

Научная статья

УДК 551.21; 553.2

DOI: 10.37102/0869-7698\_2023\_230\_04\_7

EDN: IXUIKH

## Рудоносные эксплозивные брекчии финальной фазы раннепалеоценового (дальнегорского) импульса магматизма Сихотэ-Алиня: данные термобарогеохимического изучения включений в кварце

О.А. Елисеева<sup>✉</sup>, Д.В. Тихомиров, В.В. Раткин

*Ольга Александровна Елисеева*

кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник  
Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
okaras@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0001-9386-3806>

*Дмитрий Валерьевич Тихомиров*

аспирант, инженер

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
tihomirov.dmitriy@bk.ru

*Владимир Васильевич Раткин*

доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия  
kratkin@yandex.ru

**Аннотация.** В Дальнегорском рудном районе Сихотэ-Алиня изучены эксплозивные брекчии Солонцовой вулcano-тектонической структуры, сформированной раннепалеоценовыми породами дальнегорской вулcano-плутонической ассоциации. Показано, что эксплозивные брекчии соответствуют финалу формирования вулканической постройки центрального типа и, вероятно, синхронизированы по времени генерации с процессами Pb-Zn скарнового рудообразования. Изучение расплавных включений в кварце брекчий показывает, что раннепалеоценовые флюидонасыщенные очаги в финале дальнегорского импульса магматизма следует связывать с суперплюмативным расплавом трахидацитового состава ( $ASI = 1,1$ ), который обогащен серой, хлором и рудными компонентами (Zn, Mn, Fe, Ti). Появление в очаге более кремнекислых ультракалийевых расплавов риодацитового состава представляется как результат флюидно-магматической дифференциации трахидацитового расплава на фоне проявившейся интенсивной кристаллизации альбита. Эксплозивные брекчии могут рассматриваться как прогнозно-поисковый признак при

оценке перспектив рудоносности вулканических структур Дальнегорского рудного района в отношении скрытого на глубине свинцово-цинкового оруденения.

**Ключевые слова:** вулканизм, эксплозивные брекчии, ультракалиевые риолиты, расплавные включения, рудоносность, Сихотэ-Алинь, Дальнегорск

**Для цитирования:** Елисеева О.А., Тихомиров Д.В., Раткин В.В. Рудносные эксплозивные брекчии финальной фазы раннепалеоценового (дальнегорского) импульса магматизма Сихотэ-Алиня: данные термобарогеохимического изучения включений в кварце // Вестн. ДВО РАН. 2022. № 4. С. 92–107. [http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698\\_2023\\_230\\_04\\_7](http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_230_04_7).

**Финансирование** осуществлялось из бюджетного фонда для выполнения государственного задания по теме «Месторождения стратегических металлов Тихоокеанской России, обстановки формирования и прогноз их новых и нетрадиционных типов». Изучение Солонцовой ВТС проведено по инициативе АО «ГМК Дальполиметалл» с целью оценки перспектив наращивания запасов Pb-Zn руд на флангах Партизанского месторождения.

Original article

## Ore-bearing explosive breccias of the final phase of the early Paleocene (Dalnegorsk) magmatic impulse in the Sikhote-Alin: data of thermobaric and geochemical study of inclusions in quartz

O.A. Eliseeva, D.V. Tikhomirov, V.V. Ratkin

*Olga A. Eliseeva*

Candidate of Sciences in Geology, Senior Researcher  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
[okaras@yandex.ru](mailto:okaras@yandex.ru)  
<http://orcid.org/0000-0001-9386-3806>

*Dmitriy V. Tikhomirov*

Graduate Student, Engineer  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
[tikhomirov.dmitriy@bk.ru](mailto:tikhomirov.dmitriy@bk.ru)

*Vladimir V. Ratkin*

Doctor of Sciences in Geology, Leading Researcher  
Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok, Russia  
[kratkin@yandex.ru](mailto:kratkin@yandex.ru)

**Abstract.** We have studied explosion-breccias of the Solontsovaya volcano-tectonic structure located in the Dalnegorsk ore district within the Sikhote-Alin. The structure is composed of early Paleocene rocks of the Dalnegorsk volcanic-plutonic association. It is shown that explosion-breccias relate to the final stage of formation of the central-type volcanic edifice and are, probably, synchronous with the Pb-Zn skarn mineralization. The analysis of melt inclusions in breccia quartz indicates that early Paleocene chambers saturated with fluids should be associated with

the superplumasitic melt of trachydacitic composition (ASI = 1.1) rich in sulfur, chlorine and ore components (Zn, Mn, Fe, Ti). The presence of more siliceous ultrapotassic melts of rhyodacitic composition in a chamber is considered as a result of fluid-magmatic differentiation of trachydacitic melt during the intensive albite crystallization. Explosive breccias can serve as a forecasting and prospecting indicator in the assessment of possible ore content in the volcanic structures of the Dalnegorsk ore district in regard to the deep-seated Pb-Zn mineralization.

**Keywords:** volcanism, explosive breccias, ultrapotassic rhyolites, melt inclusions, ore content, Sikhote-Alin, Dalnegorsk

**For citation:** Eliseeva O.A., Tikhomirov D.V., Ratkin V.V. Ore-bearing explosive-breccias of the final phase of the early Paleocene (Dalnegorsk) magmatic impulse in the Sikhote-Alin: data of thermobaric and geochemical study of inclusions in quartz. *Vestnik of the FEB RAS*. 2022;(4):92-107. [http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698\\_2023\\_230\\_04\\_7](http://dx.doi.org/10.37102/0869-7698_2023_230_04_7).

**Funding.** This work was financially supported by the budget fund for the accomplishment of the state task titled “Strategic metal deposits of the Pacific Russia, formation settings and forecast of their new and unusual types”. The study of the Solontsovaya VTS was performed at the request of the “GMK “Dalpolimetall” SC to assess the possibility of increasing Pb-Zn ore reserves at the flanks of the Partizanskoe deposit.

## Введение

Дальнегорский рудный район известен как аномально высокопродуктивная рудно-магматическая система Тихоокеанской окраины Азии. Здесь уже более 100 лет отрабатываются скарновые и жильные свинцово-цинковые месторождения. Действующее на базе этих месторождений АО «ГМК Дальполиметалл» – одно из крупнейших горно-рудных предприятий РФ. В настоящее время компания выпускает около 35 % свинцового и 8 % цинкового концентрата от общероссийского объема.

Располагаясь на юге российского Дальнего Востока, Дальнегорский район ассоциирован с Таухинским террейном Сихотэ-Алинского орогенного пояса. Все месторождения локализуются как непосредственно в составе раннемеловой Таухинской аккреционной призмы, так и в вулканитах перекрывающего террейн постаккреционного чехла поздний мел-палеоценового возраста.

Доминируют Pb-Zn месторождения, ассоциированные с зонами инфильтрационных известковых (ильваит)-андрадит-геденбергитовых скарнов. Тела скарнов обнаруживаются в основном на контактах олистолитов известняков триасового возраста и вмещающих их раннемеловых терригенных пород матрикса призмы. Часть скарново-рудных тел локализуется на контактах известняков и перекрывающих призму постаккреционных вулканитов. Здесь же присутствуют скарнированные глыбы известняков, «плавающие» в прислонившихся к бортам кальдер туфовых толщах позднемелового возраста. Жильные Pb-Zn месторождения локализуются как в составе складчатого «таухинского» фундамента, так и в перекрывающих его поздний мел-палеоценовых вулканитах.

Непосредственная связь рудообразования с интрузивными телами не проявлена. В 400–600 м ниже уровня Pb-Zn рудообразования, по данным геофизики и бурения, всегда фиксируются диорит-гранодиорит-гранитовые плутоны дальнегорского интрузивного комплекса палеоценового возраста [1]. Эти интрузии являются составной частью дальнегорской вулканоплутонической ассоциации и уже

более полувека рассматриваются как рудоносные [2]. Однако пространственная вертикальная разобщенность рудоносных интрузий и зон рудообразования исключает возможность предметного использования данных об их петрогеохимических особенностях в практике поисковых работ в качестве критерия прогноза скрытого оруденения на глубине. При этом изначально указывается на связь свинцово-цинкового рудообразования не просто с интрузиями гранитоидов, а подчеркивается ассоциированность месторождений с характерными компактными вулканоплутоническими центрами [1, 3]. Современные данные U-Pb датирования вулканических пород и гранитоидов дальнегорской вулканоплутонической ассоциации [4, 5] в дополнение к многочисленным K-Ar определениям [3] позволяют говорить о времени проявления дальнегорского импульса магматизма в интервале 65–58 млн л.н. с максимумом около 60 млн л.н. Проявление скарново-рудных процессов синхронизировано с предполагаемым финалом дальнегорского импульса магматизма около  $57,22 \pm 0,24$  млн л.н. по данным Ar-Ar датирования ортоклаза скарнов [6].

В этих условиях практически важное значение имеет информация о возможных синрудных, но продвинутых выше уровня локализации руд, магматических продуктах рудоносного очага, доступных для наблюдения на современной поисковой поверхности. Индикаторами могут выступить эксплозивные брекчии, время формирования которых, по данным геологических наблюдений<sup>1</sup> [3], также отвечает финальной стадии дальнегорского магматизма. В свете этих построений выяснение условий генерации эксплозий и конкретизация характера их связи с промежуточным вулканическим очагом и процессами рудообразования представляют прямой предметный интерес.

В рамках решения этой задачи изучены эксплозивные брекчии типовой для Дальнегорского района Солонцовой вулканотектонической структуры (ВТС) (рис. 1).

Известно, что современные исследования природы магматизма при обилии классических петрогеохимических методов в значительной степени ориентированы на изучение состава расплавов, закапсулированных в виде включений в минералах магматических пород [8, 9]. В приложении к рудно-магматическим системам эти исследования, в сочетании с локальными методами количественного химического анализа, включая электронное микронзондирование, рамановскую спектроскопию и другую аналитику, позволяют предметно оценить состав, физико-химические условия образования расплавов и установить магматические процессы, ведущие к генерации рудоносных магм [10–13].

При высокой флюидонасыщенности рудоносных расплавов [14, 15] эксплозивные брекчии, возникающие при разгрузке рудоносных очагов, проявлены как мелкообломочные образования. Это во многом ограничивает применение методов классической петрохимии и концентрирует внимание на изучении расплавных включений в минералах. В силу указанного в основу наших исследований Солонцовой ВТС положен анализ расплавных включений в кварце обломков пород и кристаллокластах цемента эксплозивных брекчий. На основе комплекса методов, включая микротермометрию, электронно-микронзондовую микроскопию и КР-спектроскопию, проведена реконструкция первичного состава потенциально рудоносного расплава и оценивается характер его эволюции.

---

<sup>1</sup> Брилев Ю.Н. Отчет по завершению объекта «Поисковые работы на полиметаллы и серебро в пределах Южно-Солонцового участка за 1997–2000 гг. и 2006–2007 гг.». Владивосток: Приморский фил. ФБУ ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу, 2007. Инв. № 14454.

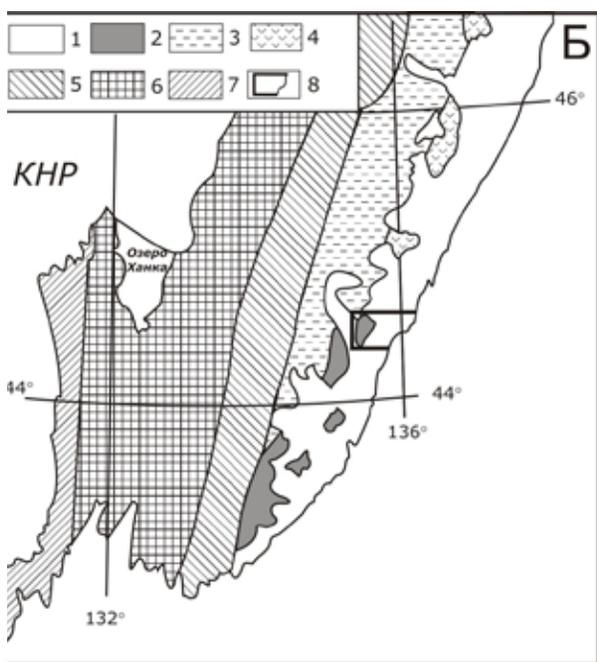
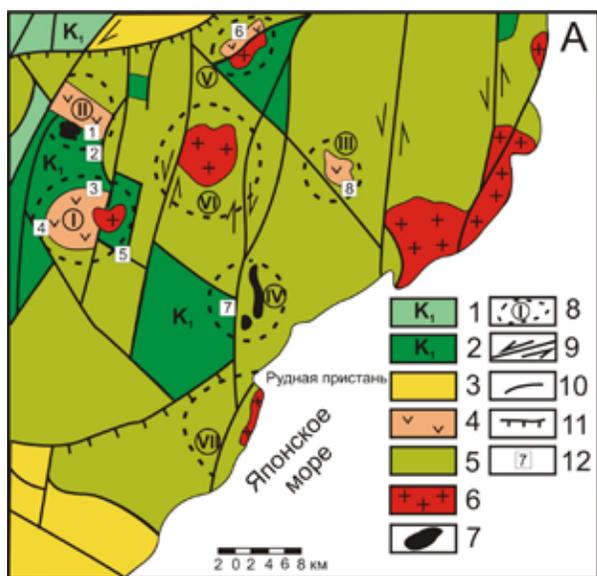


Рис. 1. Генерализованная схема размещения вулcano-тектонических структур дальнегорской вулcano-плутонической ассоциации, по данным [3], (А) и положение Дальнегорского рудного района на схеме террейнов южной части Дальнего Востока РФ по [7] (Б). А) 1 – складчатые комплексы Журавлевского террейна раннемелового турбидитового бассейна, 2 – складчатые комплексы Таухинского террейна раннемеловой аккреционной призмы, 3 – поздний палеоцен-эоценовые вулканы богоспольской свиты, 4 – раннепалеоценовые андезиты и андезибазальты дальнегорской вулcano-плутонической ассоциации, 5 – толщи с преобладанием туфов и игнибритов позднемелового возраста, 6–7 – раннепалеоценовые интрузии дальнегорской вулcano-плутонической ассоциации: 6 – граниты и гранодиориты, 7 – габбро, диориты и кварцевые диориты, 8 – вулcano-тектонические структуры раннепалеоценового возраста (I – Солонцовая, II – Николаевская, III – Красногорская, IV – Лидовская, V – Араратская, VI – Араминовская, VII – Бриннеровская), 9 – сбросы, 10 – надвиги, 12 – месторождения Pb-Zn руд: скарновые (1 – Николаевское, 2 – Верхнее, 3 – Партизанское, 4 – Светлый Отвод, 5 – Садовое) и жильные (6 – Майминовское, 7 – Лидовское, 8 – Красногорское); Б) 1 – постааккреционный Восточно-Сихотэ-Алинский вулcano-плутонический пояс, 2 – Таухинский террейн раннемеловой аккреционной призмы, 3 – Журавлевский террейн раннемелового турбидитового бассейна, 4 – Кемский террейн раннемеловой островной дуги, 5 – Самаркинский террейн юрской аккреционной призмы, 6 – террейны раннепалеозойского Бурей-Ханкайского орогенного пояса, 7 – Лаоэлин-Гродековский террейн позднепалеозойской островной дуги в структуре позднепалеозойского Солонкерского орогенного пояса, 8 – Дальнегорский рудный район

## Геодинамика и особенности проявления поздний мел-палеоценового магматизма южного Сихотэ-Алиня

Своеобразие проявления поздний мел-палеоценовых магматических комплексов южного Сихотэ-Алиня определяется, в свете современных геодинамических представлений [16, 17], спецификой постаккреционного магматизма в меняющемся режиме субдвигирования и проскальзывания расположенной восточнее океанической плиты.

**Позднемеловой этап** проявился непосредственно вслед за альб-сеноманским орогенезом Сихотэ-Алиня [18]. Этап реализуется в условиях субдукции океанической плиты Иванаги [16]. В это время формируется Восточно-Сихотэ-Алинский вулканический пояс, который в виде чехла практически нацело перекрывает притихоокеанскую часть орогенного пояса, включая Таухинский террейн. В турон-кампанское время в условиях трещинного ареального вулканизма возникает главная составная часть пояса – формируется гигантская, до 3,5 км мощностью, однородная толща игнимбритов и туфов риолитового состава приморской серии. Игнимбриты выполняют вулкано-тектонические депрессии компенсационного типа, обрамляющие горст-антиклинальные поднятия, где на эрозионной поверхности обнажаются мезозойские породы складчатого основания. Сопряженный с формированием толщи вулканитов приморской серии интрузивный магматизм проявлен как тела гранитоидов S- и I-типа ольгинского интрузивного комплекса, датированных U-Pb методом интервалом 83–70 млн лет [5].

**Палеоценовый этап** отражает, по представлениям [19], переход от субдукции к режиму трансформного взаимодействия океанической и континентальных плит. Обособляются совмещенные с Восточно-Сихотэ-Алинским вулкано-плутоническим поясом (ВСАВП) локальные центры, где в постсубдукционном процессе, в интервале 65–58 млн лет, синхронно проявляются кислый и основной магматизм дальнегорской вулкано-плутонической ассоциации, сопоставляемой в традиционных схемах вулканизма с самаргинской, сияновской и левособолевской свитами Сихотэ-Алиня<sup>2</sup> [19–21]. При однотипности и доминирующем сходстве петрохимии позднемеловых и раннепалеоценовых гранитоидов для последних характерно большее разнообразие. При некотором преобладании I-типа гранитоидов присутствуют также разновозрастные интрузии A-типа. Такие гранитоиды характерны, как показано [22], для зон литосферного растяжения, где магматизм реализуется при участии флюидной колонны подлитосферной мантии.

В позднем палеоцене–раннем эоцене взаимодействие океанических плит и материка реализуется в полном объеме, по представлениям [17], в трансформном режиме, в виде латерального проскальзывания литосферных плит. В материковой части на фоне региональных субмеридионально ориентированных растягивающих напряжений возникают протяженные субширотные ВТС, резко дискордантно ориентированные к складчатости мезозойских пород и СВ простирацию ВСАВП. Формируется толща туфов, игнимбритов, перлитов риолитового субщелочного состава в ассоциации с субинтрузивными телами граносиенит-порфиром и

---

<sup>2</sup> Кузнецов Б.В., Терсбило В.И. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые центральной части Дальнегорского рудного района: отчет Дальнегорской партии о геологосъемочных и поисковых работах масштаба 1 : 25 000 за 1980–1985 гг. Владивосток: Фонды Приморского фил. ФБН ТФГИ по Дальневосточному федеральному округу, 1985. Инв. № 11414.

гранит-порфи́ров. По данным U-Pb датирования по цирконам [23], эти магматиты, описываемые как богопольский вулканический и якутинский интрузивный комплексы, формировались в южном Сихотэ-Алине, включая соседнюю с Дальнегорским районом Якутинскую ВТС, в интервале 60–53 млн лет. Эти комплексы, в отличие от позднемеловых магматитов, характеризуются высокодифференцированным составом обогащенных летучими компонентами исходных магм и исключительной принадлежностью пород к магматическим образованиям А-геохимического типа.

### **Солонцовая ВТС в раннепалеоценовой структуре Дальнегорского рудного района**

Дальнегорский рудный район проявлен как группа горст-антиклинальных поднятий, сложенных породами раннемелового складчатого комплекса Таухинской аккреционной призмы в окружении пород позднемелового вулканического чехла. Структурное обрамление горст-антиклинальных поднятий представлено в виде наложенных на складчатое мезозойское основание и плато-игнимбриты приморской серии локальных раннепалеоценовых вулканотектонических структур, проявленных как в разной степени эродированные постройки центрального типа (рис. 1).

В строении вулканических толщ, формирующих раннепалеоценовые ВТС, отчетливо проявлена антидромность [1, 20]. В основании вулканического разреза общей мощностью около 1 км доминируют риолиты и их туфы, в средней части – риодациты и дациты. Венчается разрез толщей эффузивов средне-основного состава. Жерловые фации части вулканов представлены гранит-порфирами и эруптивными брекчиями риолитового состава, но преобладают жерловины в виде экструзий андезитов и комагматичных им тел габбро и кварцевых диоритов.

Все промышленно значимые Pb-Zn месторождения Дальнегорского района пространственно сопряжены с раннепалеоценовыми ВТС (рис. 1).

*Солонцовая ВТС* – одна из наиболее насыщенных проявлениями Pb-Zn руд вулканических структур юго-западной части Дальнегорского района. В зоне ее северного кальдерного ограничения сконцентрировано около трети запасов полиметаллических руд района. Структура имеет овальную форму при протяженности по длинной северо-восточной оси около 10 км.

В западном, северном и восточном бортах Солонцовой ВТС обнажены раннемеловые складчатые комплексы Таухинского террейна, вмещающие Pb-Zn скарновые тела Партизанского месторождения палеоценового возраста ( $57 \pm 0,24$  млн лет, по данным Ar-Ar датирования ортоклаза скарнов [6]). Находящаяся в центре ВТС г. Солонцовая выражена как вулканический конус, сложенный в основании туфами и игнимбритами риолитов и риодацитов, а в верхней части – толщей андезитов, венчающей разрез дальнегорской свиты<sup>3</sup>. В жерловой зоне вулкана наряду с экструзиями андезитов присутствуют тела завершающих вулканизм эруптивных брекчий риолитового и риодацитового состава. По данным U-Pb датирования, выполненного во ВСЕГЕИ [4], толща андезитов Солонцового вулкана была сформирована в палеоцене  $59,6 \pm 1,3$  млн л.н. (проба О-1289/9) практически синхронно с

<sup>3</sup> Брилев Ю.Н. Отчет по завершению объекта...

гранодиоритами корневой зоны вулкана – интрузией 27-го ключа, датированной также палеоценом –  $60,45 \pm 0,65$  млн лет. По данным U-Pb анализа, выполненного в ДВГИ, андезиты на северном склоне Солонцового вулкана (вершина сопки Телевизионной) сформированы в раннем палеоцене  $62,4 \pm 1,2$  млн л.н. Здесь в основании ВТС, ниже уровня локализации скарновых рудных тел, скважинами вскрыта Партизанская гранитная интрузия, возраст которой оценен по данным K-Ar анализа, выполненного В.А. Баскиной в ИГЕМ РАН (устное сообщение), в 60 млн лет. Все интрузивные и вулканические породы Солонцовой ВТС пересекаются СЗ дайками андезибазальтов, датированных, с учетом изотопно-геохимической корректировки результатов K-Ar анализа, значениями около 55 млн лет [24].

В северо-западном сегменте Солонцовой ВТС, на склоне г. Телевизионная, были обнаружены пересекающие андезиты дальнегорской свиты ветвящиеся жиллообразные тела взрывных брекчий. В вертикальной плоскости (в разрезе) брекчии располагаются в 200–300 м непосредственно выше скарново-рудных тел месторождения Светлый Отвод, которые, в свою очередь, «подстилаются» Партизанской интрузией гранитоидов. По данным геолого-разведочных работ, часть скарноворудных тел месторождения Светлый Отвод локализована непосредственно под экраном толщи раннепалеоценовых андезибазальтов, перекрывающих раннемеловую олистостромовую толщу с глыбами триасовых известняков. По нашим данным и информации В.А. Баскиной [3], здесь же присутствуют рудные тела, сопряженные с контактами крутопадающих тел раннепалеоценовых (60 млн лет, K-Ar датирование) гранофириров.

Обнаруженные брекчии сложены мелкими (менее 1,5 см) обломками светло-серых трахидацитов и риодацитов в темном до черного тонкоперетертом обломочном цементе с обильными кристаллокластами кварца. На юго-западном склоне Солонцового вулкана тела таких брекчий выражены как завершающие вулканизм прорывы-диатремы с глыбами осадочных пород – алевролитов, кремнистых пород и известняков, отторгнутых от раннемелового таухинского фундамента, залегающего в этой части, по геофизическим данным, на глубине около 400 м. Тела взрывных брекчий пересекаются СЗ позднепалеоценовыми дайками андезибазальтов. Площадь распространения брекчий проявлена как обширная геохимическая аномалия с повышенными содержаниями свинца, цинка и серебра<sup>4</sup>. Здесь же фиксированы рудные точки в виде свалов окисленных свинцово-цинковых руд.

### **Объекты и методы аналитических исследований**

Объектами исследований выступили взрывные брекчии Солонцовой ВТС. Предметный интерес был сконцентрирован на изучении расплавных включений (РВ) в кристаллокластах кварца цемента брекчий и кварце обломков пород.

Изучение выполнено в полном объеме на основе аппаратной базы ДВГИ ДВО РАН (Владивосток). Использованные методы включали:

- 1) микроскопическое изучение включений в кварце под оптическим поляризационным микроскопом для геологических исследований NIKON E 600 POL;
- 2) гомогенизацию включений с использованием термостоллика Linkam TS1500 с последующим быстрым охлаждением. С целью достижения равновесных

---

<sup>4</sup> Брилев Ю.Н. Отчет по завершению объекта...

условий плавления РВ их нагревание проводилось в темпе 20 °С/мин с часовой выдержкой на 573 и 650 °С и с 1,5–2-часовыми каждые следующие 50–100 °С. Общая длительность каждого опыта составляла 15–20 ч;

3) изучение состава гомогенных фаз (стекла) и минеральных включений методом микронзондового анализа на четырехканальном микроанализаторе JXA 8100 при ускоряющем напряжении 20 кВ, ток 10 нА;

4) исследование газовой фазы в РВ методом рамановской спектроскопии на LabRam HR 800 (внешний Ag<sup>+</sup> лазер с длиной волны 514 нм, решетка 1800 ш/мм, спектральный диапазон 100–4000 см<sup>-1</sup>).

### Результаты исследований расплавных включений в кварце взрывных брекчий Солонцевой ВТС

В ходе микроскопических и аналитических исследований брекчий в кварце вкрапленников и кварцевых кристаллокластах были обнаружены два типа расплавных включений (РВ).

**РВ первого типа** найдены в кварцевых вкрапленниках обломков трахидацитовых пород и в кристаллокластах кварца из обломочного цемента брекчий. Это содержащие небольшое количество стекла по краям вакуоли полнораскристаллизованные включения размером от 10 до 40 мкм (рис. 2), расположенные группами от 3 до 15 или цепочками в краевых частях вкрапленников кварца. Температура гомогенизации включений составляет 900 °С.

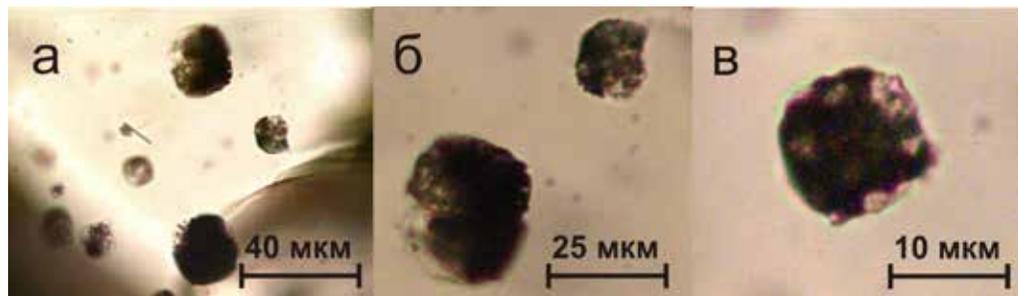


Рис. 2. Расплавные включения в кварце: *а* – в обломках трахидацитовых пород, *б* – в обломках риодацитов, *в* – в кристаллокластах цемента брекчий

По химическому составу расплавы в кварцах как обломков трахидацитовых пород, так и обломочного цемента брекчий соответствуют субщелочным и высококалиевым породам. По содержанию SiO<sub>2</sub> и других петрогенных элементов эти РВ не различаются между собой – около 65 масс.% (табл. 1). Индекс ASI равен 1,1 при отношении K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O, равном 1,6–1,7. В составе стекла присутствуют в среднем: TiO<sub>2</sub> – 0,07 масс.%, хлор – 0,02 и MgO – 0,2 масс.%. В стекле РВ кристаллокластов кварца зафиксировано присутствие 0,12 масс.% серы.

Среди кристаллических фаз РВ в обломке трахидацитовых пород установлен калиевый полевой шпат, в кристаллокластах цемента – калиевый полевой шпат и плагиоклаз. Иные фазы (в силу малых размеров, соизмеримых с диаметром электронного пучка, и захвата силикатной матрицы РВ) минерально корректно не идентифицированы. На качественном уровне они определены как К-Na полевой шпат (Ph. 1), ильменит (Ph. 2) и циркон (Ph. 3).

Средний химический состав стекла и кристаллических фаз в РВ первого типа

РВ	Кварц обломков трахидацитовых пород						Кристаллокласты кварца из обломочного цемента брекчий				
	gl. (18)	fps. (1)	Ph. 1 (5)	Ph. 2 (1)	Ph. 3 (1)	Ph. 4 (3)	gl. (12)	pl. (5)	fps. (5)	Ph. 5 (1)	Ph. 6 (1)
SiO <sub>2</sub>	65,86	65,16	60,28	31,68	58,29	26,86	67,16	67,96	65,24	34,8	27,27
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,08	18,77	16,08	8,15	13,99	12,52	17,24	19,57	18,35	19,24	21,15
FeO*	0,69	–	4,60	27,78	–	43,49	0,91	–	–	29,16	35,57
CaO	1,03	–	3,96	1,95	0,74	2,51	0,65	0,06	–	0,66	–
Na <sub>2</sub> O	4,29	4,55	4,22	1,97	3,74	2,20	4,30	11,35	2,19	2,86	2,33
K <sub>2</sub> O	7,22	8,79	6,09	2,99	4,86	1,84	6,81	0,64	14,22	4,43	2,96
MgO	0,02	–	0,42	2,02	–	5,86	–	–	–	1,38	3,03
TiO <sub>2</sub>	0,07	–	1,40	20,18	–	0,21	–	–	–	–	–
MnO	–	–	0,10	0,53	–	3,04	–	–	–	1,46	4,38
Cl	0,02	–	–	–	–	–	0,19	–	–	–	–
S	–	–	–	–	–	–	0,12	–	–	–	–
Zr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	–	–	–	–	13,56	–	–	–	–	–	–
ZnO	–	–	–	–	–	0,72	–	–	–	–	–
K <sub>2</sub> O/ Na <sub>2</sub> O	1,68	–	–	–	–	–	1,58	–	–	–	–
Всего	97,28	97,28	97,12	97,25	95,18	99,48	97,39	99,57	100,00	93,99	96,69

\* Общее железо.

Примечание. Здесь и в табл. 2: gl. – стекло; кристаллические фазы: pl. – плагиоклаз, fps. – калиевый полевой шпат, Ph. – минерально не идентифицированные фазы. Прочерк – не обнаружено.

Фазы Ph. 4, Ph. 5 и Ph. 6 определяются как минеральные сростания, где присутствуют силикаты и рудный минерал, в составе которого доминируют Fe и Mn. Для этих минеральных сростаний характерно наличие цинка (до 0,72 масс.%).

Электронно-зондовые микрофотографии расплавных включений в кварце трахидацитов и кристаллокластах цемента брекчий представлены на рис. 3.

Рис. 3. Кристаллические фазы в РВ в кварце трахидацитовых пород (а и б) и в кристаллокластах кварца цемента брекчий (в и г). gl – стекло, pl – плагиоклаз, fps – калиевый полевой шпат, Ph. 2 (il) – ильменит, Ph. 3 (zr) – циркон, Ph. 4–6 – неидентифицированные рудные фазы (см. табл. 1)

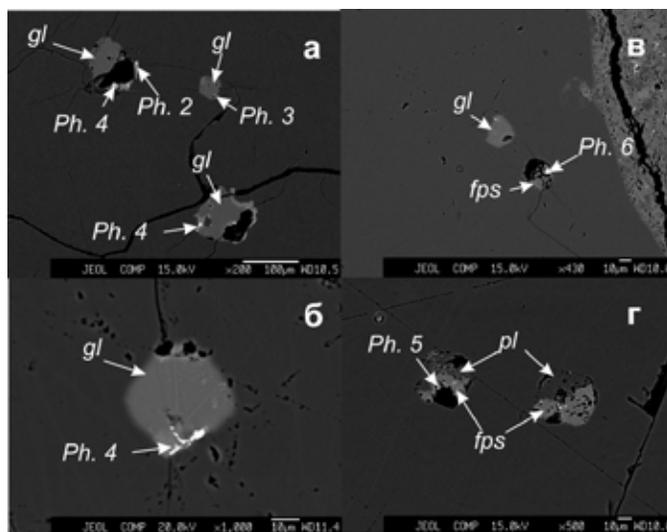


Таблица 2

Средний химический состав стекла и кристаллических фаз в РВ второго типа

РВ	Кварц обломков риодацитов				
	gl. (5)	fsp. (3)	pl. (5)	Ph. 7 (3)	Ph. 8 (2)
SiO <sub>2</sub>	72,69	64,78	67,86	37,64	49,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,34	19,51	19,25	18,77	31,90
FeO*	1,29	0,28	–	25,11	7,34
CaO	0,60	0,54	–	3,81	–
Na <sub>2</sub> O	1,35	2,53	11,01	2,80	0,31
K <sub>2</sub> O	5,26	12,44	0,92	3,07	11,74
MgO	–	–	–	0,51	–
Cl	0,27	0,00	–	–	–
K <sub>2</sub> O/ Na <sub>2</sub> O	3,9	–	–	–	–
Всего	96,80	100,07	99,03	93,48	100,80

\* Общее железо.

Методом рамановской спектроскопии не зафиксировано присутствие каких-либо газов в расплавах включений.

**РВ второго типа** представлены в кварцевых вкрапленниках обломков риодацитов. При размерах до 30 мкм они располагаются в кварце небольшими группами или поодиночке. Объем РВ заполнен темным непрозрачным (иногда по краям светлым) стеклом с мелкими кристаллическими фазами и одним или несколькими деформированными газовыми пузырями.

Температура гомогенизации включений размером 10–15 мкм в данных образцах составила 850 °С. В крупных РВ (40 мкм и

более) после прогрева сохраняется часть недоплавленных твердых фаз.

Включения этой группы, также как и предыдущей, соответствуют субщелочным и высококалийным породам, но содержат больше SiO<sub>2</sub> (табл. 2). Отношение K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O более высокое и равно 3,9, при индексе ASI 1,7. Титан и магний, рудные фазы не обнаружены. Среди кристаллических фаз РВ в кварце обломка риодацита установлены калиевый полевой шпат, плагиоклаз. На качественном уровне фаза Ph. 8 идентифицирована как ферримусковит.

Электронно-зондовые микрофотографии расплавных включений в кварце трахидацитов и кристаллокластах цемента брекчий представлены на рис. 4.

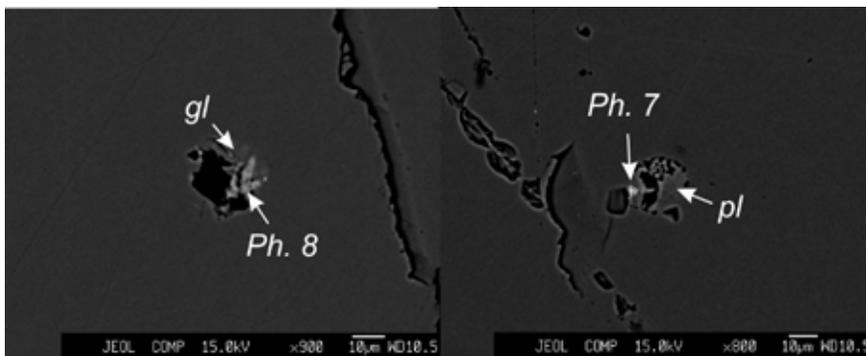


Рис. 4. Кристаллические фазы в РВ в кварце обломков риодацитовых пород. gl – стекло, pl – плагиоклаз, Ph. 7 – неидентифицированная рудная фаза, Ph. 8 (h) – ферримусковит (см. табл. 2).

В газовой фазе расплавных включений методом рамановской спектроскопии обнаружен углекислый газ.

## Обсуждение результатов изучения

Ориентируясь на особенности локализации брекчий и данные датирования пород Солонцовой ВТС, можно утверждать, что изученные брекчии были образованы в финале формирования раннепалеоценовой дальнегорской вулканоплутонической ассоциации. То есть по времени инъецирования брекчии близсинхронны процессам скарно- и рудообразования в интервале 60–57 млн л.н. и, вполне вероятно, являются продуктом рудоносного магматического очага, с которым связано возникновение локализованных на глубине скарновых руд месторождения Светлый Отвод. Это согласуется с данными по составу расплавных включений в кварце брекчий. Изучение РВ 1-го типа показывает, что формирование раннепалеоценового флюидонасыщенного очага в финале дальнегорского импульса магматизма следует связывать с суперплюмазитовым расплавом трахидацитового состава ( $ASI = 1,1$ ), обогащенного серой, хлором и рудными компонентами (Zn, Mn, Fe, Ti). Появление более кремнекислых расплавов риодацитового состава (РВ 2-го типа) является, вероятно, результатом флюидно-магматической дифференциации трахидацитового расплава на фоне проявившейся интенсивной кристаллизации альбита (рис. 5).

Как результат дифференциации остаточный кремнекислый расплав при снижении содержания алюминия и натрия приобретает ультракалиевую специализацию

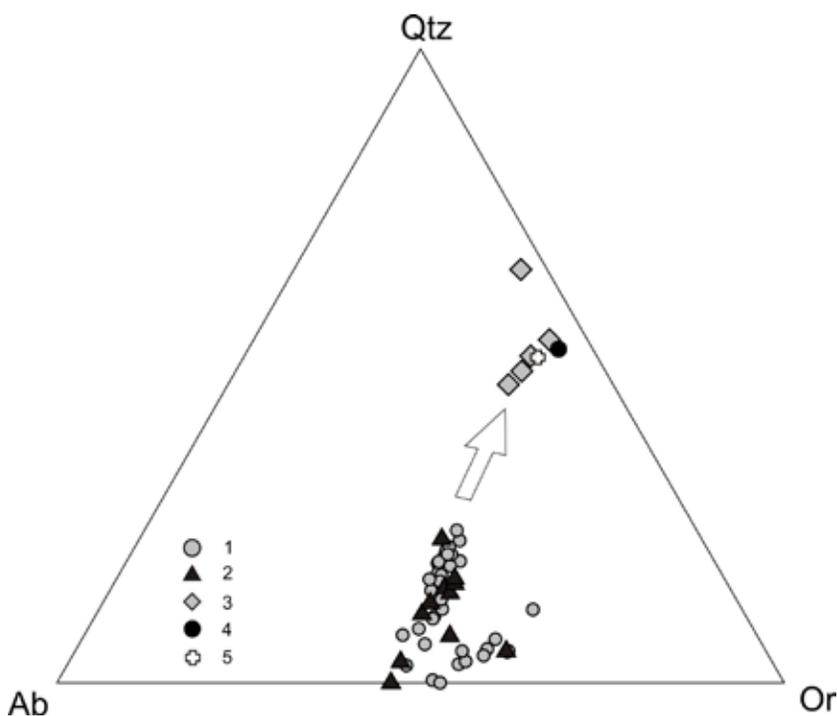


Рис. 5. Положение модельных точек эволюционирующего состава РВ взрывных брекчий и состава ультракалиевых рудоносных даек Арсеньевского и Лидовского месторождений на Ab-Qtz-Or диаграмме.

1 – РВ в кристаллокластах кварца из обломочного цемента брекчий, 2 – РВ в кварце обломков трахидацитовых пород, 3 – РВ в кварце обломков риодацитов, 4 – дайковые ультракалиевые риолиты Арсеньевского месторождения, 5 – дайковые ультракалиевые риолиты Лидовского месторождения

( $K_2O/Na_2O \sim 3,9$ ), а отделившаяся от расплава флюидная фаза, обогащенная рудными компонентами и серой, обеспечивает взрывчатый характер внедрения брекчий и гидротермальную переработку вмещающих вулканических пород.

По составу расплавов изученные брекчии аналогичны дайкам палеоценовых ультракалийевых риолитов Sn-Pb-Zn Арсеньевского месторождения соседнего Кавалеровского рудного района [25] (см. рис. 5). По нашим данным [26] и наблюдениям, ультракалийевые дайки пространственно сопряжены с телами оруденелых взрывчатых брекчий и жилами хлорит-касситерит-сульфидного состава. Участками дайки представляют собой «типичную риолитовую кварцево-полевошпатовую массу с небольшим количеством рудных минералов, вытянутых вдоль флюидальности» [26, с. 20]. Рудоносные дайки рассматриваются как жилеобразные инъекции поликомпонентной аномально обогащенной рудными компонентами флюидно-расплавной массы, сформированной в результате флюидно-магматической дифференциации в объеме рудоносного магматического очага.

Пространственно-временная сопряженность процессов рудообразования с внедрением даек ультракалийевых риолитов фиксируется в Дальнегорском районе на Лидовском месторождении. Часть жильных рудных тел, по нашим данным, пространственно непосредственно совмещена с дайками ультракалийевых риолитов (см. рис. 5), характерной особенностью которых является присутствие миндалин с сульфидным галенит-сфалеритовым выполнением.

Масштабным примером ассоциированности Pb-Zn рудообразования с эруптивными и взрывчатыми брекчиями риолитового состава является Красногорское месторождение. Здесь брекчии с характерной ультракалийевой специализацией непосредственно формируют рудную зону в виде жерловины раннепалеоценового палеовулкана [27]. Ультракалийевые риолиты присутствуют, по неопубликованным данным В.И. Попова, в составе ассоциированного с Pb-Zn жильными телами дайкового комплекса Майминовского месторождения.

Все указанное в сумме подчеркивает представления о связи изученных ультракалийевых взрывчатых брекчий с рудоносным магматическим очагом и дает основание использовать ареалы их распространения при оконтуривании площадей с перспективами обнаружения рудных объектов на глубине.

Можно предполагать, что проявление флюидно-магматической дифференциации и формирование рудоносных очагов, обогащенных серой, связаны со спецификой геодинамического режима в раннем палеоцене. Ключевыми моментами, видимо, являются смена субдукции режимом трансформного скольжения литосферных плит и, как результат, реализация мантийно-корового взаимодействия в виде синхронного проявления базитового и гранитоидного магматизма. Ювенильный флюидный поток обеспечивает при этом обогащение верхнекоревых расплавов, формирующих гранитоидные очаги, анионной составляющей, включая хлор и доминирующую в последующем рудном процессе ювенильную серу.

Объемная сульфидизация характерна, по нашим данным, для Опричненского массива, гранитоидов массива 27-го ключа в основании Солонцовой ВТС и для гранит-порфиров в составе раннепалеоценовой гранитно-габбровой жерловой зоны Николаевского палеовулкана.

Высокий уровень мантийной составляющей в формировании рудоносных гранитоидов дальнегорского комплекса находит свое выражение в свинцово-изотопной характеристике Pb-Zn руд и интрузивных пород Дальнегорского рудного района [2].

## Заключение

Изученные эксплозивные брекчии Солонцовой ВТС отвечают финалу формирования дальнегорской раннепалеоценовой вулcano-плутонической ассоциации, сформированной в условиях перехода субдукции к режиму трансформного взаимодействия литосферных плит.

Представляется, что брекчии связаны с промежуточным рудоносным магматическим очагом и могут рассматриваться как прогностно-поисковый признак при оценке перспектив рудоносности вулканических структур Дальнегорского рудного района в отношении скрытого на глубине свинцово-цинкового оруденения.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Король Р.В. Структура, магматизм и свинцово-цинковое оруденение Дальнегорского рудного района Приморья: автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. Владивосток, 1975. 37 с.
2. Chugaev A.V., Chernyshev I.V., Ratkin V.V. et al. Contribution of crustal and mantle sources to genesis of Sn, B and Pb-Zn deposits in South Sikhote-Alin subprovince (Russian Far East): Evidence from high-precision MC-ICP-MS lead isotope study // *Ore Geology Reviews*. 2020. Vol. 125. 103683. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103683.
3. Баскина В.А. Магматизм Тетюхинского района (Южное Приморье) и закономерности развития некоторых вулcano-плутонических формаций. М.: Наука, 1965. 212 с.
4. Геохронологический атлас-справочник ВСЕГЕИ. URL: <http://geochron-atlas.vsegei.ru/downloadFile.php?id=132> (дата обращения: 5.04.2023).
5. Jahn B.-M., Valui G., Kruk N. et al. Emplacement ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characterization of Mesozoic to Early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin orogenic belt, Russian Far East: crustal growth and regional tectonic evolution // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015. Vol. 111. P. 872–918. DOI: 10.1016/j.jseaes.2015.08.012.
6. Лейер П., Раткин В.В. Первое прямое  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ -определение возраста скарнов Дальнегорского рудного района на юге Дальнего Востока России // *Докл. АН*. 1997. Т. 352, № 2. С. 222–225.
7. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2-х кн. / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 2. С. 573–981.
8. Толстых М.Л., Певзнер М.М., Наумов В.Б., Бабанский А.Д., Кононкова Н.Н. Типы расплавов, формирующих пирокластические породы различных структурно-возрастных комплексов вулканического массива Шивелуч (Камчатка), по данным изучения включений в минералах // *Петрология*. 2015. Т. 23, № 5. С. 521–560. DOI: 10.7868/S0869590315040056.
9. Наумов В.Б., Коваленко В.И., Дорофеева В.А., Гирнис А.В., Ярмолук В.В. Средний состав магматических расплавов главных геодинамических обстановок по данным изучения расплавных включений в минералах и закалочных стекол пород // *Геохимия*. 2010. № 12. С. 1266–1288.
10. Баданина Е.В., Сырицо Л.Ф., Абушкевич В.С., Томас Р., Трамболл Р.Б. Геохимия ультракалиевых риодацитовых магм из ареала Орловского массива Li-F гранитов в восточном Забайкалье на основе изучения расплавных включений в кварце // *Петрология*. 2008. Т. 16, № 3. С. 317–330.
11. Андреева И.А. Генезис и механизмы образования редкометалльных щелочных гранитов массива Халзан-Бурегтей, Монголия: данные изучения расплавных включений // *Петрология*. 2016. Т. 24, № 5. С. 499–514. DOI: 10.7868/S0869590316050022.
12. Frezzotti M.-L. Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: applications to petrology // *Lithos*. 2001. Vol. 55, iss. 1–4. P. 273–299. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00048-7).
13. Bodnar R.J., Frezzotti M.-L. Microscale Chemistry: Raman Analysis of Fluid and Melt Inclusions // *Elements*. 2020. Vol. 16, iss. 2. P. 93–98. DOI: 10.2138/gselements.16.2.93.
14. Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. М.: Наука, 1990. 181 с.
15. Sillitoe R.H. Ore-related breccias in volcanoplutonic arc // *Econ. Geol.* 1985. Vol. 80. P. 1467–1514. DOI: 10.2113/GSECONGEO.80.6.1467.
16. Grebennikov A.V., Khanchuk A.I., Gonevchuk V.G., Kovalenko S.V. Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia): Geochemistry and tectonic implications // *Lithos*. 2016. Vol. 261. P. 250–261. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.12.020.

17. Grebennikov A.V., Kemkin I.V., Khanchuk A.I. Paleocene- early Eocene post-subduction magmatism in Sikhote-Alin (Far East Russia): New constraints for the tectonic history of the Izanaga-Pacific ridge and the East Asia continental margin // *Geoscience Frontiers*. 2021. Vol. 12, iss. 4. 101142. DOI: 10.1134/S1819714020050024.

18. Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В. Альб-сеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // *Тихоокеан. геология*. 2019. Т. 38, № 3. С. 4–29. DOI: 10.30911/0207-4028-2018-38-3-4-37.

19. Гребенников А.В., Попов В.К. Петрохимические аспекты позднемиоценового и палеогенового игнимбритового вулканизма восточного Сихотэ-Алиня // *Тихоокеан. геология*. 2014. Т. 33, № 1. С. 41–57.

20. Михайлов В.А. Магматизм вулcano-тектонических структур южной части Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. 172 с.

21. Костин А.Я., Королев В.Н., Пенежина Л.А., Лосив В.М. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000. Изд. 2-е. Серия Южно-Сихотэ-Алинская. Лист L-53-XXXIV, XXXV (Дальнегорск). Объяснительная записка. СПб.: Изд-во СПб. картфабрики ВСЕГЕИ, 2006. 204 с.

22. Гребенников А.В., Максимов С.О. Причины появления вулканических пород А-типа на активных окраинах континентов на примере Южного Сихотэ-Алиня (Дальний Восток России) // *Геология и геофизика*. 2021. Т. 62, № 2. С. 254–272. DOI: 10.15372/GiG2020114.

23. Гребенников А.В., Касаткин С.А., Федосеев Д.Г., Ханчук А.И. Среднепалеоцен-раннеэоценовый (60,5–53,0 млн лет) этап магматизма на юге Дальнего Востока России // *Тихоокеан. геология*. 2020. Т. 39, № 5. С. 34–40. DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-5-34-40.

24. Дубинина Е.О., Баскина В.А., Авдеев А.С. Природа рудообразующих растворов Дальнегорского месторождения: изотопные и геохимические параметры измененных вмещающих пород // *Геология руд. месторождений*. 2011. Т. 53, № 1. С. 65–82.

25. Поповиченко В.В. Эволюция магматизма Кавалеровского рудного района: автореф. дис. ... канд. г.-м. наук. Владивосток, 1992. 31 с.

26. Родионов С.М., Шнайдер А.А., Бакулин Ю.И. и др. Новые данные о генезисе оловянного оруденения в Приморье // *Руды и металлы*. 2009. № 5. С. 18–24.

27. Симаненко Л.Ф., Раткин В.В., Турчин В.А. Минеральные ассоциации олово-полиметаллических порфировых руд палеовулкана на г. Красной (Красногорское месторождение, Дальнегорский рудный район) // *Тихоокеан. геология*. 2015. Т. 34, № 2. С. 44–60.

## REFERENCES

1. Korol R.V. *Struktura, magmatizm i svintsovo-tsinkovoe orudnenie Dal'negorskogo rudnogo raiona Primor'ya* = [Structure, magmatism and Pb-Zn mineralization of the Dalnegorsk ore district. Primorye]: Author's abstract, PhD in geological and mineralogical sciences. Vladivostok; 1975. 37 s. (In Russ.).

2. Chugaev A.V., Chernyshev I.V., Ratkin V.V. et al. Contribution of crustal and mantle sources to genesis of Sn, B and Pb-Zn deposits in South Sikhote-Alin subprovince (Russian Far East): Evidence from high-precision MC-ICP-MS lead isotope study. *Ore Geology Reviews*. 2020;125:103683. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2020.103683.

3. Baskina V.A. *Magmatizm Tetyukhinskogo raiona (Yuzhnoe Primor'e) i zakonomernosti razvitiya nekotorykh vulkano-plutonicheskikh formatsii* = [Tetyukhe district (South Primorye) magmatism and development regularities of certain volcanic-plutonic formations]. Moscow: Nauka; 1965. 212 s. (In Russ.).

4. *Geokhronologicheskii atlas-spravochnik VSEGEI* = [Geochronological atlas of VSEGEI]. (In Russ.). URL: <http://geochron-atlas.vsegei.ru/downloadFile.php?id=132> (cited: 5.04.2023).

5. Jahn B.-M., Valui G., Kruk N. et al. Emplacement ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characterization of Mesozoic to Early Cenozoic granitoids of the Sikhote-Alin jrogenic belt, Russian Far East: crustal growth and regional tectonic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2015;111:872-918. DOI: 10.1016/j.jseas.2015.08.012.

6. Layer P., Ratkin V.V. The first <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar skarn dating in the Dalnegorsk ore district (southern part of Russian Far East). *Doklady Akademii nauk*. 1997;352(2):222-225. (In Russ.).

7. Khanchuk A.I. (ed.). *Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii* = [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East].: 2 vol. Vladivostok: Dalnauka; 2006. Vol. 2. S. 573-981. (In Russ.).

8. Tolstykh M.L., Naumov V.B., Kononkova N.N., Pevzner M.M., Babanskii A.D. Types of parental melts of pyroclastic rocks of various structural-age complexes of the Shiveluch volcanic massif, Kamchatka: evidence from inclusions in minerals. *Petrology*. 2015;23(5):480-517. DOI: 10.1134/S0869591115040050.

9. Naumov V.B., Kovalenko V.I., Dorofeeva V.A., Giris A.V., Yarmolyuk V.V. 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*. 2010;48(12):1185-1207. DOI: 10.1134/S0016702910120049. (In Russ.).
10. Badanina E.V., Syritso L.F., Abushkevich V.S., Thomas R., Trumbull R.B. Geochemistry of ultra-potassic rhyodacite magmas from the area of the orlovka massif of li-f granites in eastern transbaikalia: evidence from study of melt inclusions in quartz. *Petrology*. 2008;16(3):299-311. DOI: 10.1134/S0869591108030053.
11. Andreeva I.A. Genesis and mechanisms of formation of rare-metal peralkaline granites of the Khaldzan Buregtey massif, Mongolia: evidence from melt inclusions. *Petrology*. 2016;24(5):462-476. DOI: 10.1134/S0869591116050027.
12. Frezzotti M-L. Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: applications to petrology. *Lithos*. 2001;55(1-4):273-299. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(00\)00048-7](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(00)00048-7) (cited: 5.04.2023).
13. Bodnar R.J.; Frezzotti M.-L. Microscale Chemistry: Raman Analysis of Fluid and Melt Inclusions. *Elements*. 2020;16(2):93-98. DOI: 10.2138/gselements.16.2.93.
14. Reif F.G. Rudoobrazuyushchii potentsial granitov i usloviya ego realizatsii = [Ore-forming potential of granites and its implementation conditions]. Moscow: Nauka; 1990. 181 p. (In Russ.).
15. Sillitoe R.H. Ore-related breccias in volcanoplutonic arc. *Econ. Geol.* 1985;80:1467-1514. DOI: 10.2113/GSECONGEO.80.6.1467.
16. Grebennikov A.V., Khanchuk A.I., Gonevchuk V.G., Kovalenko S.V. Cretaceous and Paleogene granitoid suites of the Sikhote-Alin area (Far East Russia): Geochemistry and tectonic implications. *Lithos*. 2016;261:250-261. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.12.020.
17. Grebennikov A.V., Kemkin I.V., Khanchuk A.I. Paleocene-early Eocene post-subduction magmatism in Sikhote-Alin (Far East Russia): New constraints for the tectonic history of the Izanaga-Pacific ridge and the East Asia continental margin. *Geoscience Frontiers*. 2021;12(4):101142. DOI: 10.1134/S1819714020050024.
18. Khanchuk A.I., Grebennikov A.V., Ivanov V.V. Albian-cenomanian orogenic belt and igneous province of Pacific Asia. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2019;18(3):187-219. DOI: 10.1134/S1819714019030035.
19. Grebennikov A.V., Popov V.K. Petrogeochemical aspects of the late cretaceous and paleogene ignimbrite volcanism of east Sikhote-Alin. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014;33(1):38-55. DOI: 10.1134/S1819714014010035.
20. Mikhailov V.A. Magmatizm vulkano-tektonicheskikh struktur yuzhnoi chasti Vostochno-Sikhote-Alinskogo vulkanicheskogo poyasa = [Volcano-tectonic structures magmatism in the southern Vostochny-Sikhote-Alin volcanic belt]. Vladivostok: FEB AS SSSR; 1989. 172 s. (In Russ.).
21. Kostin A.Ya., Korolev V.N., Penezhina L.A., Losiv V.M. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii. Mashtab 1 : 200 000 = [Geologic map L-53-XXXIV, XXXV (Dalnegorsk). The state geological map of the Russian Federation]. 2nd ed. The South Sikhote-Alin series, scale: 1:200000. Explanatory report. Sainkt-Petersburg: Izdatelstvo SPb kartfabriki VSEGEI; 2006. 204 p. (In Russ.).
22. Grebennikov A.V., Maksimov S.O. Causes of the occurrence of A-type volcanic rocks in active continental margins (Southern Sikhote-Alin, Russian Far East). *Russian Geology and Geophysics*. 2021;62(2):207-222. DOI: 10.2113/RGG20194099.
23. Grebennikov A.V., Kasatkin S.A., Fedoseev D.G., Khanchuk A.I. The middle paleocene-early eocene (60,5-53,0 ma) magmatic stage in the Southern Russian Far East. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2020;14(5):415-420. DOI: 10.1134/S1819714020050024.
24. Dubinina E.O., Baskina V.A., Avdeenko A.S. Priroda rudoobrazuyushchikh rastvorov Dal'negorskogo mestorozhdeniya: izotopnye i geokhimicheskie parametry izmenennykh vmeshchayushchikh porod = [Nature of ore-forming fluids of Dalnegorskoye deposit: isotopic and geochemical parameters of altered wallrocks]. *Geology of ore deposits*. 2011;53(1):65-82. (In Russ.).
25. Popovichenko V.V. Evolyutsiya magmatizma Kavalerovskogo rudnogo raiona = [Magmatic evolution of the Kavalerovo ore district]: Author's abstract, PhD in geological and mineralogical sciences. Vladivostok; 1992. 31 p. (In Russ.).
26. Rodionov S.M., Schnaider A.A., Bakulin Yu.I., et al. Novye dannye o genezise olovyannogo orudneniya v Primor'e = [New data on the tin mineralization genesis in Primorye]. *Rudy i metall*. 2009;(5):18-24. (In Russ.).
27. Simanenko L.F., Ratkin V.V., Turchin V.A. Mineral assemblages of the porphyry tin-polymetallic ores of mount Krasnaya paleovolcano of the Krasnogorsky deposit in the Dal'negorsk ore district. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2015;9(2):120-135. DOI: 10.1134/S1819714015020062.