

УДК. 552.553.4

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-196-211

Изотопно-геохимические особенности генезиса магматических комплексов рудоносных систем Чукотского сектора Арктического побережья России

В. Г. Сахно, Л. С. Цурикова

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, 690022, г. Владивосток, пр-т 100-летия Владивостока, 159,
e-mail: v_sakhno@mail.ru

Поступила в редакцию 03.09.2018 г., принята к печати 15.02.2019 г.

Объект исследований. Изотопный состав (Pb-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, Os/Os, Hf/Hf, $^3\text{He}/^4\text{He}$ и др.) магматических комплексов и рудно-магматических систем (РМС) двух рудных узлов (Купольского и Илирнейского) приполярной западной Чукотки, различающихся как структурным положением, так и возрастом слагающих их магматических комплексов, в пределах которых известны крупнейшие месторождения Au-Ag типа. **Методы.** Изотопные системы Pb-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, Re-Os, Lu-Hf, $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ и серы исследовались в центре изотопных исследований (ЦИИ) ВСЕГЕИ (С.-Петербург), а также в Институте геологии, геохимии и рудных месторождений ИГЕМ (Москва) и в лаборатории стабильных изотопов Дальневосточного геологического института ДВГИ (г. Владивосток). Определения Re и Os проводились на одноколлекторном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS ELEMENT-2. Измерение изотопных соотношений серы проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253. **Результаты и выводы.** На основе изотопно-геохимических данных сделано предположение, что в генерации магм участвовали различные глубинные источники, а дифференцированный состав поздних расплавов, возможно, отражает процессы плавления верхних горизонтов коры. При сравнении данных по магматизму илирнейского и купольского рудных узлов выявляется различная степень влияния коровых пород на генерацию расплавов. Для Купольского рудного узла свойственно большое влияние мантийных источников во внутриплитном магматизме, связанном с процессами рудообразования. Возможно, это и определяет больший объем оруденения для Купольского узла по сравнению с Илирнейским.

Ключевые слова: магматизм западной Чукотки, изотопы свинца, гелия, Au-Ag рудоносность

Благодарность

Авторы искренне признательны сотрудникам компании KINROSS за оказанную помощь в проведении экспедиционных работ в условиях Крайнего Севера.

Isotopic and geochemical features of the genesis of igneous complexes and ore-magmatic systems in the Chukotka sector of the Russian Arctic coast

Vladimir G. Sakhno, Ludmila S. Tsurikova

Far East Geological Institute FEB RAS, 159 Century of Vladivostok av., Vladivostok 690022, Russia,
e-mail: v_sakhno@mail.ru

Received 03.09.2018, accepted 15.02.2019

Research subject. The isotopic composition (Pb-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, Os/Os, Hf/Hf, $^3\text{He}/^4\text{He}$, etc.) of magmatic complexes and ore-magmatic systems (OMS) of two ore clusters (Kupolsky and Ilirneysky) located in the subpolar Western Chukotka was studied. These ore clusters differ from each other both in their structural position and the age of their magmatic complexes, within which the largest deposits of Au-Ag type are known. **Materials and methods.** The Pb-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, Re-Os, Lu-Hf, $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ and sulphur isotopic systems were studied at the VSEGEI centre for isotopic studies (St. Petersburg), as well as at the Institute of Geology, Geochemistry and Ore Deposits (IGEM, Moscow) and the Laboratory of Stable Isotopes of the Far Eastern Geological Institute (FEGI, Vladivostok). Re and Os were measured using an ELEMENT-2 inductively coupled plasma single-collector mass spectrometer. Sulphur isotopic ratios were measured

Для цитирования: Сахно В.Г., Цурикова Л.С. (2020) Изотопно-геохимические особенности генезиса магматических комплексов рудоносных систем Чукотского сектора Арктического побережья России. *Литосфера*, 20(2), 196–211. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-196-211

For citation: Sakhno V.G., Tsurikova L.S. (2020) Isotopic and geochemical features of the genesis of igneous complexes and ore-magmatic systems in the Chukotka sector of the Russian Arctic coast. *Litosfera*, 20(2), 196–211. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-196-211

© В.Г. Сахно, Л.С. Цурикова, 2020

using a Finnigan MAT 253 isotope mass spectrometer. *Results and conclusions.* On the basis of the isotope-geochemical data obtained, an assumption was made that various deep sources participated in the magma generation, and the differentiated composition of late melts may reflect the melting processes of the crust upper horizons. When comparing the data on the magmatism of the Ilirneysky and Kupolsky ore clusters, a different degree of crustal rock influence on melt generation was revealed. The Kupolsky ore cluster is characterised by a large influence of mantle sources in intraplate magmatism associated with ore formation processes. This is likely to have determined a greater amount of mineralisation in the Kupolsky cluster compared to the Ilirneysky ore cluster.

Keywords: magmatism of western Chukotka, lead and helium isotopes, Au-Ag ore content

Acknowledgments

The authors are sincerely grateful to KINROSS employees for their assistance in carrying out expedition work in the Far North.

ВВЕДЕНИЕ

На площади Чукотского сектора Арктической зоны Северо-Востока России известны золото-серебряные месторождения и рудопроявления, связанные с вулcano-структурами мелового возраста. Первоначально меловые магматические комплексы Чукотки частично или полностью относили к Охотско-Чукотскому вулканическому поясу (ОЧВП) (Белый, 1977; Котляр, 1986; и др.).

В последние годы установлено, что некоторые вулканические структуры, расположенные к западу от ОЧВП и поперечные к его простираению, не являются его апофизами, так как имеют раннемеловой возраст (Сахно и др., 2014, 2016, 2019; Тихомиров и др., 2017; и др.). Для вулканических комплексов ОВЧП и его Чукотской части на основе современных инструментальных методов (SHRIMP-метод) был установлен позднемеловой возраст (Акинин, Миллер, 2011; Сахно и др., 2014, 2016). Кроме того, магматические комплексы, поперечные к структурам ОЧВП, имеют определенные отличия от них не только по времени формирования, но и по условиям петрогенезиса, что представляется важным для решения вопросов эволюции рудно-магматических систем и прогноза месторождений двух рудных узлов – Илirнейского и Купольского. В Илirнейском узле известно месторождение Двойное и перспективное рудопоявление Сентябрьское. Купольский рудный узел с крупным месторождением Купол и перспективными рудопоявлениями Морошка, Прикуп, Токай находится в пределах ОЧВП, а основной магматический процесс, ответственный за его формирование, отвечает альб-сеноманскому времени (Сахно и др., 2014, 2016; Тихомиров и др., 2017).

Помимо петрологических методов исследования и определения возраста магматических комплексов для оценки рудоносности РМС имеет определенное значение исследование изотопных систем, таких как Pb-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, Re-Os, Hf/Hf, Lu-Hf, $^3\text{He}/^4\text{He}$, изотопов серы и других. Они служат индикаторами мантийно-коровых процессов и позволяют решить вопросы источника рудного ве-

щества, дифференциации расплавов и перспективности РМС.

Данные этих исследований позволяют определять многие параметры генезиса магматических пород и их рудоносности. Это, прежде всего, степень контаминации коровых пород мантийными расплавами. Так, значения Re/Os в мантийных породах соответствуют отношениям в метеоритах, тогда как в основных расплавах отношения резко повышены за счет очень низких содержаний осмия в коровых породах, т.е. Re/Os отношение в земной коре намного больше, чем в мантии, а радиогенный осмий (^{187}Os) в большей степени накапливается в коровых расплавах (гранитах, риолитах и др.). Такая контаминация может определять характер генерации рудоносных магм.

Характер дифференциации магм в свете корово-мантийных процессов определяется лютеций-гафниевыми (Lu-Hf), рубидий-стронциевыми (Rb-Sr), самарий-неодимовыми (Sm-Nd) и другими изотопными системами. Как отмечалось выше, поведение изотопов гафния и неодима в некоторой степени подобно при петрогенезисе коровых расплавов, тем не менее существуют и определенные различия. Так, первичные отношения изотопов неодима в магматических породах позволяют предполагать возможность вовлечения древних коровых пород в новый этап генерации расплавов, что является важным критерием их петрогенезиса и в определенной степени рудоносности (Фор, 1989; и др.).

Не менее важное значение имеет изучение гелиевой ($^3\text{He}/^4\text{He}$) и аргонной (Ar/Ar) изотопии для решения вопросов о влиянии глубинных флюидов на генерацию рудоносности магм и корово-мантийные процессы. Анализ изотопов гелия и аргона позволяет оценить вклад глубинных (мантийных) процессов и соответствующей флюидной составляющей при генерации расплавов и формировании рудно-магматических систем. А соотношения радиогенного (глубинного) аргона и атмосферного ($^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$) в РМС позволяет судить о степени эрозионного среза рудоносных структур.

В заключение следует подчеркнуть, что комплексный подход к исследованию рудоносно-

сти РМС, который включает не только определения петрохимического, геохимического (микроэлементного и РЗЭ) состава пород, но и изотопных систем, дает основание более объективно оценивать перспективность РМС, в данном случае золото-серебряного профиля. Определение масштабности рудного процесса (объемности) РМС представляет собой трудную задачу. Согласно комплексным исследованиям, проведенным российскими учеными, было установлено, что промышленная значимость определяется многими факторами: участием глубинных процессов в формировании РМС, структурной позицией, длительностью их развития (десятки млн лет) и объемным участием флюидной фазы (в особенности глубинной). (Крупные и суперкрупные месторождения..., 2004; и др.).

Прежде чем перейти к анализу изотопных систем магматических комплексов РМС двух рудных узлов Приполярной Чукотки – Илирнейскому и Купольскому, следует подчеркнуть их различия как по геологическому строению, так и по возрасту, составу магматизма и по параметрам рудного процесса (Кравцов и др., 2005; Сидоров и др., 2007; Особенности..., 2008; Сахно и др., 2014, 2016; и др.).

КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Илирнейский рудный узел

Рудный узел располагается в Восточной части Верхояно-Чукотской складчатой области, в которую входит несколько тектонических зон: Анюйская, Олойская и Южно-Анюйская сутура – след закрытия Южно-Анюйского океана (Лаверов и др., 2013; Верниковский и др., 2013; и др.). Основная часть разреза этих зон представлена осадочными породами девона, карбона, триаса, юры и раннего мела. Все эти комплексы смяты в складки, имеющие СЗ простирание. Они частично перекрыты раннемеловыми вулканитами наложенных впадин: Тытыльвеевской, Мангазейской, Раучуанской, Нутесынской. В пределах этих впадин известны крупнообъемные массивы гранитоидов и габброидов (Тихомиров и др., 2017; и др.).

Возраст этих вулканогенных образований, а также некоторых интрузий, полученный на основе изотопного датирования пород главным образом Тытыльвеевского прогиба и Раучуанской впадины, соответствует апту ($121.4 \pm 2.8 - 112.0 \pm 1.0$ млн лет) (Miller et al., 2010; Сахно и др., 2014, 2016; Тихомиров и др., 2017).

Илирнейский узел располагается в восточной части Тытыльвеевского прогиба, к востоку от которого он перекрывается вулканитами ОЧВП (Сахно и др., 2019, рис. 1). В нем известно месторождение Двойное и рудное поле Сентябрьское, в пре-

делах которого выделяются три рудных участка: Сентябрьское-Центральное, Сентябрьское-Южное, Сентябрьское-СВ. Последнее выделено в ходе поисково-оценочных работ, проведенных в 2010 г., а в настоящее время проведены более детальные работы, которые позволили получить новые данные о строении и составе слагающих эту структуру вулканитов и рудопроявлении (Савва и др., 2016). В пределах рудного поля развиты вулканиты тытыльвеевской свиты, нижняя часть которой представлена в большей части андезитами, средняя часть сложена туфами риолитов, риолито-дацитов, лавобрекчиями этих пород, а верхняя – андезитами. По данным (Савва и др., 2012), весь комплекс прорывают экстррузивные и дайковые тела андезитов, которые, в свою очередь, прорываются оруденелыми эксплозивными брекчиями, агломератами и дайками риолитов, замещенных кварц-полевошпат-хлоритовыми и хлорит-гидрослюдистыми породами, которые слагают тело, представляющее собой трубку взрыва с золото-кварц-полиметаллическим оруденением. Детальное описание геологии этого рудопроявления дано в статьях (Савва и др., 2012; Николаев и др., 2013) (рис. 1).

Весьма характерно поведение щелочей в породах вулканогенной толщи Сентябрьское-СВ как для андезитов, так и риолитов. Среди них встречаются породы как с высоким, так и с низким содержанием K_2O . Наиболее высокое содержание K_2O свойственно андезито-дацитам (нижняя толща). Среди риолитов характерны высоконатровые разновидности. Для таких пород отмечаются повышенное содержание хрома и высокая степень вторичных изменений. Для микро- и редкоземельных элементов также характерны значительные колебания, особенно бария в риолитах. Более подробно особенности петро- и микроэлементного состава вулканических пород Сентябрьской РМС рассмотрены ранее (Сахно и др., 2014, 2016, 2019; Тихомиров и др., 2017; и др.).

Возраст магматических пород, определенный SHRIMP-методом по цирконам, показывает, что покровные вулканиты Тытыльвеевской свиты соответствуют апту, а экстррузивные и дайковые комплексы – верхнемеловой (сеноман-турон) эпохе (Сахно и др., 2015, 2016; Тихомиров и др., 2017).

Возраст оруденения, связанного с трубкой взрыва (определения по адуляру из рудной зоны), относится к более позднему времени – 93–89 млн лет. Можно предполагать его инициирование с экстружиями и дайковыми телами андезитов и монцо-диоритов, возраст которых, определенный SHRIMP-методом по цирконам (в РМС Двойное), колеблется в пределах 92–93 млн лет.

Рудно-магматическая система Двойное расположена в 16 км южнее Сентябрьского в тытыльвеевской впадине, но, в отличие от Сентябрьского, локализована в пределах развития интрузивных мас-

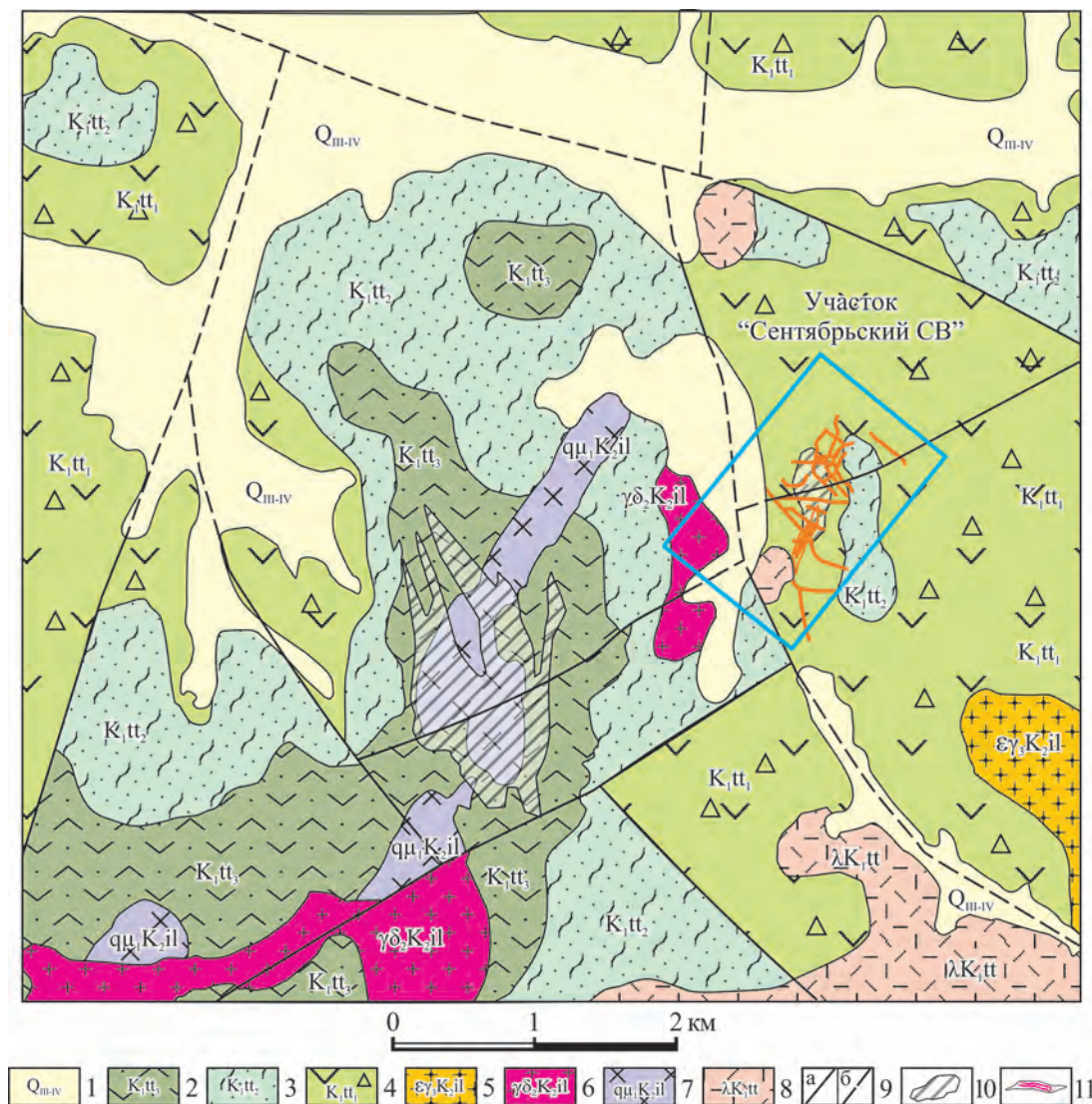


Рис. 1. Схема геологического строения месторождения Сентябрьское (участок Сентябрьский СВ) по данным KINROSS, 2008.

1 – Неоплейстоцен-голоцен: ледниковые валуны, галечники, гравий, пески, глины; аллювиальные галечники, валуны, гравий, пески; 2–4 – Тытылвеевская свита: 2 – верхняя подсвита (андезиты, их кластолавы и туфы), 3 – средняя подсвита (риолиты, риодациты, дациты, андезиты, их туфы и игнимбриты, туфоконгломераты, туфопесчаники, туфоалевролиты), 4 – нижняя подсвита (андезиты, андезитобазальты, базальты, трахиандезиты, их кластолавы, туфы, туфопесчаники, редко туфоконгломераты); 5–7 – Илirнейский гранитоидный комплекс (γ): 5 – третья фаза (субщелочные граниты, субщелочные гранит-порфиры (γπ), субщелочные лейкогранит-порфиры, их дайки (γπ)), 6 – вторая фаза (гранодиориты (γδ), граниты (γ), гранодиорит-порфиры (γδπ), гранит-порфиры (γπ), кварцевые сиениты, их дайки (q)), 7 – первая фаза (диориты (δ), кварцевые монзониты, их дайки (qμ)); 8 – Тытылвеевский субвулканический комплекс: риолиты (λ), андезиты (α), экструзивные и жерловые образования; 9 – разрывные нарушения: а – достоверные, б – предполагаемые; 10 – площадные зоны метасоматических изменений (серицитизация, пиритизация); 11 – золотосодержащие рудные тела (зоны прожилково-вкрапленной минерализации в эксплозивных и тектонических брекчиях).

Fig. 1. Geology of the Sentyabrskoe deposit (Northeastern site) from KINROSS, 2008.

1 – Neopleistocene-Holocene: glacial boulders, pebbles, gravels, sands, and clays; alluvial pebbles, boulders, gravels, and sands; 2–4 – Tytylveemskaya Formation: 2 – Upper subformation (andesites, their clastic lavas and tuffs), 3 – Middle subformation (rhyolites, rhyodacites, dacites, andesites and their tuffs, ignimbrites, tuff conglomerate, tuffaceous sandstones and siltstones), 4 – Lower subformation (andesites, basaltic andesites, basalts, trachyandesites and their clastic lavas, tuffs, tuffaceous sandstones, rare tuff conglomerate); 5–7 – the Ilirney granitoid complex (γ): 5 – the third stage (subalkali granites, granite-porphyry (γπ), leucogranite-porphyry, and their dykes (γπ)), 6 – the second phase (granodiorites (γδ), granites (γ), granodiorite-porphyry (γδπ), granite-porphyry (γπ), quartz syenites and their dykes (q)), 7 – the first stage (diorites (δ), quartz monzonites and their dykes (qμ)); 8 – Tytylveem subvolcanic complex (rhyolites (λ), andesites (α), extrusive and vent formations); 9 – faults: a – visible, b – supposed; 10 – areal sericitic and pyritic alteration zones; 11 – vein-disseminated ore in explosive and tectonic breccias.

сивов, представленных гранитами, лейкогранитами, прорванными grano-диоритами различных фациальных типов и фаз (Особенности..., 2008; Сахно и др., 2019, рис. 10)

Вулканические породы РМС Сентябрьское и Двойное имеют определенное сходство по составу микро-и редкоземельных элементов, что хорошо отражается на мультикомпонентных диаграммах. Существуют и некоторые различия: это, прежде всего, преобладание К над Na. Наиболее показательны европиевый и неодимовый минимумы, характерные для более дифференцированных щелочно-салических магматических пород РМС Двойное. Среди малых элементов отмечены высокие содержания хрома при низких концентрациях железа, а также низкие концентрации церия при повышенной концентрации иттербия. Эти геохимические особенности будут рассмотрены ниже при анализе изотопных систем.

Следует отметить, что при анализе петро-и геохимического состава магматических пород двух близких по возрасту РМС Илirнейского рудного узла – Сентябрьского и Двойного – выявляются как черты сходства, так и определенные различия. Возможно, это связано с условиями проявления магматизма – РМС Сентябрьское локализовано в трубке взрыва. Рудопроявление Двойное располагается в пределах крупнообъемного массива гранитоидов. Оно связано с более поздними экструзивно-дайкиковыми телами (данные определения возраста по циркону – SHRIMP-метод) с отрывом от главной фазы магматизма (апт) в несколько десятков млн лет. Это же свойственно и рудопроявлению Сентябрьское-СВ. Возраст оруденения определялся по адуляру из рудных зон (Сахно и др., 2016, 2019).

Купольский рудный узел

Магматизм и рудообразование РМС, особенно этап формирования рудных фаций, наиболее детально рассмотрен в статьях многих исследователей (Особенности..., 2008; Глухов, 2008; Сахно и др., 2016; и др.). Новые данные по определению возраста магматизма и рудогенеза на основе современных методов датирования, рассмотренные ранее, а также детального анализа петро- и микроэлементного состава, особенно индикаторных изотопных систем, дает возможность идентификации возможных глубинных источников, принимавших участие в формировании магматических расплавов и рудном процессе.

Купольский рудный узел располагается в пределах внешней зоны ОВЧП, на границе Олойской и Южно-Ануйской зон Верхояно-Чукотской складчатой области и позднеюрско-раннемеловых впадин (Тытыльвеевской, Раучуанской, Нутесынской и других аптского возраста). Южно-Ануйская зо-

на рассматривается как “след” закрытия Южно-Ануйского океана, что имеет определенное значение для этого региона и отражается в смене характера магматизма ОВЧП (Белый, 1978; Лаверов и др., 2013; и др.). Для Чукотского сектора свойственно проявление объемного кислого вулканизма, а для Анадырского сектора к югу от сутуры характерен интенсивный андезито-базальтовый вулканизм. Эта смена состава продуктов магматизма отражается и в особенностях рудопроявлений, размещение которых контролируется меридиональным и северо-западными глубинными разломами. (Сидоров и др., 2007; Особенности..., 2008; и др.).

Месторождение Купол, рудопроявления Морощка и другие расположены в Северо-западной части Мечкереvской вулканоструктуры диаметром около 100 км. Это палеовулкан сложного строения, в основании которого залегает толща, сложенная туфами и игнимбритами риолит-дацитов и дацитов. Выше залегают лавы и туфы андезитов и андезито-базальтов. Верхняя часть всего разреза меловых образований завершается толщей риолитов и трахириолитов, которая перекрывается покровами андезито-базальтов и базальтов предположительно палеогенового возраста (Сахно и др., 2019, рис. 2).

В пределах месторождения известны экструзии, дайки, малые интрузии, представленные габбро-диоритами, андезитами, дацитами и риолитами (Сидоров и др., 2007; Глухов, 2008; Особенности..., 2008; и др.).

При петрологических и изотопных исследованиях магматических пород РМС Купол, Морощка, Прикуп и Токай были определены петро-геохимический состав, возраст покровных образований, а также дорудных и пост-рудных риолитовых даек, вмещающих рудную зону (Сахно и др., 2014, 2016, 2019). По циркону (SHRIMP-метод) установлен более ранний возраст андезитов, слагающих нижнюю часть покрова, – 94.8 ± 1.4 , 94.5 ± 2.0 млн лет, флюидальных покровных дацитов – 94.5 ± 2.0 млн лет и послерудных даек – 88.8 млн лет (среднее из трех анализов). Таким образом, возраст оруденения – 88–89 млн лет.

Анализ микроэлементного состава и особенно индикаторные соотношения (Nb/Ta–Zr/Hf; Ta/Yb–SiO₂ и др.) на диаграммах для магматитов двух рудных улов выявил определенные различия, связанные со спецификой петрогенезиса пород и влияния различных факторов. Исходя из геологических, петрогеохимических и других данных, можно сделать следующее заключение: рудно-магматические системы Илirнейского и Купольского рудных узлов формировались при разных геотектонических режимах и в различных временных интервалах, судя по возрасту главных фаз магматизма.

Тем не менее возраст оруденения в двух рудных узлах, как установлено по геохронологиче-

ским данным, был относительно близок по времени: 88–89 млн лет – в Купольском, 93–94 млн лет – в Илirianском. Это позволяет полагать, что оруденение в Илirianском рудном узле сопряжено не с объемным магматизмом ранних этапов (121–118 млн лет), а с более поздними малыми телами – экстрозивно-дайковым комплексом. Особый интерес вызывает формирование рудоносности Сентябрьского-СВ рудного участка, структура которого представляет эксплозивную трубку, где процессы рудообразования определялись участием глубинных флюидных потоков, а у поверхности протекали в неравновесных условиях высокотемпературных газо-транспортных реакций. Эта особенность впервые отмечена в подобных структурах на вулкане Кудрявый на о-ве Итуруп (Коржинский и др., 1996; Дистлер и др., 2008).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Изотопные системы Pb-Pb, Rb-Sr, Sm-Nd, Re-Os, Lu-Hf, $^3\text{He}/^4\text{He}$, $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ и серы исследовались в центре изотопных исследований (ЦИИ) ВСЕГЕИ (С.-Петербург), а также в институте геологии, геохимии и рудных месторождений ИГЕМ (Москва).

Была использована новейшая приборная база: Neptune (Thermo Finnigan, Germany) с областью изучения всего спектра изотопных систем, прибор Delt Plus XL для определения изотопов водорода и Triton (Thermo Finnigan, Germany) для исследования изотопов U-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr, Re-Os. Определение изотопов серы проводилось в лаборатории стабильных изотопов Дальневосточного геологического института ДВГИ (г. Владивосток), по методике, разработанной А.В. Игнатьевым и Т.А. Веливецкой.

Определения Re и Os проводились на одноколлекторном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ISP-MS ELEMENT-2 в центре Изотопных исследований ВСЕГЕИ (С.-Петербург). Эта методика позволяет определить $^{185}\text{Os}/^{186}\text{Os}$ с точностью менее 0.5% (Allegre, 2008).

Изотопный анализ серы сульфидов выполнен в ЦКП ДВГИ ДВО РАН в лаборатории стабильных изотопов. Подготовка образцов для масс-спектрометрического изотопного анализа серы проведена по методике В.А. Гриненко. Серу сульфидов окисляют до SO_2 с использованием оксида меди как окислителя. Реакцию окисления проводят в вакууме при температуре 900°C. Полученный SO_2 очищают от остальных продуктов реакции на терморегулируемой криогенной ловушке. Очищенный SO_2 вымораживают в отдельной ампуле для измерения $\delta^{34}\text{S}$. Измерение изотопных соотношений серы проведено на изотопном масс-спектрометре Finnigan MAT 253 (Thermo Finnigan, Bremen, Germany) с использованием двойной си-

стемы напуска. Масса анализируемых образцов составляла 10 мг. Погрешность определения $\delta^{34}\text{S}$ (1 σ) 0.1‰, $n = 5$.

ИЗОТОПНЫЕ СИСТЕМЫ Rb-Sr, Pb-Pb И Sm-Nd МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД РУДОНОСНЫХ СТРУКТУР КУПОЛЬСКОГО И ИЛИРНЕЙСКОГО РУДНЫХ УЗЛОВ ЧУКОТКИ¹

Интерпретация изотопных данных по РМС рудных узлов в целях идентификации возможных источников вещества, принимавшего участие в формировании магматических расплавов, с помощью комплекса изотопных (Rb-Sr, Sm-Nd и Pb-Pb) систем проведена с использованием серии образцов магматических пород мелового возраста Купольского и Илirianского рудных узлов Приполярной Чукотки. Они представлены интрузивными и вулканическими образованиями и по химическому составу включают ряд от андезитов (диоритов) до риолитов (гранитов). Полученные для них Pb-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd данные приведены в табл. 1–3.

По своим начальным Sr-Nd-Pb изотопно-геохимическим характеристикам изученные породы весьма неоднородны. Величины начальных соотношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ изменяются в широких пределах – от 0.7037 до 0.7096. Столь же значительный диапазон вариаций устанавливается и для значений начальных соотношений $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, выраженный в относительных единицах $\epsilon_{\text{Nd}}\text{T}$. Этот параметр образует интервал значений, включающий в себя как положительные, так и отрицательные величины $\epsilon_{\text{Nd}}\text{T}$ (+4.1...–6.3). Породы также характеризуются и неоднородностью начальных величин изотопных соотношений Pb. Разброс значений для соотношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, оцененный с помощью коэффициента вариации, составляет 1.2, 0.2 и 0.5 соответственно. По своему диапазону эти вариации следует признать существенными. Они являются нетипичными для магматических образований, сформировавшихся из единого очага. Следует отметить, что не выявлено сколько-нибудь значимых корреляционных зависимостей между химическим составом пород (Сахно и др., 2016, 2019) и соответствующими их Sr-Nd-Pb изотопными характеристиками.

В целом полученные изотопные Rb-Sr, Sm-Nd и Pb-Pb данные для пород позволяют заключить, что исходные материнские магматические расплавы были весьма неоднородны по изотопному составу. Масштабы этой неоднородности указывают на вовлечение в магматический процесс нескольких источников вещества.

¹ Особенности химического и петро-геохимического состава пород Купольского и Илirianского рудных узлов рассмотрены ранее (Сахно и др., 2019).

Таблица 1. Pb-Pb данные для магматических пород Чукотки**Table 1.** Pb-Pb isotope ratios from igneous rocks of the ore-magmatic systems of Chukotka

| Месторо- ждение | Номер образца | Порода | U | Th | Pb | ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb | ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb | Начальные отношения Pb | | |
|--------------------|------------------|-------------------|-------|------|-----|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | | | мкг/г | | | | | | ²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb | ²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb | ²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb |
| Купол | WP-4220 | Диорит | 5.8 | 10.0 | 11 | 18.5522 | 15.5215 | 38.2798 | 17.9922 | 15.4947 | 37.9992 |
| | WP-4325 | Дацит, туф | 2.3 | 7.9 | 14 | 18.6268 | 15.5645 | 38.4577 | 18.4609 | 15.5566 | 38.2921 |
| | WP-4319 | Риолит, покров | 2.4 | 4.7 | 13 | 18.5144 | 15.5311 | 38.2668 | 18.3288 | 15.5222 | 38.1612 |
| Двойное | 503954 (КПШ) | Гранит | 0.17 | 0.76 | 28 | 18.5123 | 15.5547 | 38.3066 | 18.5063 | 15.5544 | 38.2988 |
| | 504022 | Диорит | 0.54 | 1.4 | 9 | 18.8443 | 15.6000 | 38.5804 | 18.7814 | 15.5970 | 38.5330 |
| | 504006 | Сиенит | 4.7 | 14 | 52 | 18.4728 | 15.5510 | 38.3370 | 18.3828 | 15.5467 | 38.2577 |
| | 504020 | Риолит | 7.0 | 21 | 14 | 18.9457 | 15.5698 | 38.7128 | 18.4169 | 15.5445 | 38.2525 |
| | 504025 | Гранит, дайка | 2.7 | 13.0 | 12 | 18.7435 | 15.5697 | 38.6237 | 18.5202 | 15.5590 | 38.3157 |
| Сентябрь- ское | 504018 | Андезит | 5.1 | 15.0 | 6.0 | 18.9868 | 15.5755 | 38.7823 | 18.0715 | 15.5316 | 38.0000 |
| Морошка | 109907 | Андезит | 2.8 | 8.5 | 6.1 | 18.6054 | 15.5302 | 38.3642 | 18.1752 | 15.5097 | 37.9820 |
| | 109908 | Дацит | 5.6 | 20.0 | 22 | 18.4842 | 15.5241 | 38.2718 | 18.2427 | 15.5126 | 38.0211 |

Примечание. Определение изотопов Pb и Sr (табл. 1–3) проводилось в лаборатории изотопной геохимии и геохронологии ИГЕМ РАН.

Note. Pb and Sr isotopes (Tables 1–3) were determined in Laboratory of Isotopic Geochemistry and Geochronology at Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry (IGEM) RAS.

Таблица 2. Rb-Sr данные по валовым пробам магматических пород РМС Чукотки**Table 2.** The Rb-Sr ratio data on whole-rock samples of igneous rocks from the ore-magmatic systems of Chukotka

| Месторождение | Порода | Номер пробы | Rb, мкг/г | Sr, мкг/г | ⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr, ±2σ | ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr, ±2σ |
|---------------|----------------|-------------|-----------|-----------|---|---|
| Купол | Диорит (дайка) | WP-4220 | 54.3 | 460 | 0.341 ± 1 | 0.704244 ± 14 |
| | Туф (дацит) | WP-4325 | 243 | 133 | 5.269 ± 11 | 0.711086 ± 14 |
| | Риолит (поток) | WP-4319 | 116 | 174 | 1.929 ± 4 | 0.706464 ± 14 |
| Двойное | Гранит | 503954 | 214 | 25.5 | 24.26 ± 5 | 0.745301 ± 14 |
| | Сиенит | 504006 | 121 | 98 | 3.596 ± 7 | 0.710347 ± 14 |
| | Риолит | 504020 | 113 | 89.2 | 3.672 ± 7 | 0.710744 ± 14 |
| | Диорит | 504022 | 69.0 | 528 | 0.378 ± 1 | 0.707794 ± 14 |
| | Гранит (дайка) | 504025 | 209 | 40.2 | 15.03 ± 3 | 0.728304 ± 14 |
| Сентябрьское | Андезит | 504018 | 151 | 366 | 1.196 ± 3 | 0.706684 ± 14 |
| Морошка | Дациит | 109907 | 201 | 117 | 4.98 ± 1 | 0.705843 ± 14 |
| | Андезит | 109908 | 115 | 402 | 0.827 ± 2 | 0.705051 ± 14 |

Таблица 3. Sm-Nd данные по магматическим породам РМС Чукотки**Table 3.** Sm-Nb isotope ratios from igneous rocks of the ore-magmatic systems of Chukotka

| Месторож- дение | Номер образца | Порода | Sm | Nd | ¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd | ¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd | ε _{Nd} , T | T _(DM) , млрд лет |
|--------------------|---------------|---------|-------|------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------|
| | | | мкг/г | | | | | |
| Купол | WP-4220 | Диорит | 4.41 | 20.1 | 0.1329 ± 3 | 0.512809 ± 10 | 4.1 | 1.45 |
| | WP-4325 | Риолит | 4.41 | 22.1 | 0.1206 ± 3 | 0.512264 ± 10 | −6.3 | |
| | WP-4319 | —“— | 2.94 | 17.4 | 0.1023 ± 3 | 0.512759 ± 10 | 3.3 | |
| Сентябрьское | 504018 | Андезит | 4.35 | 22.9 | 0.1145 ± 3 | 0.512623 ± 10 | 1.2 | 0.81 |
| Двойное | 504006 | Сиенит | 2.58 | 13.8 | 0.1131 ± 3 | 0.512736 ± 10 | 3.2 | 0.63 |
| | 504020 | Риолит | 2.08 | 12.4 | 0.1015 ± 3 | 0.512716 ± 10 | 3.0 | 0.59 |
| | 504022 | Диорит | 5.42 | 25.0 | 0.1310 ± 3 | 0.512486 ± 10 | −2.1 | |
| Морошка | 109907 | Дациит | 3.51 | 17.0 | 0.1249 ± 3 | 0.512789 ± 10 | 3.7 | 0.62 |
| | 109908 | Андезит | 4.58 | 20.8 | 0.1330 ± 3 | 0.512771 ± 10 | 3.3 | |

Прежде чем проанализировать результаты изотопно-геохимического изучения пород, следует отметить следующее. Химический состав пород свидетельствует о том, что при их петрогенезисе ведущая роль принадлежала коровым источникам. Расчеты модельных величин Nd возрастов, варьирующих от 0.6 до 1.5 млрд лет, дают основание заключить, что в магматические процессы вовлекалось вещество преимущественно молодой (позднерифейского возраста) континентальной коры либо омоложенной последующим появлением андерплейтинга мантийных расплавов. Эта континентальная кора, имеющая относительно “примитивные” Sr-Nd-Pb изотопные характеристики, может быть отнесена к переходной к ювенильному типу, формирование которой происходит на конвергентных границах плит в условиях активной континентальной окраины. В этих геодинамических условиях в зонах столкновений плит происходило активное взаимодействие в генерации мантийного и корового вещества, что отражается в образовании магматических расплавов смешанной мантийно-коровой природы. Это проявляется в значениях начальных Sr-Nd-Pb изотопных характеристик пород. Данный обобщенный вывод подтверждается результатами более детального анализа полученных изотопных данных для пород с помощью различных корреляционных диаграмм (рис. 2).

На этих диаграммах помимо точек, отвечающих начальным Sr-Nd-Pb изотопным характеристикам пород, показаны также области современных значений различных мантийных источников. На всех приведенных диаграммах: $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})-(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$; $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})-\epsilon_{\text{Nd}}$; $(^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})-(^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb})$ точки пород образуют короткие корреляционные тренды, которые могут рассматриваться как тренды смешения вещества двух геохимических типов источников. Наблюдаемое на диаграммах соотношение трендов точек пород и полей изотопных составов Sr, Nd и Pb современных мантийных источников позволяет предположить, что одним из источников, принимавших участие в формировании магматических расплавов, являлось вещество истощенной мантии (DMM) (Сахно и др., 2016). В качестве такого источника, вероятней всего, выступала океаническая кора, плавление которой происходило после закрытия Южно-Анжуйского океана 130–128 млн лет назад (Лаверов и др., 2013).

Присущие этим породам значительные вариации начальных Sr-Nd-Pb изотопно-геохимических характеристик обусловлены исходной неоднородностью этих величин. Изотопно-геохимическая неоднородность протолита, за счет плавления которого происходила генерация магматических расплавов, является следствием геодинамических особенностей формирования ювенильной коры в обстановке активной континентальной окраины, где происходило взаимодействие мантийного и корового вещества.

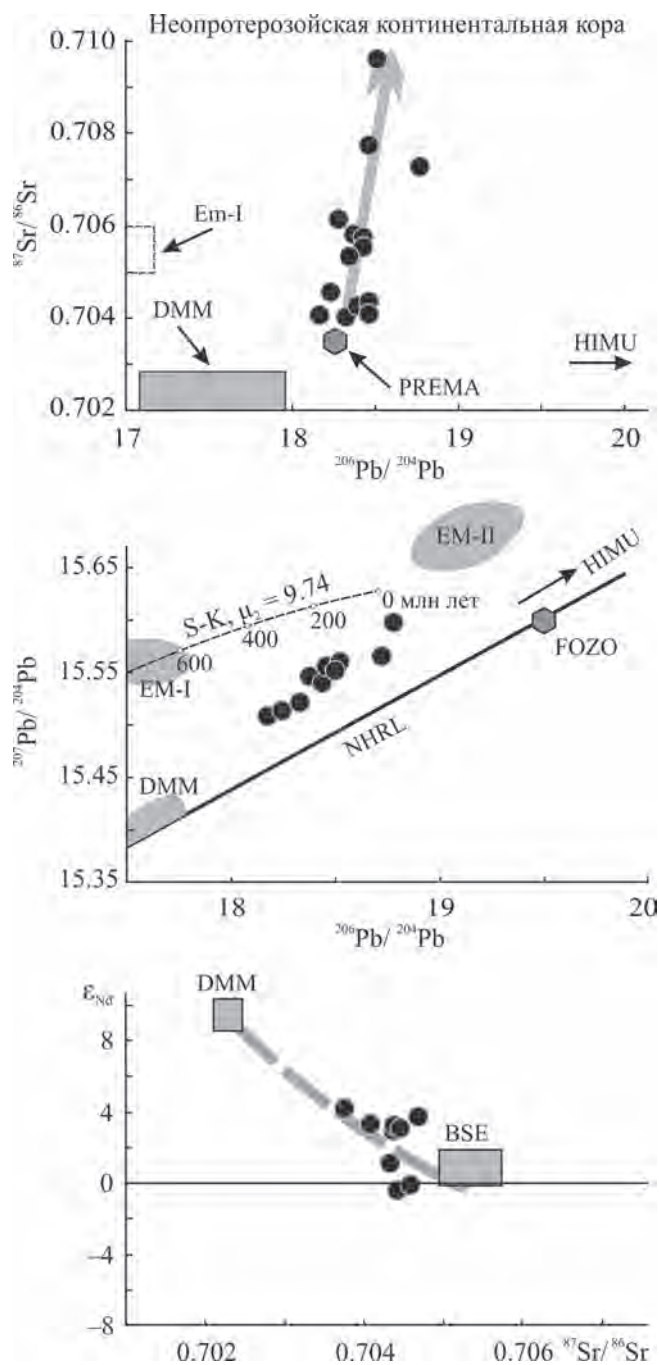


Рис. 2. Данные изотопных исследований магматических пород месторождений и рудопоявлений Западной Чукотки.

Поля радиогенных изотопных отношений областей мантии: обедненной – DMM, обогащенной – EM-I, EM-II, HIMU, первичной – FOZO, PREMA (Фоп, 1989).

Fig. 2. Isotopic data on igneous rocks from deposits and ore occurrences of western Chukotka.

Fields of radiogenic isotopic ratio for: DMM – depleted, EM-I, EM-II, HIMU – enriched, and FOZO, PREMA primary magmas (Fore, 1989).

ИЗОТОПЫ ГЕЛИЯ И АРГОНА В ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОДАХ РМС СЕВЕРНОЙ ЧУКОТКИ

Исследование благородных газов – гелия и аргона – в магматических породах представляет фундаментальный интерес не только при изучении происхождения и эволюции вещества Земли, но и при идентификации глубинных и коровых источников при генерации расплавов в эндогенном процессе.

Открытие значительного избытка легкого изотопа гелия (^3He) в гидротермах Исландии, срединно-океанических хребтах, горячих точках и трубках взрыва показало значение дегазации Земли в процессе эволюции мантии (Grants et al., 1979; и др.) и мантийную природу флюидов (гелия, аргона и др.) как “трассеров” мантийных и мантийно-коровых расплавов.

Поступление первичного гелия из мантии можно связывать с глубинными разломами либо со взрывными структурами центрального типа (трубки взрыва с глубокими “корнями”).

Анализ отношения изотопов гелия и аргона в вулканических породах РМС различных структур Чукотки показывает большие колебания (табл. 4–5), что может быть обусловлено контаминацией атмосферным гелием.

Они значительно, на порядок или чуть меньше, различаются в разных структурах. Наиболее высокие $^3\text{He}/^4\text{He}$ характерны для вулканоструктур (РМС) Купольского рудного узла: Купол (КЛ-3А, КЛ-5), Морошка (МР-5). Это наиболее высокие со-

держания мантийного гелия. Несколько ниже они для Прикупа (ПР-1) и Токая (ТК-2). Это же характерно и для радиационного (глубинного) аргона (Ar). Высокие отношения атмосферного аргона предполагает степень эрозионного среза верхних частей РМС (см. табл. 5).

Для РМС Илirнейского рудного района (исходя из количества новых данных) колебания глубинного гелия, а также воздушного аргона колеблется в определенных интервалах: для РМС “Двойное” доля мантийного гелия невелика, так же как доля радиогенного аргона. Несколько выше количество радиационного (глубинного) аргона и мантийного гелия в РМС Сентябрьское, что позволяет судить и об эрозионном срезе. Из сравнения можно сделать некоторые предварительные выводы, которые вытекают из вышеописанных результатов анализа как двух рудных узлов, так и для каждого РМС в отдельности.

Из табличных данных по гелию и аргону видно, что уровни этих газов в РМС Купольского и Илirнейского рудных узлов различные. Определенная стабильность свойственна для Купольского РМС и Морошки, несколько ниже она для Прикупа и Токая. Для структур Илirнейского рудного узла уровень глубинного гелия несколько ниже, а уровень воздушного аргона, особенно для РМС “Двойное”, значительно выше. Определенные различия, видимо, связаны с особенностями глубинного источника флюидов. Можно полагать, что формирование флюидов длительное время осуществлялось в сравнительно глубинных резервуарах. Для последующего взаимодействия мантийно-корового флюида

Таблица 4. Гелий и неон в газовой-жидких включениях из мантийных пород РМС Илirнейского и Купольского рудного узлов

Table 4. Helium and neon of fluid inclusions in mantle rocks of the ore-magmatic systems of the Ilirney and Kupol ore nodes

| Месторождение | Номер пробы | Порода | $\text{He} \cdot 10^{-6}$, см ³ /г | $^3\text{He}/^4\text{He} \cdot 10^{-6}$ измер. | $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ измер. | $^3\text{He}/^4\text{He} \cdot 10^{-6}$ корр. | R_A корр. | He_m/He , % | $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ |
|---------------|-------------|---------|--|--|-------------------------------------|---|-------------|-----------------------------|---|
| Сентябрьское | СТ-1 | Андезит | 0.56 | 0.40 | 74.4 | 0.39 | 0.28 | 3.1 | 0.75 |
| | СТ-4 | — | 0.36 | 0.66 | 43.0 | 0.66 | 0.48 | 5.3 | 0.42 |
| Двойное | ДВ-6 | Стекло | 0.18 | 0.38 | 103 | 0.38 | 0.27 | 3.0 | 1.83 |
| | ДВ-8 | Андезит | 0.18 | 0.56 | 40.8 | 0.57 | 0.40 | 4.5 | 0.58 |
| Купол | КЛ-3А | Стекло | 0.036 | 1.25 | 10.7 | 1.24 | 0.89 | 10.2 | 0.27 |
| | КЛ-5 | — | 0.037 | 1.12 | 10.5 | 1.11 | 0.80 | 9.1 | 0.41 |
| Морошка | МР-5 | Андезит | 0.020 | 2.43 | 27.0 | 2.44 | 1.74 | 20.2 | 0.84 |
| Прикуп | ПР-1 | Стекло | 0.040 | 0.97 | 11.9 | 0.96 | 0.70 | 7.8 | 0.09 |
| Токай | ТК-2 | Базальт | 0.074 | 0.82 | 71.1 | 0.82 | 0.59 | 6.7 | 2.18 |

Примечание. Газы выделялись посредством дробления образцов в вакууме. $^3\text{He}/^4\text{He} \cdot 10^{-6}$ корр. – значение изотопного отношения, скорректированное на воздушную компоненту гелия, рассчитанную по соотношению $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$, т.е. изотопный состав “глубинного” гелия. R_A – скорректированное отношение изотопов гелия, деленное на таковое в атмосферном гелии ($1.4 \cdot 10^{-6}$). He_m/He – доля мантийного гелия, рассчитанная для значений $^3\text{He}/^4\text{He}$ в верхней мантии $1.2 \cdot 10^{-5}$ и $2 \cdot 10^{-8}$ в земной коре. $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ – отношение изотопов He и Ar в анализируемых породах. Аналитик Э.М. Прасолов.

Note. The gases were extracted from samples by vacuum crushing. $^3\text{He}/^4\text{He} \cdot 10^{-6}$ корр. is a value corrected for the isotopic composition of deep-Earth helium calculated according to the $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ ratio. R_A is the corrected helium isotope ratio divided by the atmospheric helium isotope ratio ($1.4 \cdot 10^{-6}$). He_m/He is a share of mantle helium calculated for $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios from the upper mantle ($1.2 \cdot 10^{-5}$) and the earth's crust ($2 \cdot 10^{-8}$). $^4\text{He}/^{40}\text{Ar}_{\text{rad}}$ – relation of He and Ar isotopes in rocks. Measurements were performed by analyst E.M. Prasolov.

Таблица 5. Аргон в газовой-жидких включениях из мантийных пород рудно-магматических систем (РМС) Илринейского и Купольского рудного узлов

Table 5. Argon of fluid inclusions in mantle rocks of the ore-magmatic systems of the Ilirney and Kupol ore nodes

| Месторождение | Номер образца | Порода | Ar · 10 ⁻⁶ , см ³ /г | ⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar | Ar _a /Ar, % | Ar _r /Ar, % | ⁴⁰ Ar _{rad} · 10 ⁻⁶ , см ³ /г |
|---------------|---------------|---------|--|------------------------------------|------------------------|------------------------|---|
| Сентябрьское | СТ-1 | Андезит | 1.06 | 1016.2 | 29.1 | 70.9 | 0.76 |
| | СТ-4 | — | 1.34 | 814.9 | 36.3 | 63.7 | 0.86 |
| Двойное | ДВ-6 | Риолит | 0.43 | 382.1 | 77.4 | 22.6 | 0.097 |
| | ДВ-8 | Андезит | 1.40 | 381.9 | 77.4 | 22.6 | 0.32 |
| Купол | КЛ-3А | Риолит | 0.92 | 345.4 | 85.6 | 14.4 | 0.13 |
| | КЛ-5 | Стекло | 0.26 | 454.7 | 65.0 | 35.0 | 0.091 |
| Морошка | МР-5 | Андезит | 0.49 | 310.3 | 95.3 | 4.7 | 0.023 |
| Прикуп | ПР-1 | Риолит | 1.54 | 422.5 | 70.0 | 30.0 | 0.46 |
| Токай | ТК-2 | Андезит | 0.42 | 322.0 | 91.8 | 8.2 | 0.034 |

Примечание. Газы выделялись посредством дробления образца в вакууме. В пробах доля воздушного аргона рассчитывалась по результатам изотопного анализа аргона: $Ar_a(\%) = (^{40}Ar/^{46}Ar)_{\text{атм.}} / (^{40}Ar/^{46}Ar)_{\text{пробы}} \times 100$; доля радиогенного аргона рассчитывалась: $Ar_r(\%) = 100 - Ar_a(\%)$. Ar_a – атмосферный, Ar_{rad} – радиогенный (глубинный) Ar. Определение гелия и аргона проводилось на приборе Micromass 5400 (Англия), аналитик Э.М. Прасолов.

Note. The gases were extracted from samples by vacuum crushing. A share of atmospheric argon in samples was calculated by the results of argon isotope analysis: $Ar_a(\%) = (^{40}Ar/^{46}Ar)_{\text{atm.}} / (^{40}Ar/^{46}Ar)_{\text{sample}} \times 100$; radiogenic argon was calculated by the following formula: $Ar_r(\%) = 100 - Ar_a(\%)$. Ar_a – atmospheric argon, Ar_{rad} – radiogenic (deep-Earth) argon. Helium and argon were analyzed on a Micromass 5400 (UK) mass spectrometer, by analyst E.M. Prasolov.

с близповерхностной системой вод и газов характерны сильные вариации взаимодействия воздушного и радиогенного аргона и мантийного гелия, что, возможно, отражает различные уровни генерации палеофлюидов.

В исследованных палеофлюидах в данном случае газовой-жидких включений в минералах выделены два типа аргона – воздушный и радиогенный. Первый попадает во флюид в составе вод, второй образуется в составе материнских пород. Отношения изотопов аргона в современной атмосфере равно постоянной величине 295.5, и оно не изменяется на протяжении всего фанерозоя, а в наших пробах доля радиогенного аргона больше этой постоянной, что, возможно, происходит при распаде ⁴⁰K материнской породы еще до образования расплава. Это в итоге отражается и на объеме оруденения.

Re-Os ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМА В РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ СЕВЕРНОЙ ЧУКОТКИ

Использование Re-Os изотопной системы в решении вопросов петрологии и рудоносности позволяет определять степень контаминации коровых пород мантийными расплавами. Re/Os в мантийных породах соответствует отношениям в метеоритах, тогда как в основных (базальтовых) расплавах, а тем более в кислых, он гораздо выше. Эти соотношения резко меняются в связи с тем, что количество осмия чрезвычайно мало в коровых породах, вследствие этого Re/Os намного больше, чем в мантии, а тем более в магматических породах. Радиогенный

осмий (¹⁸⁷Os) в большей степени концентрируется в коровых расплавах, что позволяет определить степень генерации рудогенных магм при дифференциации. Благодаря современной инструментальной технологии можно установить концентрацию Re. Определения проводились на одно-коллекторном масс-спектрометре с индуктивно-связанной плазмой ISP-MS ELEMENT-2 в центре Изотопных исследований ВСЕГЕИ (С.-Петербург). Эта методика позволяет определить ¹⁸⁵Os/¹⁸⁶Os с точностью менее 0.5% (Allegre, 2008).

Анализ изотопного состава Re, Os и вариации ¹⁸⁷Os/¹⁸⁸Os в породах рудномагматических комплексов представлены в табл. 6. Табличные данные показывают типичное для вулканитов обеднение Os (менее 0.1 мг/т).

Из полученных данных видно, что содержание рения и осмия, в частности, в вулканитах характерно для пород, в которых отсутствуют сульфиды, концентрирующие рений и осмий. Содержание рения варьирует втрое, что обеспечивает существенные вариации Re/Os отношений в изученных породах магматических комплексов РМС. При таких вариациях рений-осмиевых отношений можно было бы предполагать определенную закономерность, если бы это была единая вулканическая серия.

В целом измеренные осмиевые изотопные отношения андезитов, андезито-базальтов и других пород соответствуют уровню обогащенной мантии, при этом минимальное отношение (0.19) лишь немного больше принятой оценки изотопного состава верхней недеплетированной мантии (0.1296). Вследствие этого необходимо предположить, что

Таблица 6. Re-Os анализ валовых пород РМС Чукотки

Table 6. Re-Os dating of whole rocks

| № п.п. | Проба | Порода | Плот- ность | Re | Os | ¹⁸⁷ Re/ ¹⁸⁸ Os | 2 σ, % | ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os | 2σ, % | 2 σ абс. | Model age, млн лет | Zircon age, млн лет | ¹⁸⁷ Os/ ¹⁸⁸ Os, t | γ Os, t | |
|-----------|-------|--------------------|----------------|--------|-------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|----------|----------|--------------------------|---------------------------|--|------------|-----|
| | | | | мг/т | | | | | | | | | | | |
| 1 | КЛ-2 | Базальт Андезит | 2.5073 | 0.113 | 0.033 | 17.0024 | 0.73 | 0.37251 | 0.47 | 0.00177 | 879 | 94 | 0.34586 | 174 | |
| 2 | СТ-4 | | 2.5166 | 0.126 | 0.010 | 63.8428 | 0.68 | 0.38466 | 0.55 | 0.00212 | 243 | 124 | 0.25263 | 100 | |
| 3 | ДВ-8 | | —“— | 2.6663 | 0.259 | 0.020 | 64.9338 | 0.61 | 0.42738 | 0.55 | 0.00233 | 278 | 121 | 0.29636 | 135 |
| 4 | МР-3 | | —“— | 2.4900 | 0.290 | 0.012 | 125.5572 | 0.65 | 0.57574 | 0.65 | 0.00372 | 215 | 94 | 0.37896 | 200 |
| 5 | ТК-5 | | —“— | 2.5255 | 0.148 | 0.012 | 61.8717 | 0.55 | 0.39334 | 0.76 | 0.00298 | 259 | 94 | 0.29637 | 134 |
| 6 | ПР-7 | | —“— | 2.6795 | 0.075 | 0.080 | 4.5585 | 0.77 | 0.19898 | 0.58 | 0.00115 | 1021 | 94 | 0.19183 | 52 |

Примечание. Изотопный состав проб корректировался на бланки: Re 70 pg, Os 0.7 pg. Модельный возраст рассчитан по (Allegre, 2008).

Note. Isotopic composition of the rock samples was corrected on blanks Re 70 pg and Os 0.7 pg. The model age is calculated by (Allegre, 2008).

это оценка изотопного состава источника расплавов, представленных образцов проб из разных РМС. Безусловно, необходимы более детальные геологические данные и более объемное опробование.

Из общего числа проб “выпадает” проба ПР-7, но не модельным возрастом, который объясняется низким содержанием рения (соответственно, низкой величиной Re/Os), а малой степенью контаминации коровым материалом и, следовательно, наиболее близким изотопным составом осмия к родоначальной мантии. Пересчет на первичные данные (с учетом реальных возрастов) изначально единого (магматического) источника всех проб показывает, что контаминация произошла в момент формирования расплава, который был деплетирован 94–120 млн лет назад. В процессе контаминации мантийный расплав, деплетированный рением (Re/Os = 0.4–0.1), не был существенно обогащен им. Этот процесс мог сопровождаться и обогащением рудных компонентами.

Вследствие этого степень контаминации могла бы косвенно свидетельствовать о возможном рудном потенциале конкретного объекта (рудно-магматической системы). При этом верхняя мантия, вовлеченная в магмогенерацию, была по изотопному составу либо примитивной, либо, что более вероятно, обогащенной за счет мантийного метасоматоза (флюидного). Этот процесс в какой-то степени подтверждается аналитическими данными (см. табл. 6). Вовлечение субдуцированной континентальной коры маловероятно, так как измеренные значения осмиевых отношений слишком низкие для этого процесса, но субдуцированная океаническая кора, причем молодая (закрытие Анюйского океана произошло в промежутке 130–140 млн лет назад), по данным (Лаверов и др., 2013), вполне могла быть источником контаминации и рудных компонентами.

Учитывая данные структурного положения рудопроявлений, а также данные флюидного режима (повышенные концентрации глубинного гелия, ха-

рактер структур трубки взрыва), можно предположить, что этот процесс формирования рудных компонентов мог быть связан с механизмом флюидного переноса рудного вещества.

ИЗОТОПНАЯ ГЕОХИМИЯ Lu-Hf В ВУЛКАНОСТРУКТУРАХ

Для идентификации возможных источников, принимающих участие в формировании расплавов, и связанной с ними рудоносностью с помощью изотопных систем (Lu-Hf и Hf-Hf) было проведено изучение магматических пород рудных полей Двойное и Сентябрьское СВ².

Изученные породы неоднородны как по начальным отношениям Lu/Hf, Hf/Hf и Yb/Hf, и геохимическому составу, так и по возрасту (121.5 ± 0.92 , 119.2 ± 1.1 , 115 млн лет). Самой молодой является дайка гранодиорита с возрастом 96.06 ± 0.98 млн лет, а также дайка андезита (504008) с возрастом 94 млн лет, для которых характерен монцитонитовидный петрогеохимический тип (Сахно и др., 2016).

Изучение пород, их изотопных систем, а также радиогенных дочерних продуктов дает информацию о дифференциации мантии и составе континентальной коры (Фор, 1989). В этом отношении Lu-Hf системы дают возможность рассмотреть характер и состав расплава, который формируется в мантии на основании того, что гафний при плавлении более подвижен, чем лютеций, и в большей степени входит в состав мантийного расплава, а менее подвижный лютеций накапливается в реститовом мантийном веществе. В некоторой степени поведение лютеция и гафния в процессе плавления в мантии подобно свойствам самария и неодима (самарий менее подвижен, а неодим в большей степени накапливается в расплаве).

² РМС Купольского узла не рассматривался в связи с отсутствием проб с сульфидными минералами.

Исходя из перечисленных данных, важно подчеркнуть особенность поведения Lu и Hf при частичном плавлении мантии: а) базальтовые расплавы имеют низкие отношения Lu/Hf в сравнении с мантийными породами, б) но после отделения базальтового расплава остаточные твердые фазы приобретают более высокие отношения Lu/Hf, чем в первичном резервуаре. При последующем плавлении остаточных пород мантии расплавы имеют более высокие отношения Lu/Hf.

Этот фактор зафиксирован при исследовании пород месторождений Двойное (табл. 7, обр. ДВ-2, диорит, 115.9 ± 1.2 млн лет). Для него характерны высокие концентрации Lu и Yb, значительно превышающие максимальные значения в контрольных стандартах. В пробе ДВ-2 можно выделить две группы: к первой можно отнести $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$, с которой связано плавление остаточной твердой фазы, к другой – смещения с более ранним базальтовым расплавом. Этот же процесс проявлен и в породах РМС Токай и Прикуп (Купольский рудный узел) (см. табл. 7, рис. 3).

На основании анализа возраста магматических комплексов U-Pb методом можно полагать, что возраст оруденения в РМС был связан не с ранним комплексом пород (ДВ-9 – 118.8 млн лет), а с более поздними внедрениями андезитовых даек с возрастом 93–94 млн лет (Прикуп, Токай, Купольский рудный узел).

С позиции геотектоники можно считать, что активная зона тектонических движений в этот период связана с закрытием Южно-Анжуйского океана и высокой магматической активностью (121–118 млн лет) этого региона, а в более поздний период отразилась межблочными движениями и, соответственно, внедрением андезитовых даек (Лаверов и др., 2013; Сахно и др., 2016; и др.).

Рудоносность, возможно, связана с этапом внедрения расплавов андезитового состава в виде поздних даек (главной особенностью которых является монцитонитовидный характер расплавов) и сопровождавших их флюидных потоков. Возраст оруденения по адуляру (K-Ag метод) из рудных образцов определен в интервале от 93–88 млн лет, что подтверждает подобное положение.

ИЗОТОПНЫЙ АНАЛИЗ СЕРЫ В СУЛЬФИДАХ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДВОЙНОЕ И СЕНТЯБРЬСКОЕ³

Анализ изотопного состава серы (табл. 8) показывает близость величин из разных зон при сравнении данных изотопов с железным метеоритом (Сихотэ-Алинским). Близкие результаты мо-

гут свидетельствовать о ювенильной природе серы. В связи с этим следует полагать, что имело место глубинное обогащение и образование соединений серы с Au, Ag и другими элементами в виде комплексных летучих соединений, отложение которых при падении температуры формировало рудные “столбы” различных уровней.

Следует подчеркнуть, что в составе рудных ассоциаций отмечается высокое содержание селена, кадмия, которые были зафиксированы во многих рудных структурах этого региона, в том числе и на месторождениях Купол, Двойное и др. (Николаев и др., 2013; и др.). Наличие таких элементов, как кадмий, весьма характерно для месторождений Купольского и Илирнейского рудных районов.

Более детально эти вопросы рассмотрены в работах Ю.Н. Николаева (2013; и др.), И.Е. Савва (2016; и др.) и многих других.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ представленного материала по геологии и изотопии магматических пород золото-серебряных рудно-магматических систем Купольского и Илирнейского рудных узлов приарктической зоны Западной и Центральной Чукотки позволяет наметить определенные закономерности.

1. Магматизм и оруденение контролируются трансрегиональными разломами. На позднем этапе с ними сопряжено формирование рудно-магматических систем, развитие которых было длительным. Это подтверждается данными определений возраста по цирконам (SHRIMP-метод).

2. По своим характеристикам рассматриваемые рудорпроявления и месторождения относятся к эпitherмальному типу, их формирование происходило при участии мантийных и коровых процессов генерации расплавов и сопровождающих их флюидных систем, что подтверждается исследованиями изотопных систем (Pb-Pb, Hf-Hf, Sm-Nd, ^3He - ^4He и др.).

3. Изучение Rb-Sr, Pb-Pb, Hf-Hf и других изотопных систем, а также и рудно-магматических структур в породах позволяет дать следующую интерпретацию.

Породы имеют смешанную мантийно-коровую природу источника магматического расплава. Вероятно, происходила контаминация коровым веществом глубинного мантийного источника. Этот вывод основывается на данных изотопных отношений $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ и $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$, поскольку изотоп гафния в большей степени характерен для мантийной области генерации расплавов. Между тем изотопные отношения и особенно Pb-Sr система в большей степени отражают коровую контаминацию. Вследствие этого $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ и $\text{Sr}^{87}/\text{Sr}^{86}$, Sm-Nd данные образуют вытянутую линию вдоль линии NHRL-HIMU (см. рис. 2).

³ Изотопный состав серы в РМС Купольского рудного узла не определялся из-за отсутствия сульфидных минералов в коллекции.

Таблица 7. Изотопы гафния в цирконах магматических комплексов золото-серебряных РМС месторождений Чукотки**Table 7.** Hf isotope composition in zircons from igneous complexes of the gold-silver deposits of Chukotka

| Образец | | Точки | ¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf | Err | ¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf | Err | ¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf | Err |
|--------------|---------|------------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|
| Купол | F-4 | 5 | 0.0310997 | 0.0022450 | 0.0018726 | 0.0000467 | 0.2831126 | 0.0000374 |
| | | 7 | 0.0228712 | 0.0011140 | 0.0013962 | 0.0000197 | 0.2830083 | 0.0000377 |
| | | 8 | 0.0365058 | 0.0017625 | 0.0024894 | 0.0000508 | 0.2830764 | 0.0000688 |
| | | 9 | 0.0158099 | 0.0013093 | 0.0007750 | 0.0000165 | 0.2831035 | 0.0000487 |
| | | 9 | 0.0216638 | 0.0003887 | 0.0010843 | 0.0000063 | 0.2830357 | 0.0000309 |
| | WP-4325 | 10 | 0.0096145 | 0.0002576 | 0.0005475 | 0.0000027 | 0.2829299 | 0.0000375 |
| | | 2 | 0.0226114 | 0.0011881 | 0.0017863 | 0.0000289 | 0.2828668 | 0.0000287 |
| | | 7 | 0.0216544 | 0.0001019 | 0.0011275 | 0.0000136 | 0.2829316 | 0.0000323 |
| | | 8 | 0.0181262 | 0.0008137 | 0.0012517 | 0.0000166 | 0.2828765 | 0.0000274 |
| | | 9 | 0.0216550 | 0.0010805 | 0.0016846 | 0.0000168 | 0.2829500 | 0.0000323 |
| Морошка | 109907 | 10 | 0.0150502 | 0.0003720 | 0.0006977 | 0.0000051 | 0.2830204 | 0.0000329 |
| | | 2 | 0.0220042 | 0.0006211 | 0.0010124 | 0.0000058 | 0.2830523 | 0.0000326 |
| | | 6 | 0.0183476 | 0.0008400 | 0.0008479 | 0.0000081 | 0.2829970 | 0.0000344 |
| | | 7 | 0.0179002 | 0.0004949 | 0.0008205 | 0.0000021 | 0.2829909 | 0.0000397 |
| | | 8 | 0.0222319 | 0.0003007 | 0.0010155 | 0.0000097 | 0.2830217 | 0.0000239 |
| Сентябрьское | СТ-15-2 | N1-1 | 0.0105860 | 0.0015791 | 0.0005409 | 0.0000314 | 0.28327 | 0.00011 |
| | | N2-1 | 0.0204313 | 0.0017247 | 0.0012561 | 0.0000460 | 0.28404 | 0.00027 |
| | | N2-2 | 0.0091646 | 0.0005779 | 0.0006224 | 0.0000187 | 0.28299 | 0.00013 |
| | | N(4+5) | 0.0142893 | 0.0015700 | 0.0006654 | 0.0000241 | 0.28346 | 0.00044 |
| | | N7 | 0.0165492 | 0.0012229 | 0.0009319 | 0.0000313 | 0.28325 | 0.00015 |
| | | N7-2 | 0.0150983 | 0.0008013 | 0.0009829 | 0.0000285 | 0.28349 | 0.00046 |
| Двойное | ДВ-9 | 3 | 0.0115435 | 0.0010966 | 0.0007027 | 0.0000268 | 0.28305 | 0.00020 |
| | | 6 | 0.0054062 | 0.0004337 | 0.0002191 | 0.0000127 | 0.28309 | 0.00006 |
| | | 7 | 0.0240581 | 0.0017262 | 0.0010097 | 0.0000289 | 0.28353 | 0.00012 |
| | | 8 | 0.0232364 | 0.0033783 | 0.0009230 | 0.0000626 | 0.28372 | 0.00019 |
| | | 10 | 0.0197804 | 0.0011609 | 0.0010800 | 0.0000245 | 0.28302 | 0.00019 |
| | | BigNr10 | 0.0246785 | 0.0007511 | 0.0007466 | 0.0000093 | 0.28368 | 0.00017 |
| | ДВ-2 | N2 | 0.1186491 | 0.0067418 | 0.0035373 | 0.0001287 | 0.28347 | 0.00011 |
| | | N3 | 0.0636409 | 0.0139382 | 0.0026284 | 0.0002749 | 0.28239 | 0.00010 |
| | | N4 | 0.0747108 | 0.0068640 | 0.0025950 | 0.0001585 | 0.28310 | 0.00006 |
| | | N5 | 0.0617014 | 0.0083470 | 0.0021973 | 0.0001243 | 0.28308 | 0.00008 |
| | | N6 | 0.0727585 | 0.0039816 | 0.0032431 | 0.0001004 | 0.28264 | 0.00008 |
| | | N-Hi204 | 0.0798578 | 0.0056773 | 0.0036242 | 0.0001407 | 0.28262 | 0.00014 |
| Прикуп | ПР-5 | 2 | 0.01995 | 0.00067 | 0.003968 | 0.000035 | 0.282808 | 0.000062 |
| | | 3 | 0.01523 | 0.00030 | 0.003041 | 0.000018 | 0.282833 | 0.000041 |
| | | 5 | 0.00852 | 0.00016 | 0.001277 | 0.000008 | 0.282960 | 0.000037 |
| | | 6 | 0.01629 | 0.00038 | 0.002722 | 0.000006 | 0.282881 | 0.000038 |
| | | 9 | 0.00813 | 0.00045 | 0.001644 | 0.000029 | 0.282857 | 0.000039 |
| Токай | ТК-1 | 3 | 0.00961 | 0.00016 | 0.002958 | 0.000037 | 0.282897 | 0.000041 |
| | | 7 | 0.00697 | 0.00018 | 0.002639 | 0.000024 | 0.282851 | 0.000108 |
| | | 9 | 0.00590 | 0.00015 | 0.001464 | 0.000010 | 0.282903 | 0.000036 |
| | | L-T-fpom-1 | 0.01981 | 0.00065 | 0.007287 | 0.000176 | 0.282563 | 0.000108 |
| | | R-T-fpom-5 | 0.00594 | 0.00018 | 0.002232 | 0.000050 | 0.282884 | 0.000025 |
| | ТК-4А | 1 | 0.02433 | 0.00143 | 0.009006 | 0.000312 | 0.282390 | 0.000199 |
| | | 2 | 0.01092 | 0.00069 | 0.003127 | 0.000062 | 0.282952 | 0.000036 |
| | | 3 | 0.00362 | 0.00011 | 0.001001 | 0.000004 | 0.282871 | 0.000030 |
| | | 9 | 0.00975 | 0.00025 | 0.002369 | 0.000021 | 0.282809 | 0.000103 |
| | | 10 | 0.01289 | 0.00039 | 0.001937 | 0.000007 | 0.282647 | 0.000082 |

Примечание. Результат анализа изотопного состава гафния методом LA-ICPMS. При измерении Lu/Hf и Yb/Hf отношений в качестве концентрационного стандарта использован циркон 91500 (международный стандарт). Yb = 55 г/т в соответствии с международной проверкой, метод SIMS.

Note. Hf isotopic composition was analyzed by LA-ICPMS method. For determination of Lu/Hf and Yb/Hf ratios, 91500 zircon reference standard was used. Yb = 55 ppm (according to international verification by SIMS method).

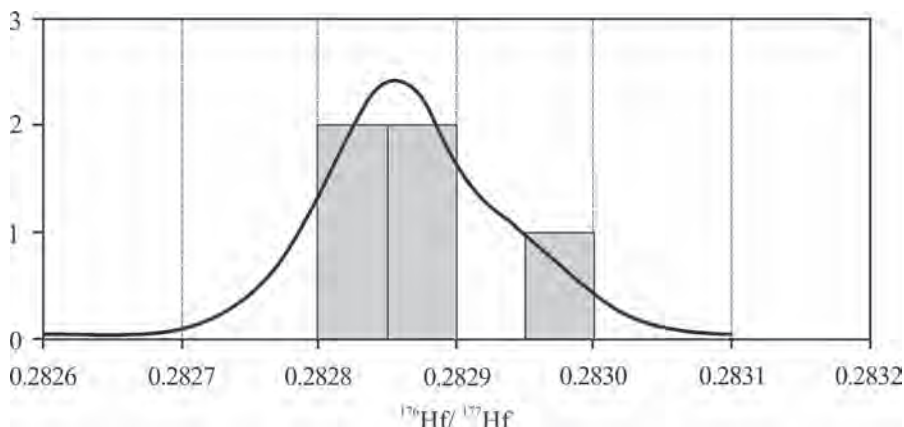


Рис. 3. График соотношений $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ для магматических рудопроявлений Токай и Прикуп.

Fig. 3. Plot of $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ for the Tokai and Prikup igneous ore deposits.

Таблица 8. Изотопный анализ серы в сульфидах рудных минералов месторождений Двойное и Сентябрьское

Table 8. Isotopic analysis of S from sulphur compounds of the Dvoynoe and Sentyabrskoe deposits

| № п.п. | Образец | Минерал | $\delta^{34}\text{S}_{\text{VCDT}}$, ‰ |
|--------|----------------|-------------|---|
| 1 | ДВ-13/Z-650 | Халькопирит | -1.9 |
| 2 | ДВ-13/Z-650 | Сфалерит | -2.2 |
| 3 | Z-1-16-26 | Пирит | -0.2 |
| 4 | Z-1-16-26 | Сфалерит | -2.4 |
| 5 | Z-1-16-26 | Галенит | -2.3 |
| 6 | Д-504013 | Халькопирит | -1.4 |
| 7 | Д-504013 | Сфалерит | -1.4 |
| 8 | Д-504013 | Галенит | -2.4 |
| 9 | Sp-15-INF-10-2 | Пирит | -1.6 |

Примечание. Сульфиды для определения изотопов серы были отобраны только в рудных породах месторождений Двойное и Сентябрьское. Аналитик Т.А. Веливецкая.

Note. The sulphides were sampled only from ore rocks of the Dvoynoe and Sentyabrskoe deposits. Measurements were performed by analyst T.A. Velivetskaya.

Первичные стронциевые изотопные отношения варьируют от 0.704 до 0.710 и более. Этот разброс можно объяснить различной степенью коровой контаминации мантийных расплавов.

Наименьшим значением изотопных систем Pb-Pb и Rb-Sr характеризуются магматические породы РМС Купола и Морошка. Эти породы обладают также наименее радиогенным свинцом и стронцием, что указывает на наименьшую степень их контаминации веществом относительно молодой коры.

Анализ изотопного состава серы в сульфидах РМС региона позволяет сделать вывод о подкоровом происхождении этого элемента. Он отвечает метеоритному составу, что свидетельствует о его первоначальной ювенильной природе.

Это, возможно, связано с тем, что формирование рудных зон сопровождалось газовыми “струями” более восстановительного типа. Как было показано нами, в составе газов, определенных в рудных кварцах месторождения Купол, обнаружен метан. В составе газов месторождений Двойное и Сентябрьское также присутствует метан, что характерно для всего региона (Николаев и др., 2013). Этот процесс, возможно, связан с высокотемпературными газотранспортными реакциями, как это было отмечено для вулкана Кудрявый (Коржинский и др., 1996; Дистлер и др., 2008).

Объемность этих данных относительно оруде-нения, связанного с магматизмом, может являться определяющим критерием его значимости.

4. Анализ определений состава флюидных включений в рудных кварцах месторождений позволяет сделать вывод о высокой концентрации солей в водном растворе всех месторождений (Савва, 2012). Из этих данных выделяются результаты по солевому составу включений в магматитах месторождения Купол. Изучение микро- и редкоземельных элементов и присутствие в минеральных фазах месторождения Купол серы, селена и бария позволяет сделать предположение, что оно формировалось при воздействии фумарол. Такие условия характерны для кальдерных комплексов, приуроченных к глубинным разломам, в пределах которых формируется поток восходящих углеродсодержащих рудоносных флюидов. Эти условия вполне соответствуют формированию кальдер этого региона (Дистлер и др., 2008; Сахно и др., 2016; и др.).

5. Подводя итог, можно полагать, что одним из главных критериев в формировании крупных месторождений является участие глубинного (мантийного) вещества, и прежде всего связанных с ним флюидных потоков и длительностью их проявления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акинин В.В., Миллер Э.Л. (2011) Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса *Петрология*, **19**(3), 249-290.
- Белый В.Ф. (1977) Стратиграфия и структуры Охотско-Чукотского вулканического пояса. М.: Наука, 171 с.
- Белый В.Ф. (1978) Формации и тектоника Охотско-Чукотского вулканического пояса. М.: Наука, 213 с.
- Верниковский В.А., Метелкин Д.В., Матушкин Н.Ю., Травин А.В., Верниковская А.Е., Жданова А.И. (2013) Возраст фундамента и геодинамические модели для ключевых структур Восточной Арктики. *Геологическая модель эволюции Арктики в мелу и кайнозое на основе геологических данных*. М.: Наука, 45-54.
- Глухов А.Н. (2008) Региональная геологическая позиция, структура и минералого-геохимическая зональность золото-серебряного месторождения Купол. *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, (3), 34-45.
- Григорьев И.В., Курашко В.В., Коган В.Б. (2014) Отчет о результатах проведения разведочных работ на рудопоявлении Морошка (2012–2014). Магадан: KINROSS, 227 с.
- Дистлер В.В., Диков Ю.П., Юдовская М.А., Чаплыгин И.В., Булеев М.И. (2008) Платино-хлор-фосфоруговодородные комплексы в вулканических флюидах; первая находка в земной обстановке. *Докл. АН*, **420**(2), 217-220.
- Коржинский М.А., Ткаченко С.И., Булгаков Р.Ф., Шмулович К.И. (1996) Составы конденсатов и самородные металлы в сублиматах высокотемпературных газовых струй вулкана Кудрявый (острова Итуруп, Курильские острова). *Геохимия*, (12), 1175-1182.
- Кравцов В.С., Белый В.Ф., Волков А.В., Алексеев В.Ю., Сидоров А.А., Томсон И.Н. (2005) Региональная геолого-структурная позиция золото-серебряного месторождения Купол (Чукотка). *Докл. АН*, **404**(2), 216-219.
- Котляр И.Н. (1986) Золото-серебряная рудоносность вулканоструктур Охотско-Чукотского пояса (отв. ред. В.И. Гончаров). СВКНИИ ДВНЦ АН СССР. М.: Наука, 263 с.
- Крупные и суперкрупные месторождения полезных ископаемых: зональность, размещение и условия образования (под ред. Д.В. Рундквиста). М.: Наука, 2004, 431 с.
- Лаверов Н.П., Лобковский Л.И., Кононов М.В., Добрецов Н.Л., Верниковский В.А., Соколов С.Д., Шипилов Э.В. (2013) Геодинамическая модель развития Арктического бассейна и примыкающей территории для мезозоя и кайнозоя и внешняя граница континентального шельфа России. *Геотектоника*, (1), 3-35.
- Николаев Ю.Н., Прокофьев В.Ю., Аппетанин А.В., Власов Е.А., Бакшеев И.А., Калько И.А., Комарова Я.С. (2013) Золото-теллуридная минерализация Западной Чукотки: минералогия, геохимия и условия образования. *Геология рудн. месторожд.*, **54**(2), 114-144.
- Особенности геологического строения золото-серебряного месторождения "Купол". (2008) Магадан: KINROSS, 31 с.
- Савва Н.Е., Полякова Г.А., Бянкин М.Н. (2012) К проблеме генезиса сульфидов и селенидов золота и серебра на месторождении Купол (Чукотка, Россия). *Геология и геофизика*, **53**(5), 597-609.
- Савва Н.Е., Колова Е.Е., Ромина М.И., Курашко В.В., Волков А.В. (2016) Золото-полиметаллическое оруденение в эксплозивных брекчиях: минералогическо-генетические аспекты (м-е Сентябрьское СВ, Чукотка). *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, (1), 16-36.
- Сахно В.Г., Баринев Н.Н., Карась О.А., Ивин В.В., Пипко М.С., Цурикова Л.С. (2014) Петролого-геохимические и изотопные критерии прогноза большеобъемности золото-серебряной рудоносности вулканоструктур Чукотского сектора Арктического побережья России. <http://www.ras.ru/scientificactivity/rasprograms/arctic.aspx>
- Сахно В.Г., Григорьев Н.В., Курашко В.В. (2016) Геохронология и изотопно-геохимические особенности генезиса магматических комплексов золото-серебряных рудно-магматических систем чукотского сектора арктического побережья России. *Докл. АН*, **468**(3), 297-303.
- Сахно В.Г., Цурикова Л.С., Максимов С.О. (2019) Геохронология и петро-геохимические особенности генезиса магматических комплексов золото-серебряных рудоносных систем Чукотского сектора Арктического побережья России. *Литосфера*, **19**(6), 861-888. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-861-888
- Сидоров А.А., Белый В.Ф., Волков А.В. (2007) Геология и условия образования уникального золото-серебряного месторождения на Чукотке. *Докл. АН*, **412**(2), 234-239.
- Тихомиров П.Л., Прокофьев В.Ю., Калько И.А., Аппетанин А.В., Николаев Ю.Н., Кобаяси К., Накамура Э. (2017) Постколлизийный магматизм Западной Чукотки и раннемеловая тектоническая перестройка Северо-Востока Азии. *Геотектоника*, (2), 32-54.
- Фор Г. (1989) Основы изотопной геологии. М.: Мир, 291 с.
- Allegre C.J. (2008) Isotope geology. Cambridge, Cambridge University Press. 512 p.
- Grantz A., Clark D.L., Phillips R.L. (1998) Phanerozoic stratigraphy of Northwind Ridge, magnetic anomalies in the Canada basin, and the geometry and timing of rifting in the Amerasia basin, Arctic Ocean. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **110**, 801-820.
- Miller E.L., Gehrels G.E., Pease V., Sokolov S.D. (2010) Stratigraphy and U-Pb detrital zircon geochronology of Wrangel Island, Russia: Implications for Arctic paleogeography. *AAPG Bull.*, **94**(5), 665-692.

REFERENCES

- Akinin V.V., Miller E.L. (2011) Evolution of calc-alkaline magmas of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt. *Petrologiya*, **19**(3), 249-290. (In Russian)
- Allegre C.J. Isotope geology (2008) Cambridge, Cambridge University Press, 512 p.
- Belyi V.F. (1977) *Stratigrafiya i struktury Okhotsko-Chukotskogo vulkanicheskogo poyasa* [Stratigraphy and structures of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt]. Moscow, Nauka Publ., 171 p. (In Russian)
- Belyi V.F. (1978) *Formatsii i tektonika Okhotsko-Chukotskogo vulkanicheskogo poyasa* [Rock associations and tectonics of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt]. Moscow, Nauka Publ., 213 p. (In Russian)

- Distler V.V., Dikov Yu.P., Yudovskaya M.A., Chaplygin I.V., Buleev M.I. (2008) Platinum-chlorine-phosphorus-hydrocarbon complexes in volcanic fluids – first finding in terrestrial environments. *Dokl. Akad. Nauk*, **420**(2), 217-220 (In Russian)
- Faure G. (1989) *Osnovy izotopnoi geologii* [Principles of isotope geology]. Moscow, Mir Publ., 291 p. (In Russian)
- Glukhov A.N. (2008) Regional position, structure and mineralogical and geochemical zonality of the Kupol gold-silver deposit. *Vestn. SVNTs DVO RAN*, (3), 34-45 (In Russian)
- Grantz A., Clark D.L., Phillips R.L. (1998) Phanerozoic stratigraphy of Northwind Ridge, magnetic anomalies in the Canada basin, and the geometry and timing of rifting in the Amerasia basin, Arctic Ocean. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **110**, 801-820.
- Grigor'ev I.V., Kurashko V.V., Kogan V.B. (2014) *Otchet o rezul'tatakh provedeniya razvedochnykh rabot na rudoproyavlenii Moroshka (2012–2014)* [Report on the results of exploration work at the Cloudberry ore Deposit (2012-2014)]. Magadan, KINROSS Publ., 227 p.
- Korzhinsky M.A., Tkachenko S.I., Bulgakov R.F., Shmulovich K.I. (1996) Condensate composition and native metals from sublimates of high-temperature effluxes of Kudryavy volcano (Iturup Island, the Kuril Islands). *Geokhimiya*, (12), 1175-1182. (In Russian)
- Kotlyar I.N. (1986) *Zoloto-serebryanaya rudonosnost' Okhotsko-Chukotskogo vulkanogen'nogo poyasa* [Gold-silver mineralization of volcanic formations from the Okhotsk-Chukotka volcanic belt]. (Ed. V.I. Goncharov). SVKNII DVNTs AN SSSR. Moscow, Nauka Publ., 263 p. (In Russian)
- Kravtsov V.S., Belyi V.F., Volkov A.V., Alekseev V.Yu., Sidorov A.A., Tomson I.N. (2005) Regional geological position and structure of the Kupol gold-silver deposit, Chukotka. *Dokl. Akad. Nauk*, **404**(2), 216-219. (In Russian)
- Krupnye i superkrupnye mestorozhdeniya poleznykh iskopaemykh: zonal'nost', razmeshchenie i usloviya obrazovaniya [Large and super-large mineral deposits: zonation and formation conditions]. (Ed. Academician D.V. Rundkvist). (2004) Moscow, Nauka Publ., 431 p. (In Russian)
- Laverov N.P., Lobkovsky L.I., Kononov M.V., Dobretsov N.L., Vernikovskiy B.A., Sokolov S.D., Shipilov E.V. (2013) Geodynamic model of the Arctic basin and adjacent territories development for Mesozoic and Cenozoic and outer boundary of the continental shelf of Russia. *Geotektonika*, (1), 3-35. (In Russian)
- Miller E.L., Gehrels G.E., Pease V., Sokolov S. (2010) Stratigraphy and U-Pb detrital zircon geochronology of Wrangel Island, Russia. Implications for Arctic paleogeography. *AAPG Bull.*, **94**(5), 665-692.
- Nikolaev Yu.N., Prokof'ev V.Yu., Apletanin A.V., Vlasov E.A., Baksheev I.A., Kal'ko I.A., Komarova Ya.S. (2013) Gold-telluride mineralization of West Chukotka: mineralogy, geochemistry and formation conditions. *Geol. Rudn. Mestorozhd.*, **54**(2), 114-144. (In Russian)
- Osobennosti geologicheskogo stroeniya zoloto-serebryanogo mestorozhdeniya "Kupol" [Features of geological structure of the Kupol gold-silver deposit]. (2008) Magadan, KINROSS Publ., 31 p. (In Russian)
- Savva N.E., Kolova E.E., Romina M.I., Kurashko V.V., Volkov A.V. (2013) Gold-polymetallic mineralization in explosive breccias of the Sentyabrskoe deposit (northeastern Chukotka): mineralogical and genetic aspects. *Vestn. SVNTs DVO RAN*, (1), 1-16. (In Russian)
- Savva N.E., Polyakova G.A., Byankin M.N. (2012) Towards the problem of genesis of gold and silver sulphides and selenides at the Kupol deposits (Chukotka, Russia). *Geol. Geofiz.*, **53**(5), 597-606. (In Russian).
- Sakhno V.G., Barinov N.N., Karas O.A., Ivin V.V., Pipko M.S., Tsurikova L.S. (2014) Petrological and geochemical isotopic criteria for projection of voluminal gold-silver ore mineralization in volcanic formations of the Chukotka sector of the Arctic coast of Russia. <http://www.ras.ru/scientificactivity/rasprograms/arctic.aspx>
- Sakhno V.G., Grigor'ev N.V., Kurashko V.V. (2016) Geochronology and isotope-geochemical features of genesis of magmatic complexes and related gold and silver-bearing ore-magmatic systems from the Chukotka sector of the Arctic coast of Russia. *Dokl. Akad. Nauk*, **468**(3), 297-303. (In Russian)
- Sakhno V.G., Tsurikova L.S., Maksimov S.O. (2019) Geochronology and petro-geochemical features of the genesis of magmatic complexes of gold-silver ore-bearing systems of the Chukotka sector of the Arctic coast of Russia. *Litosfera*, **19**(6), 861-888. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-861-888 (In Russian)
- Sidorov A.A., Belyi V.F., Volkov A.V. (2007) Geology and formation conditions of a unique gold-silver deposit of Chukotka. *Dokl. Akad. Nauk*, **412**(2), 234-239. (In Russian)
- Tikhomirov P.L., Prokof'ev V.Yu., Kal'ko I.A., Apletanin A.V., Nikolaev Yu.N., Kobayasi K., Nakamura E. (2017) Post-collisional magmatism of western Chukotka and Early Cretaceous tectonic rearrangement in northeastern Asia. *Geotektonika*, (2), 32-54. (In Russian)
- Vernikovskiy V.A., Metelkin D.V., Matushkin N.Yu., Travin A.V., Vernikovskaya A.E., Zhdanova A.I. (2013) Basement age and geodynamic models for major structures of the Arctic east. *Geologicheskaya model' evolyutsii Arktiki v melu i kainozoe na osnove geologicheskikh dannyykh* [Geological model of the Arctic evolution in Cretaceous and Cenozoic based on geological data]. Moscow, Nauka Publ., 45-54. (In Russian)