проводились в микротермокамере с инертной средой (Соболев, Слуцкий, 1984) с применением методик (Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994). При завершении эксперимента (мгновенное отключение электрической энергии) в результате закалки полностью расплавленного содержимого включения весь его объем обычно занимает гомогенное стекло. В некоторых случаях при закалке гомогенного расплава во включении может появиться газовый пузырек, и, в

итоге, они содержат гомогенное стекло и флюидную фазу. В статье используются исключительно данные по гомогенным стеклам прогретых гомогенизированных и экспериментально закаленных первичных расплавленных включений, отвечающих по своему химическому составу расплаву, из которого рос минерал. Состав стекол гомогенизированных расплавленных включений также изучен на рентгеновском микроанализаторе Camebax-micro.

Для выяснения физико-химических параметров кристаллизации минералов-вкрапленников в базальтовых комплексах Валенторского и Кызыл-Таштыгского месторождений использовалась последовательная обработка данных, полученных по расплавленным включениям и минералам. В результате высокотемпературных экспериментов в микрокамере определялась температура гомогенизации включений, отвечающая температуре их захвата растущим минералом и, соответственно, температуре его кристаллизации. Далее анализировался химический состав стекол гомогенизированных включений, полученных при их закалке в микротермокамере. В результате получены прямые экспериментальные данные о составе расплава и температуре кристаллизации минерала из этого расплава, на основе которых рассчитывалось давление. Расчеты проводились в программе PETROLOG (Danyushevsky, Plechov, 2011), позволяющей установить давление ликвидусной кристаллизации минералов на основе информации о составе расплава и о его температуре. При расчетах в программу PETROLOG вводятся составы стекол гомогенизированных расплавленных включений и определяются давления, при которых температуры расчетной ликвидусной кристаллизации наиболее близки к экспериментальным температурам гомогенизации расплавленных включений. Таким образом, на основе экспериментальных данных по расплавленным включениям устанавливаются физико-химические параметры (температура, давление и состав расплава) магматических систем, которые, в основном, характеризуют начало кристаллизации вкрапленников.

Вкрапленники в эффузивах обычно обладают сложной историей формирования с широкими диапазонами температур и давлений, о чем прямо свидетельствует наблюдаемая зональность фенокристаллов. В расшифровке этой истории может помочь применение минералогических термометров и барометров. В нашем случае использован ряд минералогических термобарометров, основанных

на особенностях состава клинопироксена (Перчук, 1980; Mercier, 1980; Nimis, Taylor, 2000; Ashchepkov, 2001). Результаты расчета клинопироксеновых термометров и барометров сопоставлены с РТ-параметрами, полученными на основе данных по расплавному включению. В дальнейшем использовались только те характеристики, которые согласуются с данными по включению.

Для определения РТ-условий кристаллизации вкрапленников клинопироксена была также использована программа WinPLtb, основанная на соотношении состава пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется (Clinopyroxene-Liquid Thermobarometry) (Yavuz, Yildirim, 2018). Состав расплава оценен на основе анализа стекол гомогенизированных включений в изученных клинопироксенах из эффузивов колчеданных месторождений Урала и Сибири. В расчетах в этой программе использованы известные термобарометры (Putirka, 2008; Masotta et al, 2013). Результаты применения данного метода также были сопоставлены с РТ-параметрами, полученными на основе данных по расплавному включению.

Глубина кристаллизации минералов в магматических камерах оценена на основе давления, установлена с помощью описанных выше методов и расчетных программ. При этом учитывалась плотность пород базальтового состава, которая, согласно справочным данным из сети интернета, имеет следующие значения: базальт (твердая фаза) – около 2.97 г/см<sup>3</sup>, диабаз-базальт – 2.7–3.3 г/см<sup>3</sup>, неветрелое габбро – 2.8–3.2 г/см<sup>3</sup>. Нами использовано среднее из всех этих данных – ~3 г/см<sup>3</sup>. Учитывая плотностные характеристики базальтовых пород (~3 г/см<sup>3</sup>), установлено, что 1 кбар достигается на глубине ~3.33 км. Особенности эволюции физико-химических параметров магматогенной кристаллизации минералов эффузивных комплексов, вмещающих колчеданные месторождения, рассмотрены с помощью моделирования в программе COMAGMAT (Ariskin, Barmina, 2004) с использованием состава стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене. Моделировалась равновесная декомпрессионная кристаллизация.

#### **Геологическое строение месторождений и минеральный состав руд**

*Валенторское медно-цинково-колчеданное месторождение* располагается в северной части Та-

гило-Сакмарской зоны (Северный Урал). Рудные тела месторождения вмещаются силурийским риолит-базальтовым комплексом (рис. 1). В разрезе месторождения выделяются три толщи: 1) подущечные базальты, диабазы, гиадокластиты, яшмы и силициты; 2) андезиты и дациты с телами подрудных андезибазальтов и колчеданными залежами; 3) надрудные гематитизированные риодациты, андезидациты и риолиты с телами андезибазальтов (Медноколчеданные..., 1988; Контарь, 1998; Масленников, 2006) (рис. 2).

В пределах рудного поля Валенторского месторождения разведано 15 рудных тел, представленных прожилково-вкрапленными, реже массивными рудами. Все рудные залежи расположены под толщей гематитизированных пород, образуя единый рудный уровень. Простирание тел субширотное и северо-восточное с пологим падением к центру согласно с напластованием вмещающих пород. Руды имеют пирит-халькопиритовый, реже пиритовый и пирит-сфалеритовый состав. Массивные разновидности руд образуют пластообразные залежи (Медноколчеданные..., 1988). Наиболее крупное рудное тело залегает на верхнем уровне под риодацитами. Рудная залежь реконструируется как слабо разрушенный сульфидный холм, сохранившийся благодаря режиму интенсивного вулканизма (Масленников, 2012). Нижняя часть холма сложена массивным крупнозернистым пиритом с реликтами участков первичного сфалерита. В ядре тела преобладают богатые халькопирит-пиритовые руды. На выклинивании рудных тел локализуются борнитовые и сфалеритовые слоистые диагенинты, а среди хлоритизированных гиадокластитов имеются прослои сульфидных турбидитов и госсанитов – яшмовидных продуктов окисления сульфидов (Масленников, 2006). В рудах обнаружены многочисленные фрагменты пирит-халькопиритовых и халькопирит-пирит-сфалеритовых труб серых и белых курильщиков, содержащих самородное золото, галенит, гессит, штюцит, эмрессит, сильванит, самородный теллур, а также обильные включения минералов серии теллуrowисмутит-кочкарит-раклиджит (Масленникова, Масленников, 2007; Maslennikov et al., 2013; 2017). В борнитовых и сфалеритовых диагенинтах встречаются самородное золото, гессит, алтаит, кервеллит и минералы группы колусита (Maslennikov et al., 2019).

*Кызыл-Таштыгское сульфидное месторождение* находится в Восточной Туве и располагается среди нижнекембрийских вулканогенных пород,



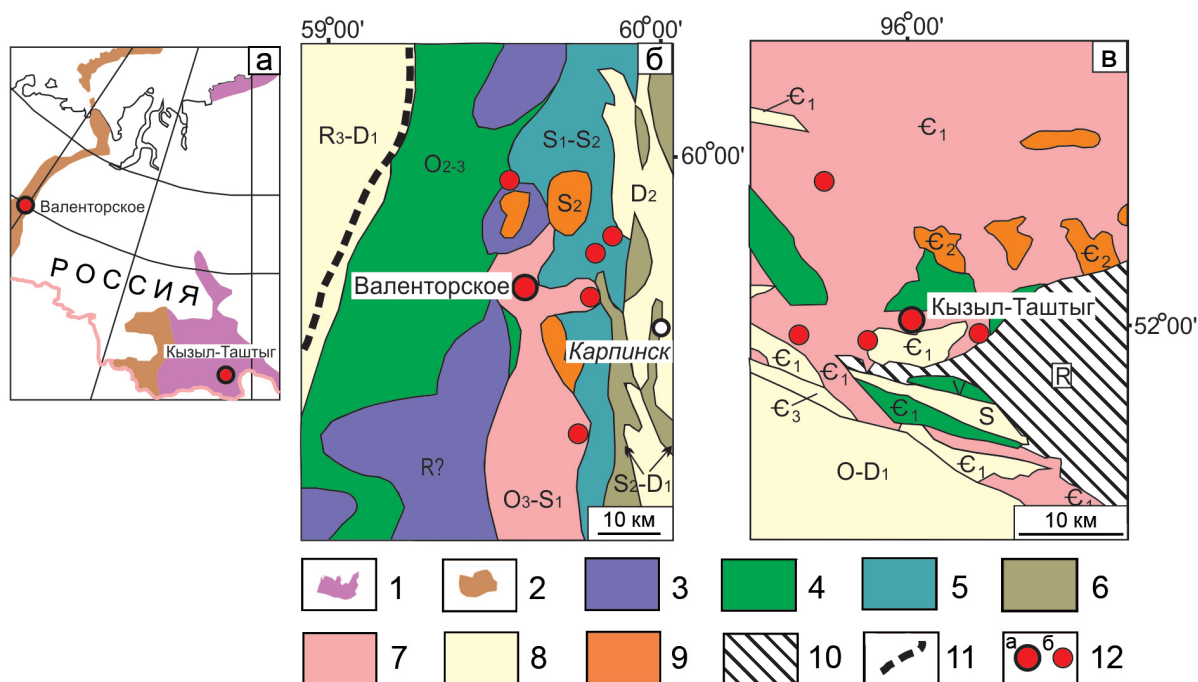


Рис. 1. Географическая (а) и геологическая позиция Валенторского (б) и Кызыл-Таштыгского (в) колчеданных месторождений (составлена с упрощениями по данным (Контарь, 2001; Зайков, 2006)).

1 – байкалиты; 2 – герциниты; 3–10 – формации: 3 – ультрамафитовые, 4 – толеитовые, 5 – андезитовые, 6 – трахибазальт-трахитовые, 7 – толеит-риолитовые и риолит-толеитовые, 8 – вулканогенно-осадочные и осадочные, 9 – гранитоидные, 10 – метаморфизованные вулканогенно-осадочные; 11 – Главный Уральский разлом; 12 – колчеданные месторождения (а) и рудопроявления (б).

Fig. 1. Geographical (a) and geological setting of the Valentorka (б) and Kyzyl-Tashtyg (в) massive sulfide deposits, simplified after (Kontar, 2001; Zaykov, 2006).

1 – Baikaledes; 2 – Hercynides; 3–10 – rock complexes: 3 – ultramafic, 4 – tholeiitic, 5 – andesitic, 6 – trachibasalt-trachitic, 7 – tholeiite-rhyolitic and rhyolite-tholeiitic, 8 – volcanosedimentary and sedimentary; 9 – granitoid, 10 – metamorphosed volcanosedimentary; 11 – Main Uralian Fault; 12 – massive sulfide deposits (a) and occurrences (b).

представленных базальтами и дацитами, перемежающимися с андезибазальтами, гиадокластитами, гиадокластитовыми тифроидами и сульфидно-углеродистыми сланцами (рис. 1). Рудоносные базальтовые серии представлены двумя толщами. Нижняя толща сложена базальтами с горизонтами и пачками вулканокластических брекчий. Верхняя толща имеет сложный состав и включает базальты, андезибазальты, дациты и риолиты, вулканомиктовые брекчии и туфы (Берман, 1960; Кузбный и др., 1990, 2001; Зайков, 1991; 2006; Herrington et al., 1999; Гасков, 2020; Кузнецов и др., 2020). В надрудной толще представлены черные сланцы, ксенолавы и ксенолавокластиты кислого и основного составов, содержащие обломки гематит-кварцевых пород, гранитов, черных сланцев и колчеданных руд, а также рудовмещающих эффузивных пород и метасоматитов (Зайков, 2006) (рис. 2). Палеогидротермальное поле с промышленными колчедан-

но-полиметаллическими рудами находится в низах разреза верхней толщи. Рудоподводящая часть гидротермальной системы, выраженная зонами серицит-кварцевых метасоматитов с сульфидными и баритовыми жилами, локализована преимущественно в нижней толще.

В строении месторождения выделяются корневые зоны, представленные прожилково-вкрапленными кварц-халькопирит-пиритовыми и пиритовыми рудами. Серноколчеданная часть главной залежи является реликтом сульфидного холма (Ковалев и др., 2004). Основная часть залежи сложена массивными и брекчиевидными халькопирит-сфалеритовыми и пирит-галенит-сфалеритовыми разновидностями. Верхние, а также фланговые части залежи представлены слоистыми барит-полиметаллическими рудами (Зайков, 2006; Melekestseva et al., 2007; Кужугет, Анкушева, 2016), ассоциирующими с хлоритолитами и доломитолитами.

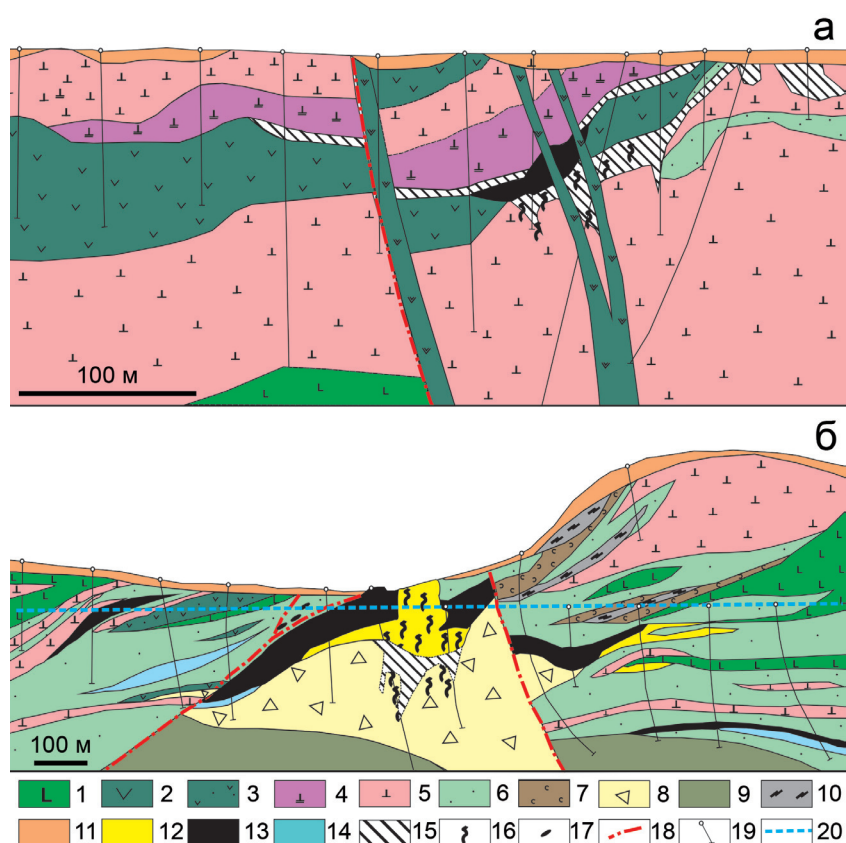


Рис. 2. Геологические разрезы Валенторского (а) и Кызыл-Таштыгского (б) колчеданных месторождений (составлены с упрощениями по данным (Контарь, 2001; Зайков, 2006) и с учетом дополнительных данных по картированию карьеров).

1 – базальты и долериты; 2 – андезибазальты и их гиалокластиты; 3 – псаммитовые тейфроиды андезибазальтового состава; 4 – андезидациты и дациты; 5 – риолиты и дациты; 6 – дезинтегрированные эффузивы и их тейфроиды кислого состава; 7 – ксенолавокластиты кислого состава; 8 – автобрекчии дацитов штокверковой зоны; 9 – хлоритовые и хлорит-серицитовые сланцы; 10 – углеродистые алевропелиты; 11 – четвертичные отложения; 12–17 – руды: 12 – серный колчедан, 13 – медно-цинковые и колчеданно-полиметаллические руды, 14 – барит-полиметаллические, 15 – вкрапленные руды, 16 – штокверк, 17 – будины руды; 18 – разломы; 19 – скважины; 20 – штольня. Пунктиром показаны предполагаемые границы.

Fig. 2. Geological sections of the Valentorka (a) and Kyzyl-Tashtyg (b) massive sulfide deposits, simplified after (Kontar, 2001; Zaykov, 2006) and modified taking into account additional results of mapping of open pits.

1 – basalts and dolerites; 2 – basaltic andesites and their hyaloclastites; 3 – psammitic tefroids of basaltic andesite composition; 4 – dacitic andesites and dacites; 5 – rhyolites and dacites; 6 – disintegrated effusive rocks and their tefroids of felsic composition; 7 – felsic xenolavoclastites; 8 – dacite autobreccias of stockwork zone; 9 – chlorite and chlorite-sericite schists; 10 – carbonaceous siltstones; 11 – Quaternary sediments; 12–17 – ores: 12 – pyrite ore, 13 – copper-zinc and massive sulfide polymetallic ore, 14 – barite-polymetallica ore, 15 – disseminated ore, 16 – stockwork, 17 – ore boudines; 18 – faults; 19 – holes; 20 – adit. Dash shows inferred boundaries.

Основной объем верхней части главной рудной залежи Кызыл-Таштыгского месторождения занимает рудная брекчия, сложенная обломками пирит-халькопиритовых руд, сцементированных темно-серой микрозернистой сфалеритовой массой (Симонов и др., 2012). Другой тип сульфидных брекчий сложен крупнозернистыми сфалеритовыми и халькопирит-сфалеритовыми обломками (Кузнецов и др., 2020). В некоторых обломках уга-

дывается минеральная зональность, характерная для серых и белых курильщиков. Агрегаты обломочного сфалерита и вюртцита содержат вкрапленность халькопирита, структура которой напоминает «халькопиритовую болезнь», характерную для современных курильщиков.

В медно-цинковых рудах, также как и на Валенторском месторождении, кроме халькопирита, сфалерита, пирита и тетраэдрит-теннатита, обна-

ружены минералы серии теллурувисмутит-раклиджит и клаусталит. По данным ЛА-ИСП-МС, кроме теллуридов Bi, выявлены теллуриды Ag. В полиметаллических рудах появляются галенит, Zn-теннантит-тетраэдрит (Ag до 1.35 мас. %) и кервеллит. В барит-полиметаллических рудах также обнаружен акантит (Кужугет, Анкушева, 2016) и пирсеит (Зайков, 2006). Относительно редкими для месторождения являются гессит, энаргит, силванит, прустит, самородное золото (Кузевный и др., 2001). Самородное золото и электрум встречены почти во всех типах руд (Ковалев и др. 2004; Зайков, 2006).

### Результаты исследований

*Петролого-минералогические особенности магматических комплексов, вмещающих месторождения.* Коллекция пород Валенторского месторождения характеризует риолит-базальтовый комплекс. По минеральному составу это преимущественно андезибазальты с вкрапленниками клинопироксена и плагиоклаза, а также кварцевые риолиты. По содержанию  $\text{SiO}_2$  (52–72 мас. %) изученные породы варьируют от базальтов до андезитов и риодацитов. По соотношению суммы щелочей и  $\text{SiO}_2$  все породы принадлежат серии с нормальной щелочностью. На диаграмме  $\text{TiO}_2$ – $\text{K}_2\text{O}$  точки состава эффузивов, вмещающих Валенторское месторождение, располагаются преимущественно в поле островодужных пород (рис. 3).

Практически все изученные образцы интенсивно изменены, и только в андезибазальтах сохранился первичный магматогенный клинопироксен, состав которого соответствует авгиту (табл. 1). По соотношению  $\text{TiO}_2$  и FeO авгит из эффузивов Валенторского месторождения показывает, в основном, островодужные характеристики, но практически половина значений приурочена также к полю пироксенов задугового бассейна Лау в Тихом океане (рис. 4). Соответствие клинопироксена минералам из окраинно-морских эффузивов подтверждается данными диаграммы  $\text{Ti}+\text{Cr}-\text{Ca}$ , где все точки составов попадают в поле пироксенов задугового бассейна Лау, располагаясь одновременно в областях минералов из пород спрединговых зон (базальтов типа MORB, характерных для срединно-океанических хребтов и присутствующих в задуговых бассейнах) и островных дуг (рис. 4).

Среди образцов эффузивных пород, вмещающих Кызыл-Таштыгское месторождение, наиболее

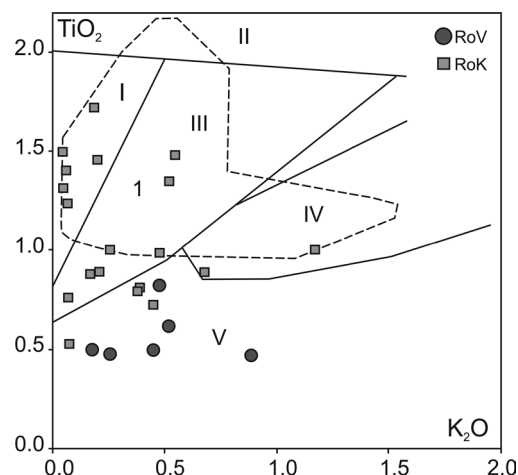


Рис. 3. Диаграмма  $\text{TiO}_2$ – $\text{K}_2\text{O}$  для эффузивных пород (мас. %) Валенторского (RoV) и Кызыл-Таштыгского (RoK) колчеданных месторождений.

1 – поле базальтовых пород и расплавных включений в оливинах бассейна Вудларк, Тихий океан. Здесь и на рис. 5, I–V – области пород: I – нормальные базальты срединно-океанических хребтов (N-MORB), II – плюмовые базальты океанических островов (OIB), III – обогащенные базальты срединно-океанических хребтов (E-MORB) и базальты задуговых бассейнов (BABBB), IV – аномальные базальты задуговых бассейнов (ABABBB), V – базальты островных дуг. Здесь и на рис. 5, диаграмма составлена на основе оригинальных данных с использованием материалов из работ (Миронов, 1990; Dril et al., 1997; Симонов и др., 1999; Добрецов и др., 2005).

Fig. 3.  $\text{TiO}_2$ – $\text{K}_2\text{O}$  diagram for effusive rocks (wt. %) of the Valentorka (RoV) and Kyzyl-Tashtyg (RoK) massive sulfide deposits.

1 – field of basaltic rocks and melt inclusions in olivine of the Woodlark basin, Pacific Ocean. Here and in Fig. 5, I–V – rock areas: I – normal mid-oceanic ridge basalts (N-MORB), II – plume oceanic island basalts (OIB), III – enriched mid-oceanic ridge basalts (E-MORB) and back-arc basin basalts (BABBB), IV – anomalous back-arc basin basalts (ABABBB), V – island arc basalts. Here and in Fig. 5, the diagram is based on our data and materials from (Mironov, 1990; Dril et al., 1997; Simonov et al., 1999; Dobretsov et al., 2005).

детально изучены базальты и долериты нижней и верхней толщ, содержащие свежие вкрапленники клинопироксена. По соотношению суммы щелочей и  $\text{SiO}_2$  (47–55 мас. %) породы принадлежат базальтам и андезибазальтам нормальной щелочности. На диаграмме  $\text{TiO}_2$ – $\text{K}_2\text{O}$  эффузивы, находятся в поле базальтов задуговых бассейнов, а также в области пород срединно-океанических хребтов типа N-MORB и островных дуг. При этом большинство из них попадает в поля пород и расплавных включений задугового бассейна Вудларк в Тихом

Таблица 1

Представительные анализы (мас. %) вкрапленников клинопироксена из базальтов  
Валенторского (1–20) и Кызыл-Таштыгского (21–43) колчеданных месторождений

Table 1

Representative analyses (wt. %) of clinopyroxene phenocrysts from basalts of the Valentorka (1–20)  
and Kyzyl-Tashtyg (21–43) massive sulfide deposits

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	Сумма	Mg#
1	1	51.98	0.35	2.53	7.96	0.17	16.64	19.93	0.29	99.86	78.84
2	11	51.79	0.38	2.85	6.95	0.18	16.58	19.93	0.27	98.93	80.96
3	17	51.59	0.34	2.99	7.39	0.23	16.89	19.42	0.29	99.14	80.29
4	22	51.65	0.37	2.45	8.77	0.26	17.26	17.50	0.28	98.54	77.81
5	23	51.50	0.33	2.58	9.09	0.27	17.20	17.49	0.30	98.76	77.13
6	31	51.12	0.39	3.02	8.46	0.26	16.97	18.25	0.29	98.76	78.14
7	42	51.00	0.39	3.01	8.24	0.20	16.41	18.85	0.27	98.38	78.02
8	43	51.14	0.37	3.23	7.63	0.22	16.97	19.10	0.31	98.97	79.85
9	49	51.76	0.35	3.17	7.16	0.20	16.84	19.86	0.29	99.63	80.74
10	50	51.93	0.37	3.24	7.06	0.21	16.39	19.96	0.38	99.54	80.53
11	55	52.25	0.32	2.51	5.91	0.15	17.02	20.69	0.35	99.19	83.69
12	66	52.97	0.20	1.83	4.96	0.17	17.52	21.29	0.18	99.12	86.29
13	69	51.73	0.37	2.54	7.64	0.24	16.74	18.86	0.30	98.42	79.61
14	78	51.66	0.34	2.65	7.42	0.22	16.26	19.94	0.34	98.82	79.61
15	79	51.37	0.45	2.93	9.62	0.29	16.90	17.26	0.36	99.18	75.79
16	86	50.99	0.40	3.10	9.52	0.26	16.15	17.56	0.37	98.34	75.14
17	20	51.59	0.47	2.57	8.46	0.22	16.55	18.81	0.31	98.98	77.71
18	21	51.55	0.45	3.21	7.21	0.22	15.49	20.32	0.30	98.76	79.29
19	30	53.03	0.30	1.87	6.46	0.12	16.71	20.40	0.41	99.31	82.17
20	33	51.50	0.41	3.17	6.99	0.16	15.88	20.20	0.29	98.60	80.19
21	1-1A	51.58	0.34	2.21	8.27	0.24	17.06	18.91	0.19	98.80	78.61
22	1-1B	51.99	0.33	2.20	7.26	0.23	16.98	19.77	0.17	98.94	80.65
23	1-1C	51.75	0.33	2.57	6.71	0.19	16.88	20.57	0.18	99.18	81.76
24	1-1E	50.75	0.35	3.76	5.46	0.15	16.05	21.75	0.18	98.45	83.97
25	1-1F	50.22	0.47	3.59	6.82	0.14	15.67	21.24	0.23	98.37	80.37
26	1-2B	50.92	0.45	3.52	4.97	0.16	16.30	22.12	0.17	98.61	85.39
27	1-2C	50.67	0.59	3.62	5.82	0.18	16.01	21.61	0.20	98.70	83.06
28	1-3B	51.46	0.32	2.13	7.58	0.22	16.75	19.81	0.17	98.45	79.75
29	1-4B	49.22	0.82	4.17	8.98	0.45	15.12	19.71	0.22	98.69	75.00
30	1-5A	50.33	0.33	4.21	5.28	0.15	16.22	21.63	0.18	98.33	84.55
31	1-6B	51.51	0.42	2.07	8.10	0.26	17.13	18.80	0.16	98.44	79.03
32	1-6F	51.57	0.30	2.21	7.04	0.21	16.83	20.04	0.17	98.37	80.99
33	1-6G	51.71	0.29	2.03	7.84	0.22	16.73	19.31	0.19	98.32	79.18
34	8/31	51.83	0.24	3.55	5.52	0.10	16.15	21.70	0.13	99.23	83.91
35	9/35	52.49	0.19	2.85	6.40	0.16	16.52	20.89	0.18	99.69	82.14
36	10/38	51.77	0.32	3.56	6.08	0.12	15.99	21.43	0.14	99.42	82.41
37	1/6	51.28	0.24	3.54	6.49	0.16	15.59	21.46	0.25	99.01	81.06
38	2/1	51.37	0.17	3.25	6.43	0.19	15.91	21.73	0.21	99.26	81.51
39	3/8	52.23	0.20	2.86	5.50	0.17	16.70	21.23	0.18	99.07	84.40
40	4/13	50.57	0.23	3.27	6.45	0.17	16.17	21.68	0.22	98.76	81.71
41	5/17	51.04	0.25	2.92	7.55	0.21	15.97	20.72	0.24	98.90	79.03
42	6/24	51.05	0.27	2.46	9.69	0.23	15.00	19.93	0.29	98.92	73.39
43	1/5	51.22	0.50	3.35	8.60	0.25	15.30	19.84	0.34	99.40	76.02

Примечание. Mg# =  $Mg \cdot 100 / (Mg + Fe)$ , ф. е.

Note. Mg# =  $Mg \cdot 100 / (Mg + Fe)$ , f. u.

океане (рис. 3). Такое сочетание петрохимических характеристик характерно для развивающейся геодинамической системы островная дуга – задуговой бассейн.

Анализ вкрапленников клинопироксена (табл. 1) из базальтов месторождения показал, что по соотношению миналов (En–Wo–Fs) подавляющее их большинство относится, как и пироксены Вален-



торского месторождения, к авгиту. На диаграмме  $\text{TiO}_2$ – $\text{FeO}$  (рис. 4) точки клинопироксена из базальтов, вмещающих Кызыл-Таштыгское месторождение, перекрывают границу между океаническими и островодужными минералами и попадают в поле пироксенов из эффузивов задугового бассейна Лай. По соотношению  $\text{Ti}+\text{Cr}-\text{Ca}$  (рис. 4) клинопироксены, в основном, показывают островодужные характеристики, а часть из них соответствует минералам из базальтов срединных зон типа MORB, характерных для срединно-океанических хребтов и присутствующих в задуговых бассейнах. При этом подавляющее большинство данных находится в поле пироксенов задугового бассейна Лай. В целом, состав клинопироксена из базальтов подтверждает петрохимическую информацию о формировании Кызыл-Таштыгского месторождения в условиях древнего задугового бассейна.

*Расплавные включения в минералах рудовмещающих базальтовых комплексов.* Несмотря на древний возраст и значительную степень вторичных преобразований магматических комплексов, вмещающих сульфидные руды Валенторского и Кызыл-Таштыгского месторождений, вкрапленники клинопироксена из базальтов (андезибазальтов) сохранили расплавные включения.

Для Валенторского месторождения наиболее представительные данные получены в результате изучения фенокристаллов клинопироксена. Первичные расплавные включения (10–30 и до 60 мкм) располагаются равномерно по всему зерну и в центре вкрапленников. Форма включений округло-ограниченная, уплощенная, соответствующая очертаниям кристаллов пироксена. Включения содержат выдержанный набор фаз: светлые кристаллы плагиоклаза + светло-коричневые пироксены + светлое стекло по краям включения + флюидный пузырек. Реже присутствуют идиоморфные темные рудные фазы. В ходе экспериментов в микротермокамере содержимое включений становится гомогенным при температурах 1130–1165 °С. В результате последующей закалки обычно весь объем включений занимает гомогенное стекло.

По содержанию  $\text{SiO}_2$  и  $\text{MgO}$  состав закаленных стекол гомогенизированных включений в клинопироксене Валенторского месторождения варьирует от андезибазальтов до андезитов (табл. 2). По соотношениям  $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$  и  $\text{FeO}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$  включения соответствуют расплавам нормальной щелочности. На диаграмме  $\text{TiO}_2$ – $\text{K}_2\text{O}$  большинство включений располагается в области островодуж-

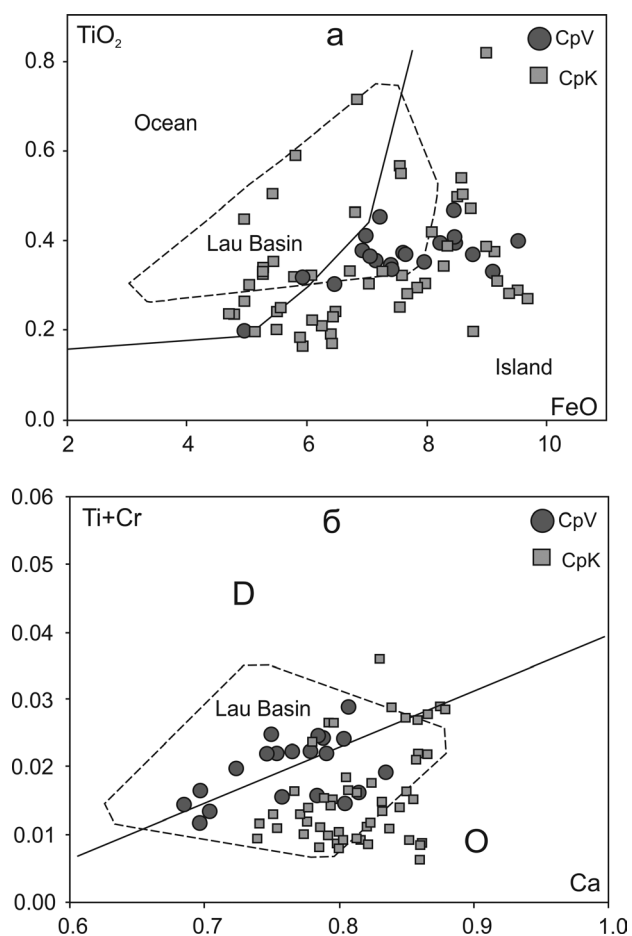


Рис. 4. Диаграммы  $\text{TiO}_2$ – $\text{FeO}$  (мас. %) (а) и  $\text{Ti}+\text{Cr}-\text{Ca}$  (ф.е.) (б) для клинопироксенов из базальтовых эффузивных пород Валенторского (CpV) и Кызыл-Таштыгского (CpK) колчеданных месторождений.

Поля клинопироксенов из базальтов срединно-океанических хребтов (Ocean), островных дуг (Island), задугового бассейна Лай в Тихом океане (Lau Basin) и базальтов срединных зон типа MORB (D) и островных дуг (O). Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов (Leterrier et al., 1982; Frenzel et al., 1990).

Fig. 4.  $\text{TiO}_2$ – $\text{FeO}$  (wt. %) (a) and  $\text{Ti}+\text{Cr}-\text{Ca}$  (f.u.) (b) diagrams for clinopyroxene from basaltic effusive rocks of the Valentorka (CpV) and Kyzyl-Tashtyg (CpK) massive sulfide deposits.

Fields of clinopyroxene from basalts of mid-oceanic ridges (Ocean), island arcs (Island Arc), Lau back-arc basin in Pacific Ocean (Lau Basin), and basalts of spreading zones of MORBs (D) and island arcs (O). Figure is based on our data and materials from (Leterrier et al., 1982; Frenzel et al., 1990).

ных серий, но их существенная часть находится в поле аномальных базальтов задуговых бассейнов (рис. 5). Эти особенности подтверждаются соотношением  $\text{TiO}_2$ – $\text{FeO}/\text{MgO}$ , свидетельствующем

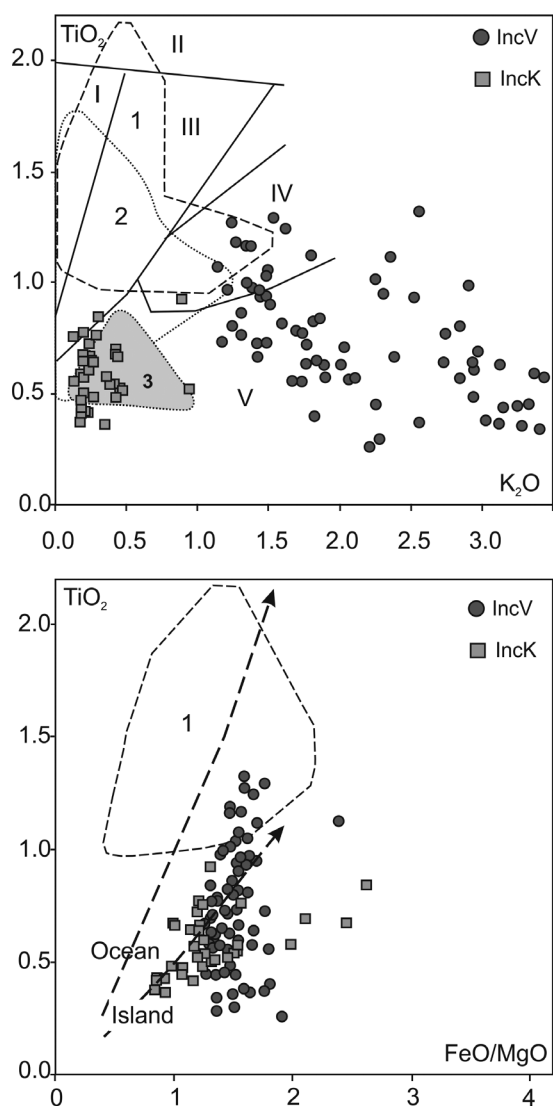


Рис. 5. Диаграммы  $\text{TiO}_2\text{--K}_2\text{O}$  и  $\text{TiO}_2\text{--FeO/MgO}$  для составов гомогенных стекол прогретых расплавных включений (мас. %) в клинопироксене из базальтовых эффузивных пород Валенторского (IncV) и Кызыл-Таштыгского (IncK) колчеданных месторождений.

1–3 – поля составов базальтовых пород и расплавных включений бассейна Вудларк в Тихом океане (1) и эффузивных пород Кызыл-Таштыгского (2) и Валенторского (3) месторождений. Тренды базальтовых пород срединно-океанических хребтов (Ocean) и островных дуг (Island).

Fig. 5.  $\text{TiO}_2\text{--K}_2\text{O}$  and  $\text{TiO}_2\text{--FeO/MgO}$  diagrams for compositions of homogeneous glasses from heated melt inclusions (wt. %) in clinopyroxene from basaltic effusive rocks of the Valentorka (IncV) and Kyzyl-Tashtyg (IncK) massive sulfide deposits.

1–3 – compositional fields of basaltic rocks and melt inclusions of the Woodlark basin in Pacific Ocean (1) and effusive rocks of the Kyzyl-Tashtyg (2) and Valentorka (3) deposits. Trends of basalts of the mid-oceanic ridges (Ocean) and island arcs (Island).

о соответствии данных по включениям островодужному тренду с расположением значительной части точек в поле составов базальтовых пород и расплавных включений бассейна Вудларк (рис. 5). На вариационных диаграммах составы включений формируют отчетливые тренды, фиксируя эволюцию расплавов в ходе развития магматических систем с падением содержаний  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$  и ростом содержаний  $\text{K}_2\text{O}$  на фоне накопления  $\text{SiO}_2$  в стеклах гомогенных включений (рис. 6).

Для Кызыл-Таштыгского месторождения наиболее представительная информация получена при изучении расплавных включений в клинопироксене из базальтов. Первичные расплавные включения размером 3–35 мкм равномерно располагаются в центральных частях фенокристаллов. Форма включений – округлая, таблитчатая. Включения многофазные: несколько светлых и темных кристаллических фаз + светлое стекло + флюидный пузырек + рудные фазы. Температуры полной гомогенизации расплавных включений из пироксенов нижней толщи составляют 1085–1165 °C, включений из пироксенов нижней толщи вблизи контакта с верхней – 1130–1210 °C и включений из пироксенов верхней толщи – 1120–1190 °C. Судя по этим данным, температуры базальтовых расплавов, формировавших нижнюю и верхнюю толщи, существенно не отличались.

Состав стекол прогретых и гомогенизированных расплавных включений в клинопироксене соответствует базальту и андезитобазальту нормальной щелочности (табл. 2). По соотношению  $\text{FeO/MgO--SiO}_2$  точки состава располагаются на границе толеитовых и известково-щелочных серий. На диаграмме  $\text{TiO}_2\text{--K}_2\text{O}$  большинство включений располагается в области островодужных серий, попадая частично в поля базальтов задуговых бассейнов (рис. 5). По соотношению  $\text{TiO}_2\text{--FeO/MgO}$  включения соответствуют островодужному тренду (рис. 5). На вариационных диаграммах зависимости содержания химических компонентов от количества  $\text{SiO}_2$  точки составов включений ассоциируют с полем базальтовых пород и расплавных включений бассейна Вудларк. При этом они располагаются в начале трендов расплавных включений в пироксене Валенторского месторождения, прослеживающих падение  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$  и рост  $\text{K}_2\text{O}$  на фоне накопления  $\text{SiO}_2$  в стеклах гомогенных включений (рис. 6).

РТ-условия кристаллизации минералов-вкрапленников в базальтовых рудовмещающих комплексах

Таблица 2

**Представительные анализы (мас. %) стекол гомогенизированных расплавных включений во  
вкрапленниках клинопироксена из базальтов Валенторского (1–23) и Кызыл-Таштыгского (24–38)  
месторождений**

Table 2

**Representative analyses (wt. %) of glasses of homogenized melt inclusions in clinopyroxene phenocrysts from  
basalts of the Valentorka (1–23) and Kyzyl-Tashtyg (24–38) massive sulfide deposits**

№ п/п	№ анализа	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	T <sub>гом</sub>
1	5	57.34	1.07	13.11	8.64	0.19	5.57	8.97	2.32	1.15	98.36	1140
2	6	59.98	0.86	13.50	7.58	0.17	5.08	8.46	2.55	1.31	99.49	1140
3	7	60.22	0.76	12.75	7.52	0.16	5.72	9.19	1.86	1.31	99.49	1140
4	32	59.37	0.65	13.91	6.93	0.15	4.91	7.84	2.79	1.84	98.39	1165
5	34	55.31	0.97	14.04	8.27	0.20	5.89	9.02	2.70	1.39	97.79	1165
6	37	54.62	1.16	13.45	9.02	0.14	6.12	9.34	2.42	1.37	97.64	1165
7	38	58.40	0.82	13.70	7.57	0.14	5.20	8.11	2.38	1.82	98.14	1165
8	51	56.95	0.80	15.12	6.86	0.14	4.52	7.08	2.90	2.84	97.21	1130
9	58	60.19	0.44	15.68	5.15	0.09	3.77	6.32	2.88	3.25	97.77	1130
10	60	56.52	0.69	15.87	6.10	0.12	4.66	7.51	3.17	2.97	97.61	1130
11	61	61.09	0.28	16.70	4.26	0.05	3.12	5.54	3.00	3.74	97.77	1130
12	70	58.20	0.63	14.24	6.72	0.11	5.08	8.20	2.57	2.01	97.76	1145
13	71	56.92	0.84	14.00	7.08	0.14	5.39	8.59	2.54	1.86	97.35	1145
14	74	59.26	0.57	13.60	6.72	0.12	4.82	7.64	2.50	2.11	97.34	1145
15	83	54.47	1.12	14.80	12.04	0.21	5.05	7.07	2.68	1.80	99.24	1165
16	13	61.15	0.37	16.01	4.65	0.06	2.82	5.80	4.16	3.12	98.14	1140
17	16	60.13	0.73	13.61	6.28	0.16	4.38	7.69	3.47	1.49	97.94	1140
18	17	58.06	1.00	13.44	7.20	0.18	5.06	8.35	3.17	1.35	97.80	1140
19	22	57.79	0.99	15.80	5.67	0.13	4.00	7.17	3.96	2.91	98.42	1130
20	23	59.66	0.59	16.36	4.95	0.09	3.20	6.06	4.20	3.37	98.47	1130
21	25	55.59	1.32	15.26	7.46	0.15	4.66	7.58	3.61	2.56	98.19	1130
22	27	56.98	0.93	16.34	5.99	0.13	3.72	7.26	4.51	2.52	98.38	1130
23	32	56.45	0.96	15.34	7.23	0.11	4.64	9.46	3.07	1.44	98.70	1130
24	6/22	53.10	0.72	8.78	10.74	0.22	8.89	14.2	1.25	0.24	98.14	1190
25	6/23	54.33	0.66	8.9	11.08	0.24	9.05	13.65	1.26	0.24	99.41	1190
26	6/24	53.17	0.64	9.48	10.53	0.21	9.14	13.85	1.22	0.26	98.50	1190
27	7/26	53.34	0.58	10.97	13.47	0.30	6.77	11.4	1.68	0.19	98.70	1140
28	7/27	53.70	0.67	10.74	14.32	0.30	5.83	10.46	1.91	0.20	98.13	1140
29	7/28	53.56	0.84	11.05	14.19	0.30	5.42	10.02	1.98	0.3	97.66	1140
30	7/29	52.12	0.55	9.09	13.39	0.31	8.68	13.32	1.36	0.13	98.95	1140
31	9/36	51.82	0.50	10.72	11.59	0.30	8.71	12.02	1.68	0.20	97.54	1180
32	10/42	52.57	0.57	11.00	9.52	0.24	8.08	14.18	1.90	0.20	98.26	1170
33	1/7	51.66	0.48	12.87	8.00	0.21	8.09	13.43	2.02	0.27	97.03	1130
34	2/2	53.07	0.36	9.78	8.20	0.20	8.74	14.55	1.82	0.35	97.07	1170
35	1/6	50.81	0.75	10.55	11.07	0.23	8.82	16.45	0.9	0.13	99.71	1160
36	3/15	51.46	0.92	13.5	9.78	0.19	7.43	11.23	1.61	0.90	97.02	1110
37	4/17	51.73	0.67	11.31	8.77	0.16	8.76	13.24	2.03	0.43	97.10	1165
38	5/20	53.83	0.76	13.45	10.45	0.25	6.66	11.43	1.63	0.29	98.75	1115

Примечание. T<sub>гом</sub> – температуры гомогенизации включений, °C.

Note. T<sub>гом</sub> – homogenization temperatures of inclusions, °C.

сах. В результате исследований с помощью программ PETROLOG и расчетов с использованием минералогических термобарометров установлено, что клинопироксены из базальтов Валенторского месторождения кристаллизовались в промежуточных камерах при разных давлениях (10–8, 7–4 и 3–1 кбар) и, соответственно, на разных глубинах.

Фенокристаллы начали образовываться на тех же глубинах (около 33–27 км), что и пироксены из эффузивов Идзу-Бонинской островной дуги (Тихий океан). Основная камера, где происходила кристаллизация большей части пироксенов при температурах 1170–1130 °C, находилась на глубинах 23–13 км. Использование состава пироксенов показало, что

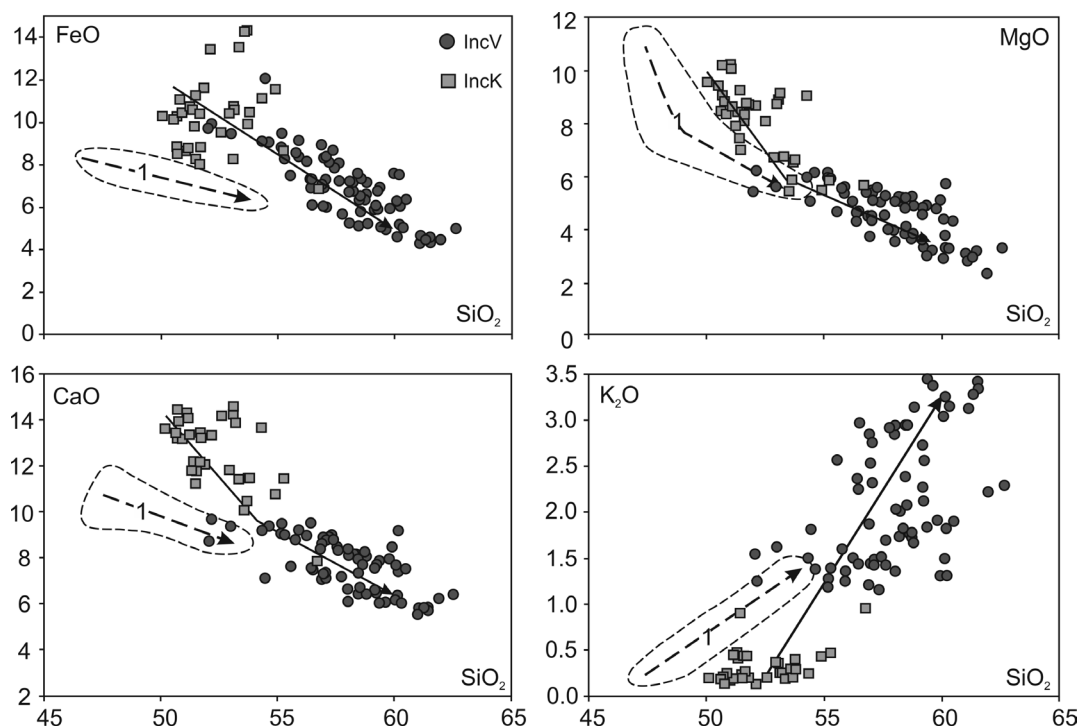


Рис. 6. Вариационные диаграммы для составов гомогенных стекол прогретых расплавных включений (мас. %) в клинопироксене из базальтовых эффузивных пород Валенторского (IncV) и Кызыл-Таштыгского (IncK) колчеданных месторождений.

Тренды: сплошная линия – расплавные включения; пунктир (и поле 1) – базальтовые породы и расплавные включения бассейна Вудларк в Тихом океане. Рисунок составлен на основе оригинальных данных с использованием материалов (Dril et al., 1997).

Fig. 6. Variation diagrams for compositions of homogeneous glasses of heated melt inclusions (wt. %) in clinopyroxene from basaltic effusive rocks of the Valentorka (IncV) and Kyzyl-Tashtyg (IncK) massive sulfide deposits.

Trends: solid line – melt inclusions; dotted line (and field 1) – basalts and melt inclusions of the Woodlark basin in Pacific Ocean. Figure is based on our data and materials from (Dril et al., 1997).

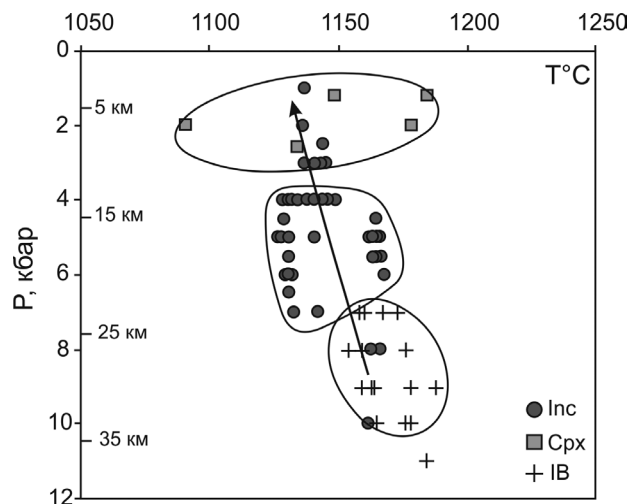
Рис. 7. Кристаллизация клинопироксенов Валенторского месторождения в промежуточных магматических камерах.

Данные по расплавным включениям в клинопироксене (Inc), составам клинопироксена (Cpx) и расплавным включениям в клинопироксене из бонинитов Идзу-Бонинской дуги, Тихий океан (IB). Рисунок построен на основе оригинальных данных с использованием материалов (Симонов и др., 1994).

Fig. 7. Crystallization of clinopyroxene of the Valentorka deposit in the intermediate magma chambers.

Data on melt inclusions in clinopyroxene (Inc), compositions of clinopyroxene (Cpx) and melt inclusions in clinopyroxene from the Izu-Bonin arc boninites, Pacific Ocean (IB). Figure is based on our data and materials from (Simonov et al., 1994).

на высоких горизонтах (10–3 км) они могли кристаллизоваться в более широком диапазоне температур – 1185–1090 °C (рис. 7).



На Кызыл-Таштыгском месторождении вкрапленники клинопироксена при высоких температурах (1215–1165 °C) кристаллизовались в промежуточных камерах при разных давлениях (8–6,



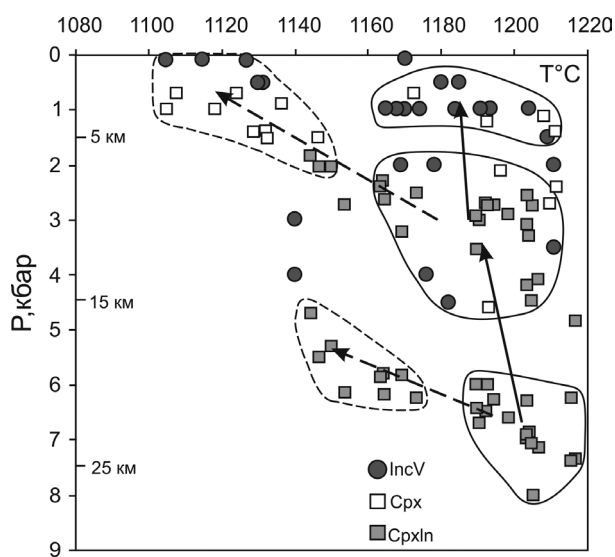


Рис. 8. Кристаллизация клинопироксенов Кызыл-Таштыгского месторождения в промежуточных магматических камерах.

Данные по расплавленным включениям в клинопироксене (Inc), составам клинопироксена (Cpx) и составам расплавленных включений и клинопироксенов (CpxIn). Пунктирные стрелки показывают эволюцию РТ-параметров кристаллизации минералов при резком падении температуры.

Fig. 8. Crystallization of clinopyroxene of the Kyzyl-Tashtyg deposit in the intermediate magma chambers.

Data on melt inclusions in clinopyroxene (Inc), compositions of clinopyroxene (Cpx) and compositions of melt inclusions and clinopyroxene (CpxIn). Dash arrows show the evolution of the PT-parameters of the crystallization of minerals at strongly decreasing temperature.

4.6–2.0 и 1.5–0.5 кбар) и, соответственно, на разных глубинах: 27–20, 15.0–6.7 и 5.0–1.7 км (рис. 8). Таким образом, устанавливается относительно быстрый подъем расплавов с глубин примерно с 25 км до 1.7 км с сохранением их высоких температур (~1200 °C). В то же время, существуют отчетливые тренды, начинающиеся на глубинах около 21 и 7 км при температурах 1175 и 1150 °C, резкого снижения температур (от 1175 до 1145 °C и от 1150 до 1105 °C) при подъеме на более высокие горизонты – 16 и 0.3 км, соответственно (рис. 8).

Особенности эволюции магматических систем в ходе кристаллизации минералов-вкрапленников в эффузивах. На основе полученных данных о глубинах кристаллизации клинопироксенов из базальтовых порфиров особенности эволюции магматических систем, ответственных за кристаллизацию минералов-вкрапленников в эффузивных комплексах, рассмотрены с привлечением про-

граммы COMAGMAT. Для Валенторского месторождения рассмотрена ситуация, отвечающая составу включения с максимумом MgO (6.14 мас. %) при значительном содержании SiO<sub>2</sub> (55.19 мас. %), начиная с давления 6 кбар, соответствующего основной магматической камере (рис. 7). Содержание H<sub>2</sub>O задавалось 0.5 мас. % при буфере QFM. Для месторождения Кызыл-Таштыг были рассмотрены две ситуации, соответствующие составу включений с максимумами MgO (10.18 мас. %) и SiO<sub>2</sub> (55.26 мас. %), начиная с давлений 8 и 6 кбар (отвечающих, соответственно, нижней и верхней частям наиболее глубокой магматической камеры) (рис. 8). Содержание H<sub>2</sub>O принято 0.5 мас. % при буфере QFM. Применение программы COMAGMAT показало, что для обоих месторождений клинопироксены начинают массово кристаллизоваться на глубинах около 16 км, что подтверждает данные о параметрах формирования пироксена в условиях основных промежуточных камер, полученные с помощью программ PETROLOG и WinPLtb (рис. 7, 8).

Результаты расчетного моделирования для магматических систем Валенторского месторождения (рис. 7) показывают практически непрерывную эволюцию состава расплавов от андезибазальтов до риодацитов, практически совпадающую со вторым (с максимальными значениями SiO<sub>2</sub>) трендом для Кызыл-Таштыгского месторождения (рис. 9а). Расчеты показали, что тренд расплавов Валенторского месторождения в диапазоне значений MgO от 5.5 до 3 мас. % (1185–1105 °C) пересекает основную группу включений в клинопироксене с температурами гомогенизации 1165–1130 °C. При этом кислые расплавы (SiO<sub>2</sub> 67–70 мас. %) имеют температуры 1050–1030 °C.

В случае Кызыл-Таштыгского месторождения моделирование показывает более сложную ситуацию развития магматизма, представленную на рисунке 9б, на котором видны два тренда: высокомагнезиальный и с максимальными значениями SiO<sub>2</sub>. В первом случае, тренд сначала показывает повышенные содержания MgO для расплавов (9.5–7.5 мас. %) и высокие расчетные температуры (1250–1190 °C). При этом он фактически проходит через основную группу расплавленных включений в клинопироксене с близкими характеристиками MgO (10–8 мас. %) и температур гомогенизации (1210–1170 °C). Далее в расплаве падает содержание MgO (до 5.8–5.0 мас. %) и температура (до 1140–1130 °C), что фиксируется второй группой включений (рис. 9б) с содержанием MgO 5.8–

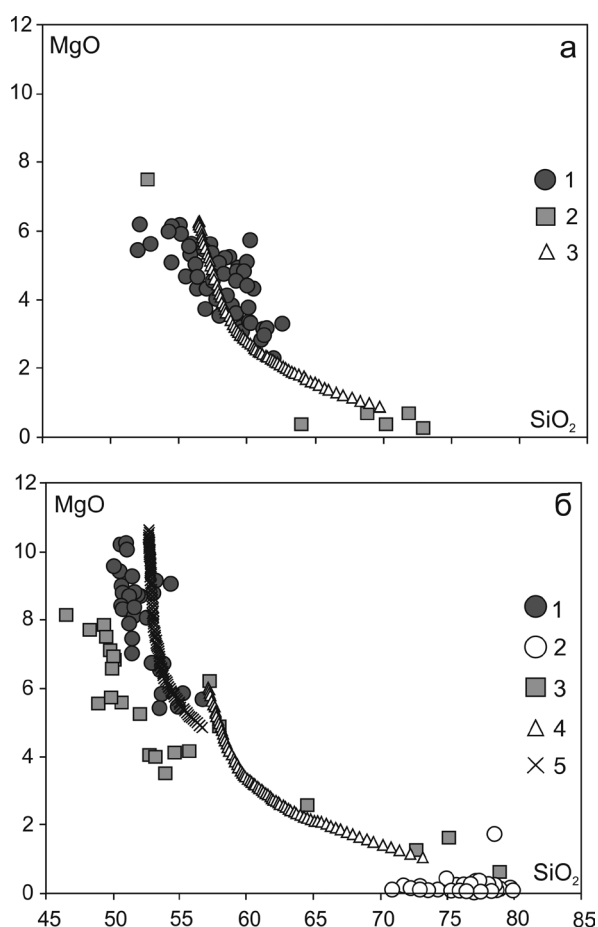


Рис. 9. Эволюция магматических систем при кристаллизации минералов базальт-риолитовых комплексов Валенторского (а) и Кызыл-Таштыгского (б) месторождений:

а: 1 – расплавные включения в клинопироксене; 2 – породы; 3 – эволюция расплавов с максимальным содержанием MgO; б: 1 – расплавные включения в клинопироксене; 2 – расплавные включения в кварце; 3 – породы; 4, 5 – эволюция расплавов с максимальными содержаниями  $\text{SiO}_2$  (4) и MgO (5).

Fig. 9. Evolution of magmatic systems during crystallization of minerals from basalt-rhyolite complexes of the Valentorka (a) and Kyzyl-Tashtyg (б) massive sulfide deposits.

а: 1 – melt inclusions in clinopyroxene; 2 – rocks; 3 – evolution of melts with a maximum MgO content. б: 1 – melt inclusions in clinopyroxene; 2 – melt inclusions in quartz; 3 – rocks; 4, 5 – evolution of melts with maximum contents of  $\text{SiO}_2$  (4) and MgO (5).

5.4 мас. % и температурами гомогенизации 1140–1120 °C. Выявленное сходство результатов экспериментального изучения расплавных включений в клинопироксене с расчетными данными подтверждает достоверность последних.

Второй расчетный тренд начинается от второй группы включений в клинопироксене с содержанием  $\text{SiO}_2$  около 56 мас. % и показывает непрерывное изменение состава расплава вплоть до содержания  $\text{SiO}_2$  73 мас. % от андезибазальтов до риолитов, (рис. 9). При этом температура конечных кислых (содержание  $\text{SiO}_2$  более 70 мас. %) расплавов составляла 1065–1045 °C. Эти параметры согласуются с экспериментальными термобарогеохимическими исследованиями, попадая в интервал температур гомогенизации расплавных включений (с содержанием  $\text{SiO}_2$  более 71 мас. %) в кварце из андезитов и риолитов Кызыл-Таштыгского месторождения (Simonov et al., 2010).

### Обсуждение результатов

Проведенные исследования позволили выявить различные аспекты условий генезиса минералов из базальтовых комплексов, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Сибири.

Физико-химические характеристики магматических систем, ответственных за кристаллизацию минералов-вкрапленников в базальтовых комплексах Валенторского и Кызыл-Таштыгского колчеданных месторождений, установлены при исследовании расплавных включений в клинопироксене. Высокотемпературные эксперименты с включениями свидетельствуют о том, что температуры кристаллизации пироксенов в расплавах согласуются между собой (1165–1130 и 1210–1085 °C, соответственно), показывая более широкий интервал для магм Кызыл-Таштыгского месторождения. Данные по составам стекол гомогенизированных включений говорят о принципиальном сходстве расплавов, из которых кристаллизовались клинопироксены эффузивных комплексов месторождений. В обоих случаях в составах базальт-андезитовых магм (с характеристиками магматических систем островных дуг и задуговых бассейнов) происходит падение содержания FeO, MgO, CaO и рост содержания  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{SiO}_2$ .

PT-параметры кристаллизации клинопироксенов в промежуточных камерах. Проведенные расчеты показали, что для обоих рассмотренных месторождений установлены по три промежуточных магматических камеры (рис. 7, 8), глубины расположения которых, несмотря на имеющиеся различия (Валенторское месторождение 33–27, 23–13 и 10–3 км, Кызыл-Таштыгское месторождение 27–20, 15.0–6.7, 5.0–1.7 км), в целом согласуются

между собой. Также сходны и температуры кристаллизации клинопироксенов (Валенторское месторождение – 1185–1090 °С, Кызыл-Таштыгское месторождение – 1215–1105 °С), согласующиеся с данными по гомогенизации расплавных включений: 1165–1130 и 1210–1085 °С, соответственно. При этом РТ-параметры основных (средних по глубинам) камер частично перекрываются: Валенторское месторождение – 23–13 км, 1170–1130 °С, Кызыл-Таштыгское месторождение – 15–6.7 км, 1210–1165 °С.

В то же время, полученные данные свидетельствуют о более сложном развитии магматической системы на Кызыл-Таштыгском месторождении, для которой, кроме преобладающего подъема расплавов с глубин с сохранением их высоких (~1200 °С) температур, существуют отчетливые тренды (начинающиеся с глубин ~21 и 7 км) резкого снижения температур (от 1175 до 1145 °С и от 1150 до 1105 °С) при подъеме на более высокие горизонты – 16 и 0.3 км, соответственно (рис. 8).

Подобная ситуация с магматическими камерами (~30 км, 27–18 км и менее 12 км), согласующаяся с сейсмической информацией о распределении зон накопления (резервуаров) магмы на глубине, определена с помощью аналогичного метода исследования расплавных включений в минералах из эффузивов современной островодужной зоны (вулкан Уксичан на Камчатке) (Добрецов и др., 2019). При этом для данного вулкана, также как и в случае Кызыл-Таштыгского месторождения, установлены дополнительные тренды резкого снижения температур кристаллизации расплавов.

*Особенности эволюции расплавов при их подъеме в верхние горизонты.* Проведенные исследования показывают эволюцию состава расплавов от базальтов до риолитов при формировании магматических комплексов, вмещающих колчеданные руды. В результате можно сделать вывод, что сочетание контрастных (базитовых и кислых) вулканогенных комплексов в окружении колчеданных месторождений Урала и Сибири – не случайный факт, а результат сложной (возможно, как в случае Кызыл-Таштыгского месторождения – многоступенчатой) эволюции глубинных исходных базальтоидных магм при их подъеме в верхние горизонты.

Большое значение при изучении древних месторождений имеет выяснение *палеогеодинамической обстановки*, в которой формировались рудообразующие структуры. Предыдущие работы о палеогеодинамических условиях формирования

среднеуральских колчеданосных комплексов посвящены, в основном, рифтогенным процессам (Контарь, 1977; Каретин, 2000; Иванов и др., 2002). Валенторское месторождение, также как и одно-возрастное с ним Яман-Касинское месторождение на Южном Урале, формировалось в условиях интенсивного режима вулканизма, обеспечившего сохранность сульфидных холмов (Масленников, 2012). Ранее было установлено, что Яман-Касинское месторождение формировалось в задуговом бассейне (Herrington et al., 2005; Симонов и др., 2006). Наши результаты по составам клинопироксенов и расплавных включений совместно с геологической информацией позволили выяснить, что Валенторское месторождение наиболее вероятно формировалось в условиях сложной системы островная дуга – задуговой бассейн, причем последний находился в начальной стадии своего развития (Симонов и др., 2009). В целом, намечается явная связь формирования Валенторского месторождения с развитием древней зоны субдукции и задугового спрединга (Симонов, Масленников, 2018).

Палеотектоническая позиция Кызыл-Таштыгского колчеданного месторождения в одних случаях связывалась с палеорифтовой зоной Тувино-Байкальского линеамента, заложенной на склоне зачехленного срединного массива в условиях зрелой континентальной коры (Кузевный и др., 2001). По данным других исследователей (Дистанов и др., 1998) формирование месторождения связано с кембрийскими островодужными комплексами. Существует также значительный объем фактического материала, свидетельствующий о развитии колчеданосных зон Тувы в рифтах Саяно-Тувинского окраинного моря (Зайков, 2006). Проведенные нами ранее работы (Симонов и др., 1999) говорят о формировании Кызыл-Таштыгского месторождения в палеогеодинамических условиях сложной системы, состоявшей из островной дуги и развивающегося задугового бассейна. Результаты исследований состава пород, клинопироксенов и расплавных включений показывают, что базальтовые комплексы, вмещающие Кызыл-Таштыгское месторождение, формировались в условиях развития древнего задугового бассейна. Современными аналогами подобных палеогеодинамических ситуаций могут служить структуры с задуговыми бассейнами Вудларк, Лау и Манус (юго-западная часть Тихого океана), на дне которых существуют рудообразующие гидротермальные сульфидные системы современ-



менных серых курильщиков. Судя по присутствию углеродистых отложений, напрашиваются аналогии с колчеданообразующими системами трога Окинава в Тихом океане. Связь с островодужным вулканизмом подтверждается также минералогическими аналогиями. В первую очередь, – это обилие теллуридов, самородного золота, блеклых руд и галенита (Berkenbosh et al., 2012; Maslennikov et al., 2017). Все эти минералы являются типичными для серых курильщиков Западной Пацифики и гораздо реже встречаются в сульфидных постройках медленно-спрединговых срединно-океанических хребтов (Мелекесцева и др., 2010; Богданов и др., 2015; Monecke et al., 2016; Firstova et al., 2018).

Таким образом, наши исследования свидетельствуют, что базальтовые комплексы, вмещающие Валенторское и Кызыл-Таштыгское месторождения, формировались в древних системах островная дуга – задуговой бассейн в переходной зоне океан-континент и, соответственно, под действием субдукционного магматизма. Как показали работы с материалами из современных островных дуг, с помощью анализа минералов и расплавных включений можно получать информацию о параметрах промежуточных магматических очагов в зонах субдукции, хорошо согласующуюся с сейсмическими данными. Данный подход приобретает особое значение при исследовании древних зон субдукции, когда невозможно применить сейсмические методы. В этом случае, изучение расплавных включений и минералов позволяет не только рассматривать особенности формирования и развития промежуточных магматических камер, но и реконструировать параметры палеогеодинамических процессов.

### Выводы

Исследования расплавных включений свидетельствуют о том, что клинопироксены из базальтовых комплексов, вмещающих сульфидные руды Валенторского и Кызыл-Таштыгского колчеданных месторождений, кристаллизовались из расплавов, имеющих сходные температурные (1165–1130 и 1210–1085 °C, соответственно) и химические параметры. В обоих случаях эволюция состава базальт-андезитовых магм (с характеристиками магматических систем островных дуг и задуговых бассейнов) происходила с падением содержаний FeO, MgO и CaO и ростом содержаний K<sub>2</sub>O и SiO<sub>2</sub>.

Расчетное моделирование данных по составам расплавных включений и содержащих их клинопироксенов с помощью программ PETROLOG и WinPLtb и минералогических термометров и барометров показало, что минералы базальтов, вмещающих изученные месторождения, кристаллизовались в трех разноглубинных промежуточных магматических камерах, параметры которых (Валенторское месторождение 33–27, 23–13, 10–3 км, 1185–1090 °C; Кызыл-Таштыгское месторождение 27–20, 15.0–6.7, 5.0–1.7 км, 1215–1105 °C) согласуются не только между собой, но и с данными по современному надсубдукционному магматизму.

Расчеты в программе COMAGMAT с использованием состава расплавных включений в клинопироксене показывают последовательное изменение составов минералообразующих расплавов от базальтов до риолитов, свидетельствующее о том, что сочетание контрастных вулканогенных комплексов, вмещающих колчеданные руды Валенторского и Кызыл-Таштыгского месторождений, не случайное явление, а является результатом сложной эволюции исходных глубинных базальтоидных магм при их подъеме в верхние горизонты.

Проведенные исследования свидетельствуют о том, что базальтовые комплексы, вмещающие Валенторское и Кызыл-Таштыгское месторождения, формировались в древних надсубдукционных системах островная дуга – задуговой бассейн в переходной зоне океан-континент.

*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 ГИМ УрО РАН (AAAA-A19-119061790049-3).*

### Литература

- Бакуменко И.Т. (1986) Процессы магматического петрогенезиса по данным изучения включений минералообразующих сред. *Геология и геофизика*, (7), 125–133.
- Берман Б.И. (1960) Геология Кызыл-Таштыгского месторождения. Труды Регионального совещания по развитию производительных сил Тувинской АО. Новосибирск, СО АН СССР, 137–146.
- Богданов Ю.А., Ленин А.Ю., Лисицын А.П. (2015) Полиметаллические руды в рифтах Срединно-Атланти-



ческого хребта (15–40° с.ш.): минералогия, геохимия, генезис. Москва, ГЕОС, 256 с.

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

**Дистанов Э.Г., Ковалев К.Р., Гаськов И.В.** (1998) Полиметаллические месторождения палеоостроводужных систем и континентальных окраин юга Сибири. Металлогения, нефтегазоносность и геодинамика Северо-Азиатского кратона и орогенных поясов его обрамления. Иркутск, 233–234.

**Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Буслов М.М., Котляров А.В.** (2005) Магматизм и геодинамика Палеоазиатского океана на венд-кембрийском этапе его развития. *Геология и геофизика*, 46(9), 962–967.

**Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Карманов Н.С.** (2019) Физико-химические параметры магматизма в районах вулканов Уксичан и Ичинский (Срединный хребет Камчатки). *Геология и геофизика*, 60(10), 1353–1383.

**Зайков В.В.** (1991) Вулканизм и сульфидные холмы палеоокеанических окраин (на примере колчеданозонных зон Урала и Сибири). М., Наука, 206 с.

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

**Иванов К.С., Ерохин Ю.В., Смирнов В.Н., Слободчиков Е.А.** (2002) Рифтогенез на Среднем Урале. Екатеринбург, УрО РАН, 91 с.

**Каретин Ю.С.** (2000) Геология и вулканические формации района Уральской сверхглубокой скважины СГ-4. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 278 с.

**Ковалев К.Р., Дистанов Э.Г., Антошкин Г.Н., Гаськов И.В., Акимцев В.А., Баулина М.В.** (2004) Золото и серебро в рудах вулканогенных гидротермальных и гидротермально-осадочных месторождений Сибири. *Геология и геофизика*, 45(10), 1171–1185.

**Контарь Е.С.** (1997) Металлогения меди, цинка, свинца на Урале. Екатеринбург, Уралгеолком, 233 с.

**Кужугет Р.В., Анкушева Н.Н.** (2016) Минералогия и условия образования медно-цинковых и медных руд Кызыл-Таштыгского колчеданно-полиметаллического месторождения (Восточная Тува). *Успехи современного естествознания*, (12), 414–422.

**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 В.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.

Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов (1975) / Ред. В.С. Соболев, В.П. Костюк. Новосибирск, Наука, 232 с.

**Масленников В.В.** (2006) Литогенез и колчеданнообразование. Миасс, ИМин УрО РАН, 384 с.

**Масленников В.В.** (2012) Морфогенетические типы колчеданных залежей как отражение режимов вулканизма. *Литосфера*, (5), 96–113.

**Масленникова С.П., Масленников В.В.** (2007) Сульфидные трубы палеозойских «черных курильщиков» (на примере Урала). Екатеринбург, УрО РАН, 317 с.

Медноколчеданные месторождения Урала: Геологическое строение (1988) Свердловск, УрО АН СССР, 241 с.

**Мелекесцева И.Ю., Котляров В.А., Иванов В.Н., Бельтнев В.Е., Добрецова И.Г., Нимис П.** (2010) Руды нового гидротермального сульфидного узла Семенов (13°31' с.ш.), Срединно-Атлантический хребет. *Литосфера*, (2), 47–61.

**Миронов Ю.В.** (1990) Соотношение титана и калия в базальтах как индикатор тектонической обстановки. *Доклады Академии наук СССР*, 314(6), 1484–1487.

**Перчук Л.Л.** (1980) Пироксеновый барометр и пироксеновые геотермы. *Доклады Академии наук СССР*, 233(6), 1196–2000.

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

**Симонов В.А., Добрецов Н.Л., Буслов М.М.** (1994) Бонинитовые серии в структурах Палеоазиатского океана. *Геология и геофизика*, 35(7–8), 182–199.

**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, 16–23.

**Симонов В.А., Ковязин С.В., Масленников В.В.** (2009) Физико-химические параметры магматических систем на Валенторском колчеданном месторождении (Северный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2009. Модели рудообразования и оценка месторождений*. Миасс, ИМин УрО РАН, 184–186.

**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., Котляров А.В.** (2019) Условия формирования магматических комплексов, вмещающих

раннекембрийские колчеданные месторождения. *Металлогения древних и современных океанов-2019. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений*. Миасс, ИМин УрО РАН, 26–29.

**Симонов В.А., Котляров А.В., Кривоногов А.Н., Ступаков С.И., Масленников В.В.** (2012) Геолого-минералогические особенности палеогидротермальных построек колчеданно-полиметаллического месторождения Кызыл-Таштыг, Восточная Тува. *Металлогения древних и современных океанов-2012. Гидротермальные поля и руды*. Миасс, ИМин УрО РАН, 68–71.

**Симонов В.А., Масленников В.В.** (2018) Геодинамика магматических систем на Валенторском колчеданном месторождении (Северный Урал). *Металлогения древних и современных океанов-2018. Вулканизм и рудообразование*. Миасс, ИМин УрО РАН, 22–26.

**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.

**Соболев В.С., Бакуменко И.Т., Костюк В.П.** (1976) О возможности использования расплавных включений для петрологических реконструкций. *Геология и геофизика*, (5), 146–149.

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

**Ashchepkov I.V.** (2001) Clinopyroxene Jd barometer for mantle peridotites and eclogites and thermal conditions of the lithospheric keels of cratons and their surroundings. A geo odyssey. *GSA Annual Meeting*. Boston, ID 11658.

**Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.** (2011) Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**(7), Q07021.

**Dril S.I., Kuzmin M.I., Tsipukova S.S., Zonenshain L.P.** (1997) Geochemistry of basalts from the western Woodlark, Lau and Manus basins: implications for their petrogenesis and source rock compositions. *Marine Geology*, (142), 57–83.

**Frenzel G., Muhe R., Stoffers P.** (1990) Petrology of the volcanic rocks from the Lau basin, Southwest Pacific. *Geologisches Jahrbuch Reihe D, Band D 92*, 395–479.

**Hannington M.D., Galley A.G., Herzig P.M., Petersen S.** (1998) Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits. *TAG: Drilling an Active Hydrothermal System on a Sediment-Free Slow-Spreading Ridge* / Eds. P.M. Herzig et al. Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results, **158**, 389–415.

**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.

**Herrington R.J., Maslennikov V. V., Brown D., Puchkov V.N.** (2005) Mineral deposits of the Urals and links to

geodynamic evolution. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 1069–1095.

**Leterrier J., Mauru R.C., Thonon P., Girard D., Marchal M.** (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, **9**, 139–154.

**Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G.** (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, **9**, 150.

**Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Y., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Lein A.T.** (2017) Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geology Reviews*, **85**, 64–106.

**Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevskiy L.V., Herrington R.J., Stanley C.J.** (2013) Telluriumbearing minerals in zoned sulfide chimneys from CuZn massive sulfide deposits of the Urals, Russia. *Mineralogy and Petrology*, **107**, 67–99.

**Masotta M., Mollo S., Freda C., Gaeta M., Moore G.** (2013) Clinopyroxene-liquid thermometers and barometers specific to alkaline differentiated magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, (166), 1545–1561.

**Melekestseva I.Yu., Ankusheva N.N., Tret'yakov G.A., Zaykov V.V., Simonov V.A.** (2007) Massive sulfides from ancient and modern margins of the Asian paleo-ocean and Pacific: Textures, mineralogy and fluid inclusion data. *Marine minerals of the Pacific: Science, Economics, and the Environment: 37th Underwater Mining Institute*, Tokyo, 177–187.

**Mercier J.-C.C.** (1980) Single-pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics*, (70), 1–37.

**Monecke T., Petersen S., Hannington M.D., Grant H., Samson I.M.** (2018) The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions. *Economic Geology*, **118** (8), 245–306.

**Nimis P., Taylor W.** (2000) Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **139**, 541–554.

**Putirka K.D.** (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **69**(1), 61–120.

**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.

**Yavuz F., Yıldırım D.K.** (2018) A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry. *Periodico di Mineralogia*, **87**, 149–172.

## References

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

**Ashchepkov I.V.** (2001) Clinopyroxene Jd barometer for mantle peridotites and eclogites and thermal conditions of the lithospheric keels of cratons and their surroundings. A geo odyssey. *GSA Annual Meeting*. Boston, ID 11658.

**Bakumenko I.T.** (1986) [Magmatic petrogenetic processes according to the study of inclusions of mineral-forming media]. *Geologiya i geofizika, [Russian Geology and Geophysics]*(7), 125–133. (in Russian)

**Berman B.I.** (1960) Geology of the Kyzyl-Tashtyg field. In.: *Proceedings of regional meeting on the development of productive forces of the Tuva Autonomous District*. Novosibirsk, SO AN SSSR, 137–146. (in Russian)

**Bogdanov Yu.A., Lein A.Yu., Lisitsyn A.P.** (2015) [Polymetallic ores in rifts of the Mid-Atlantic Ridge (15–40° N): mineralogy, geochemistry, genesis]. Moscow, GEOS, 256 p. (in Russian)

[Copper massive sulfide deposits of the Urals: geological structure] (1988) Sverdlovsk, UB AS USSR, 241 p. (in Russian)

**Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.** (2011) Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, **12**(7), Q07021.

**Distanov E.G., Kovalev K.R., Gaskov I.V.** (1998) [Polymetallic deposits of paleoisland systems and continental margins of southern Siberia]. In.: *Metallogeniya, neftegazonosnost i geodinamika Severo-Aziatskogo kratona i orogennykh poyasov ego obramleniya [Metallogeny, petroleum potential and geodynamics of the North Asian craton and orogenic belts of its frame]*. Irkutsk, 233–234. (in Russian)

**Dobretsov N.L., Simonov V.A., Buslov M.M., Kotlyarov A.V.** (2005) [Magmatism and geodynamics of the Paleo-Asian Ocean at the Vendian-Cambrian stage of its evolution]. *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, **46**(9), 962–967. (in Russian)

**Dobretsov N.L., Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Karmenov N.S.** (2019) [Physico-chemical parameters of magmatism in regions of the Uksichan and Ichinsky volcanoes (Sredinny Ridge of Kamchatka)]. *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, **60**(10), 1353–1383. (in Russian)

**Dril S.I., Kuzmin M.I., Tsipukova S.S., Zonenshain L.P.** (1997) Geochemistry of basalts from the western Woodlark, Lau and Manus basins: implications for their petrogenesis and source rock compositions. *Marine Geology*, (142), 57–83.

**Frenzel G., Muhe R., Stoffers P.** (1990) Petrology of the volcanic rocks from the Lau basin, Southwest Pacific. *Geologisches Jahrbuch Reihe D, Band D 92*, 395–479.

**Gaskov I.V.** (2020) [Kyzyl-Tashtyg deposit in Eastern Tuva – an etalon of ancient volcanogenic formation of massive sulfide polymetallic ores]. *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, (2), 175–193. (in Russian)

**Hannington M.D., Galley A.G., Herzig P.M., Petersen S.** (1998) Comparison of the TAG mound and stockwork complex with Cyprus-type massive sulfide deposits. *TAG: Drilling an Active Hydrothermal System on a Sediment-Free Slow-Spreading Ridge* / Eds. P.M. Herzig et al. Proc. Ocean Drill. Program Sci. Results, **158**, 389–415.

**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.

**Herrington R.J., Maslennikov V. V., Brown D., Puchkov V.N.** (2005). Mineral deposits of the Urals and links to geodynamic evolution. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 1069–1095.

**Ivanov K.S., Erokhin Yu.V., Smirnov V.N., Slobodchikov E.A.** (2002) [Rifting in the Central Urals]. Yekaterinburg, UrO RAN, 91 p. (in Russian)

**Karetin Yu.S.** (2000) [Geology and volcanic complexes of the Urals superdeep hole SG-4]. Yekaterinburg, IGG UrO RAN, 278 p. (in Russian)

**Kontar E.S.** (1997) [Metallogeny of copper, zinc, lead in the Urals]. Yekaterinburg, Uralgeolkom, 233 p. (in Russian)

**Kovalev K.R., Distanov E.G., Antoshkin G.N., Gaskov I.V., Akimtsev V.A., Baulina M.V.** (2004) [Gold and silver in ores of volcanogenic hydrothermal and hydrothermal-sedimentary deposits of Siberia]. *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, **45** (10), 1171–1185. (in Russian)

**Kuzebny V.S., Kaleev V.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)

**Kuzebny V.S., Makarov V.A., Kaleev E.A., Distanov E.G., Kovalev K.R., Bukharov N.S., Glazunov S.P., Chupakhin L.M.** (2001) [Kyzyl-Tashtyg massive sulfide polymetallic ore cluster of Eastern Tuva]. Krasnoyarsk, 292 p. (in Russian)

**Kuzhuget R.V., Ankusheva N.N.** (2016) [Mineralogy and formation conditions of copper-zinc and copper ores of the Kyzyl-Tashtyg massive sulfide polymetallic deposit



(Eastern Tuva)]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Successes of Current Natural Sciences]*, (12), 414–422. (in Russian)

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

**Leterrier J., Mauru R.C., Thonon P., Girard D., Marchal M.** (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, **9**, 139–154.

[Magmatic crystallization according to the study of inclusions of melts] (1975) Ed. by V.S. Sobolev, V.P. Kostyuk. Novosibirsk, Nauka, 232 p. (in Russian)

**Maslennikov V.V.** (2006) [Lithogenesis and massive sulfide formation]. Miass, IMin UrO RAN, 384 p. (in Russian)

**Maslennikov V.V.** (2012) Morphogenetic types of massive sulfide deposits as a reflection of volcanic regimes. *Litosfera [Lithosphere]*, (5), 96–113. (in Russian)

**Maslennikov V.V., Ayupova N.R., Safina N.P., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Yu., Large R.R., Herrington R.J., Kotlyarov V.A., Blinov I.A., Maslennikova S.P., Tessalina S.G.** (2019) Mineralogical features of ore diagenites in the Urals massive sulfide deposits, Russia. *Minerals*, **9**, 150.

**Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Ayupova N.R., Zaykov V.V., Tseluyko A.S., Melekestseva I.Y., Large R.R., Danyushevsky L.V., Herrington R.J., Lein A.T.** (2017) Chimneys in Paleozoic massive sulfide mounds of the Urals VMS deposits: mineral and trace element comparison with modern black, grey, white and clear smokers. *Ore Geology Reviews*, **85**, 64–106.

**Maslennikov V.V., Maslennikova S.P., Large R.R., Danyushevskiy L.V., Herrington R.J., Stanley C.J.** (2013) Telluriumbearing minerals in zoned sulfide chimneys from CuZn massive sulfide deposits of the Urals, Russia. *Mineralogy and Petrology*, **107**, 67–99.

**Maslennikova S.P., Maslennikov V.V.** (2007) [Sulfide chimneys of Paleozoic black smokers (on example of the Urals)]. Yekaterinburg, UrO RAN, 317 p. (in Russian)

**Masotta M., Mollo S., Freda C., Gaeta M., Moore G.** (2013) Clinopyroxene-liquid thermometers and barometers specific to alkaline differentiated magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, (166), 1545–1561.

**Melekestseva I.Yu., Ankusheva N.N., Tret'yakov G.A., Zaykov V.V., Simonov V.A.** (2007) Massive sulfides from ancient and modern margins of the Asian paleo-ocean and Pacific: Textures, mineralogy and fluid inclusion data. *Marine minerals of the Pacific: Science, Economics, and the Environment: 37th Underwater Mining Institute*. Tokyo, 177–187.

**Melekestseva I.Yu., Kotlyarov V.A., Ivanov V.N., Beltenev V.E., Dobretsova I.G., Nimis P.** (2010) [Ores of the new hydrothermal sulfide cluster Semenov (13°31' N), Mid-Atlantic Ridge]. *Litosfera [Lithosphere]*, (2), 47–61. (in Russian)

**Mercier J.-C.C.** (1980) Single-pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics*, (70), 1–37.

**Mironov Yu.V.** (1990) [Correlation between Ti and K in basalts as an indicator of tectonic settings]. *Doklady Akademii nauk USSR [Doklady Academy of Sciences USSR]*, **314**(6), 1484–1487. (in Russian)

**Monecke T., Petersen S., Hannington M.D., Grant H., Samson I.M.** (2018) The minor element endowment of modern sea-floor massive sulfides and comparison with deposits hosted in ancient volcanic successions. *Economic Geology*, **18** (8), 245–306.

**Nimis P., Taylor W.** (2000) Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **139**, 541–554.

**Perchuk L.L.** (1980) Pyroxene barometer and pyroxene geotherms. *Doklady Akademii nauk USSR [Doklady Academy of Sciences USSR]*, **233**(6), 1196–2000. (in Russian)

**Putirka K.D.** (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, **69**(1), 61–120.

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

**Simonov V.A., Dobretsov N.L., Buslov M.M.** (1994) Boninite series in structures of the Paleo-Asian Ocean. *Geologiya i geofizika [Russian Geology and Geophysics]*, **35**(7–8), 182–199. (in Russian)

**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.

**Simonov V.A., Kotlyarov A.V.** (2019) [Formation conditions of igneous complexes hosting the Early Cambrian massive sulfide deposits]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2019. Chetvert veka dostizheniy v izuchenii submarinnykh mestorozhdeniy [Metallogeny of ancient and modern oceans-2019. Twenty five years of study of submarine deposits]*. Miass, IMin UrO RAN, 26–29. (in Russian)

**Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Krivonogov A.N., Stupakov S.I., Maslennikov V.V.** (2012) [Geological and mineralogical features of paleohydrothermal structures of the Kyzyl-Tashtyg massive sulfide polymetallic deposit, Eastern Tuva]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2012. Gidrotermalnye polya i rudy [Metallogeny of ancient and modern oceans-2012. Hydrothermal fields and ores]*. Miass, IMin UrO RAN, 68–71. (in Russian)

**Simonov V.A., Kovyazin S.V., Maslennikov V.V.** (2009) [Physico-chemical parameters of magmatic systems at the Valentorka massive sulfide deposit (Northern Urals)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2009*.



*Modeli rudoobrasovaniya i otsenka mestorozhdeniy [Metallogeny of ancient and modern oceans-2009. Models of ore formation and deposits assessment]*. Miass, IMin UrO RAN, 184–186. (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., Maslennikov V.V.** (2018) [Geodynamics of magmatic systems at the Valentorka massive sulfide deposit (North Urals)]. *Metallogeniya drevnikh i sovremennykh okeanov-2018. Vulkanism i rudoobrasovanie [Metallogeny of ancient and modern oceans-2018. Volcanism and ore formation]*. Miass, IMin UrO RAN, 22–26. (in Russian)

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

**Sobolev A.V., Slutsky A.B.** (1984) [Composition and crystallization conditions of primary melt of Siberian meimechites in respect with a general problem of ultramafic magmas]. *Geologiya i geofizika [Geology and Geophysics]*, (12), 97–110. (in Russian)

**Sobolev V.S., Bakumenko I.T., Kostyuk V.P.** (1976) [Possible using of melt inclusions for petrological interpretations]. *Geologiya i geofizika*, (5), 146–149. (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.

**Yavuz F., Yıldırım D.K.** (2018) A Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry. *Periodico di Mineralogia*, **87**, 149–172.

**Zaykov V.V.** (1991) [Volcanism and sulfide mounds of the paleoceanic margins (on example of massive sulfide-bearing zones of the Urals and Siberia)]. Moscow, Nauka, 206 p. (in Russian)

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

*Поступило в редакцию 30 октября 2020 г.*

*После доработки 6 ноября 2020 г.*

*Принято в печать 10 ноября 2020 г.*