

УДК.552.533.41

DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-861-888

## Геохронология и петро-геохимические особенности генезиса магматических комплексов золото-серебряных рудоносных систем Чукотского сектора Арктического побережья России

В. Г. Сахно, Л. С. Цурикова, С. О. Максимов

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 01.02.2019 г.

*Объект исследования.* Изучались магматические комплексы северо-западной Чукотки, с которыми связаны крупнейшие месторождения золота и серебра Купольского (месторождение Купол) и Илирнейского (месторождения Двойное и Сентябрьское) рудных узлов. *Материалы и методы.* Петрогенные элементы рудовмещающих магматических пород определялись на спектрометре ICAP 6500Duo (США). Элементный анализ магматических и рудных проб проводился методом плазменной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Возраст определен по цирконам (SHRIMP-II, центр изотопных исследований ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург) с использованием системы лазерной абляции NWR-213 (США). *Результаты.* Получены новые данные по датированию магматических комплексов и золото-рудных магматических систем двух рудных узлов. Установлено, что проявления магматизма Купольского и Илирнейского рудных узлов различаются по возрасту формирования основной фазы. В Илирнейском рудном узле, представленном крупнообъемными интрузиями гранитоидов, лейкогранитов и вулканитами средне-основного состава, возраст определен в пределах 124–114 млн лет, а оруденение, сопряженное с более поздними фазами магматизма, – с мелкими интрузиями и дайковым комплексом преимущественно гранодиоритового состава, имеет возраст в пределах  $(93–92) \pm 2.0$  млн лет. В Купольском рудном узле магматизм, с которым связано оруденение, имеет возраст от  $91.0 \pm 1.4$  млн лет, а возраст риолитовых даек, вмещающих оруденение, определен в пределах 88.9–89.0 млн лет. *Выводы.* Из анализа РМС Купольского и Илирнейского рудных узлов можно предположить, что рудообразование в этом регионе связано с единым этапом активизации глубинных процессов и мантийно-коровым взаимодействием с участием глубинных (мантийных) флюидов. Масштабность этого процесса и характер связанного с ним оруденения определялись длительностью его проявления.

**Ключевые слова:** магматизм, оруденение, Приполярная западная Чукотка, SHRIMP-датирование, особенности генерации РМС

### Благодарность

Авторы искренне признательны руководству и геологам АО “Чукотская горно-геологическая компания”, Президиуму РАН и ФАНО (проект “Арктика”, 2014).

*Работа выполнена при финансовой поддержке х/д № 16/ЧГГК/369 от 14.06.2016 г. с АО “Чукотская горно-геологическая компания”, в рамках темы “Разработки петролого-геохимических критериев перспективных рудно-магматических структур на основе детального изучения магматизма как источника генерации рудоносных гидротермальных систем на примере крупнообъемных рудопроявлений”.*

## Geochronological and geochemical features of magmatic gold- and silver-bearing complexes in the Chukotka sector of the Russian Arctic coast

Vladimir G. Sakhno, Ludmila S. Tsurikova, Sergei O. Maksimov

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 01.02.2019

*Research subject.* This study was devoted to magmatic complexes in Northwestern Chukotka associated with the largest gold and silver deposits across Kupol'skii (Kupol field) and Ilirnei (Dvoinoe and September fields) ore junctions.

**Для цитирования:** 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

**For citation:** Sakhno V.G., Tsurikova L.S., Maksimov S.O. (2019) Geochronological and geochemical features of magmatic gold- and silver-bearing complexes in the Chukotka sector of the Russian Arctic coast. *Litosfera*, **19**(6), 861–888. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-861-888

© В.Г. Сахно, Л.С. Цурикова, С.О. Максимов, 2019

*Materials and methods.* The petrogenetic elements of ore-containing igneous rocks were determined using a spectrometer ICAP 6500Duo (USA). An elemental analysis of igneous and ore samples was performed by inductively coupled plasma spectrometry (ICP-MS). The age was determined by zircons (SHRIMP-II, VSEGEI isotope research center, St. Petersburg) using a laser ablation system NWR-213 (USA). *Results.* New information concerning the dating of magmatic complexes and gold-bearing magmatic systems in the ore junctions under study was obtained. It was established that the manifestations of magmatism in the Kupol and Ilirnei ore junctions differ in terms of the main phase formation age. The age of the Ilirnei ore junction, which is represented by large-volume intrusions of granitoids, leucogranites and volcanites of medium-basic composition, was determined to be 124–114 Ma. The age of mineralization, which is associated with later magmatism phases – small intrusions and a dike complex of predominantly granodiorite composition –, was estimated to be  $(93–92) \pm 2.0$  Ma. In the Kupol ore junction, the magmatism associated with mineralization was dated  $91.0 \pm 1.4$  Ma, while the age of rhyolite dikes containing mineralization was estimated to be 88.9–89.0 Ma. *Conclusion.* The results of the RMS analysis of the Kupol and Ilirnei ore junctions suggest that ore formation in this region was connected with a single stage of activation of deep processes and mantle-crust interaction with participation of deep (mantle) fluids.

**Keywords:** *magmatism, mineralization, circumpolar Western Chukotka, SHRIMP-Dating, RMS generation features*

#### Acknowledgments

The authors sincerely appreciate the management and geological staff Chukotka Mining and Geological Company, Presidium of RAS, and FASO Russia (the Arctic Project, 2014).

*The work is executed at financial support of the contract No. 16/CGGK/369 14.06.2016 with “Chukotka mining and geological company”, under the theme “The development of a petrological-geochemical criteria of promising ore-magmatic structures based on a detailed study of magmatism as a source of generation of ore-bearing hydrothermal systems on the example of bulk one”.*

## ВВЕДЕНИЕ

Побережье Чукотского сектора Арктики характеризуется широким проявлением мелового вулканизма, с вулканическими структурами которого связано золото-серебряное оруденение. Здесь известны крупные и суперкрупные месторождения – Купол, Двойное и рудопроявления Сентябрьское, Морошка и др. Изучение особенностей магматизма и связанного с ним оруденения на основе современных методов исследования (структурно-геологических, геохронологических, петрохимических, изотопных и др.) дает возможность выявления условий формирования и поиска новых перспективных рудно-магматических систем (РМС), связанных процессами магмо- и рудогенерации (Сидоров и др., 2007; и др.).

Для Приполярной Чукотки Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП) характерна зональность проявления вулканизма, которая выражается в смене кислого вулканизма на основной с запада на восток. Для Чукотской вулканической зоны свойственно объемное проявление кислого вулканизма (Западно-Чукотский сектор) (Белый, 1978), а для Анадырского сектора к югу от Южно-Анхойской шовной зоны – преобладание андезит-базальтового вулканизма в ранне- и позднемеловом этапах формирования ОЧВП (Соколов и др., 2010, 2015). Эта смена характера магматизма отражается и в особенностях рудопроявлений, размещение которых контролируют меридиональные и северо-западные глубинные разломы (рис. 1) (Сидоров и др., 2007; Особенности..., 2008; и др.). Немаловажное значение как для магматизма, так и для связанного с ним рудогенеза имеет закрытие Южно-Анхойского океана, который представлен Южно-Анхойской шов-

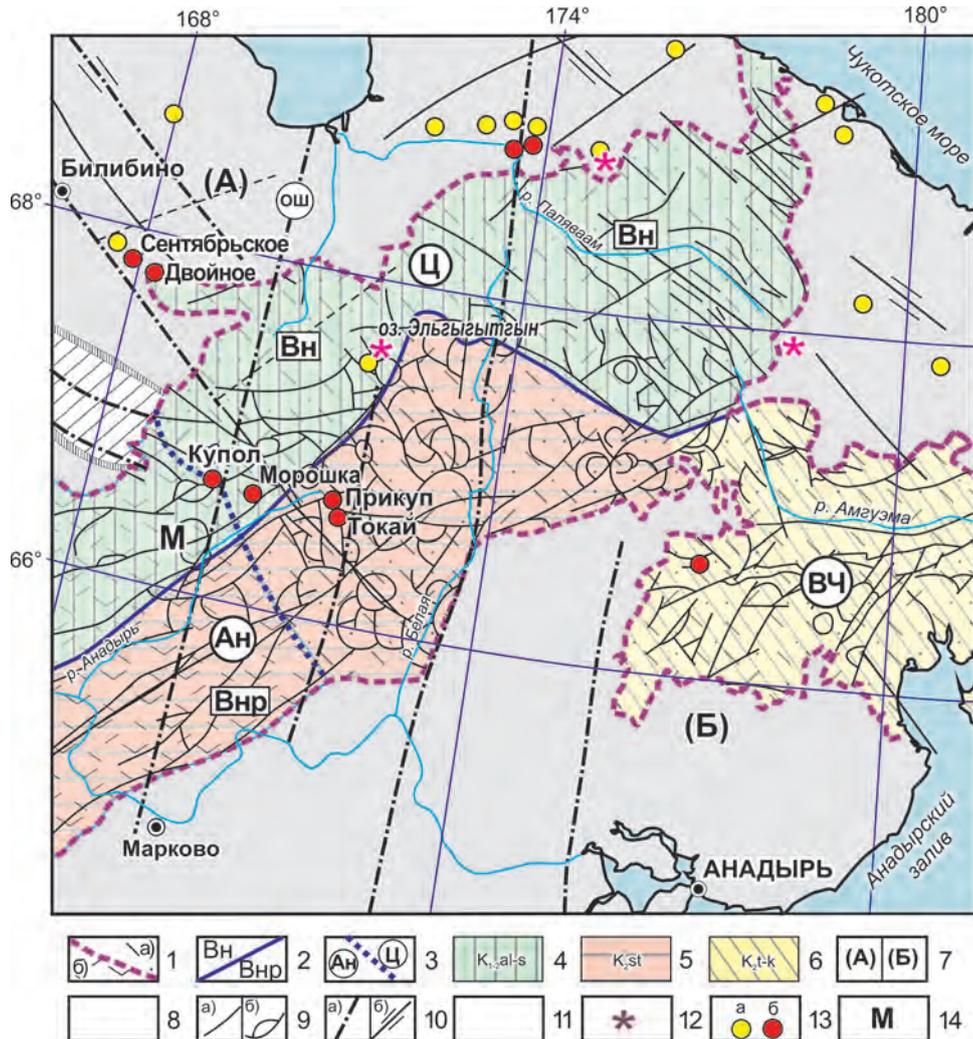
ной зоной, разделяющей ОЧВП на южный – Анадырский – сектор с широким проявлением андезит-базальтового и андезитового вулканизма, и северный – Чукотский – сектор с объемными извержениями продуктов кислого вулканизма.

В данной работе рассматриваются вопросы магматизма и геохронологии двух рудных узлов Приполярной Чукотки – Купольский и Илirianский. Купольский рудный узел располагается в пределах внешней зоны ОЧВП (Белый, 1978). Илirianский рудный узел располагается к северо-западу от Южно-Анхойской шовной зоны в пределах складчатых структур Верхояно-Чукотской области. Характерной особенностью внешней зоны является развитие структур, имеющих изометрично-линейный характер, в отличие от внутренней зоны, где преобладают купольные поднятия и кольцевые просядки (см. рис. 1).

## МЕТОДЫ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для решения генетических вопросов магматических комплексов и рудных процессов проводились определения содержания петрогенных элементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре ICAP 6500 Duo (Thermo Scientific Corporation, США). Определение микро- и редкоземельных элементов выполнено на масс-спектрометре Agilent 7700 x (Agilent Technologies, США) в исследовательском Центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток).

Для выполнения элементного анализа исследуемых проб были выбраны методы плазменной спектроскопии: атомно-эмиссионной и масс-



**Рис. 1.** Схема геологического строения и морфологические типы вулканоструктур северной части Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса (Геологическая карта..., 2012; Сидоров и др., 2007; и др.).

1 – границы Охотско-Чукотского вулканогенного пояса; состав вулканитов: а – преимущественно кислые, б – преимущественно средне-основные; 2 – граница внешней (Вн) и внутренней (Внр) зон; 3 – границы секторов: Ц – Центрально-Чукотского, Ан – Анадырского; ВЧ – Восточно-Чукотского; 4–6 – вулканические комплексы Центрально-Чукотского сектора: 4 – внешней зоны ОЧВП ( $K_1al$  и  $K_{1-2}al-s$ ); 5, 6 – внутренней зоны (t-r) (t-rm), возраст вулканических комплексов Восточно-Чукотского сектора (ВЧ)  $K_2t-k$  – турон-коньяк; 7 – породы основания: а – Чукотские мезозоицы, б – Корякские кайнозоиды; 8 – Южно-Анюйский рифтогенный прогиб; 9 – основные типы вулканоструктур: а – линейные прогибы внешней зоны, б – купольные поднятия и кольцевая просадка – внутренней зоны Центрального сектора; 10 – пояса и зоны: а – глубинных разломов и скрытых линейаментов по геологическим, геофизическим, морфоструктурным и космогеологическим данным (ОШ – Олюторско-Шелагинский пояс), б – и сдвиги по ним; 11 – разломы: а – закартированные, б – выделенные по космогеологическим данным; 12 – кайнозойские (миоцен-четвертичные) вулканы; 13 – месторождения, рудопоявления: а – мезотермальные золото-кварцевые, золото-сульфидные и золото-редкометалльные; б – эпitherмальные золото-серебряные; 14 – М – Мечкеревский вулканоплутонический центр.

**Fig. 1.** Geology and morphology of volcanic formations from the northern part of the Okhotsk-Chukotka volcanic-plutonic belt (Geologicheskaya karta..., 2012; Sidorov et al., 2007; and others).

1 – boundaries of the Okhotsk-Chukotka volcanic-plutonic belt (OCVB): of а – basically persilic rocks, б – medio-to-subsilic composition rocks; 2 – boundary between outer (Вн) and inner (Внр) zones; 3 – boundary for: Ц – Central Chukotka, Ан – Anadyr, (ВЧ) East Chukotka, sectors; 4–6 – volcanic complexes of the Central Chukotka sector: 4 – marginal zone ( $K_{1l}$  and  $K_{1-2}al-s$ ), 5, 6 – central zone (t-r) (t-rm); ages of volcanic complexes from the Eastern Chukotka sector (ВЧ)  $K_2t-k$  – Turinian-Coniacian; 7 – basement rocks: а – Mesozoic orogenic cycle of Chukotka, б – Cenozoic orogenic cycle of Koryak; 8 – the South-Anyui rift valley; 9 – main types of volcanic structures: а – linear troughs of outer zone, б – domes and ring-shaped saggings of inner zone of the Central sector; 10 – belts and zones of а – deep faults and hidden lineaments according to geological, geophysical, morphostructural and remote sensing data (OШ – Olyutorsko-Shelaginsky belt), б – fault displacements; 11 – faults: а – mapped, б – discovered by remote sensing; 12 – Cenozoic (Miocene-Quaternary) volcanoes; 13 – deposits, ore manifestations: а – mesothermal gold-quartz, gold-sulfide and gold-rare-earth, б – epithermal gold-silver; 14 – М – Mechkerovsky center of volcanic-plutonic activity.

спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS). Датирование возраста пород по цирконам методом La-ICP-MS было проведено в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН с использованием приборного комплекса, включающего систему лазерной абляции NWR-213 (Electro Scientific Industries, Inc, USA) и масс-спектрометр с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7500a (Agilent Technologies, USA). Кроме того, большая часть определения возраста пород проводилась по цирконам на 5-коллекторном масс-спектрометре высокого разрешения с возбуждением вторичных ионов на приборе SHRIMP-II (Центр изотопных исследований ВСЕГЕИ, Санкт-Петербург).

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КУПОЛЬСКОГО И ИЛИРНЕЙСКОГО РУДНЫХ УЗЛОВ ЧУКОТКИ

В геологическом отношении восточная часть арктического побережья Чукотки располагается в зоне активных геодинамических перестроек на протяжении сотен миллионов лет и связана с проявлением плюмово-рифтогенного, субдукционного и коллизионного типов геодинамической эволюции региона в мезозое и кайнозое (Кравцов и др., 2005; Верниковский и др., 2013; Лаверов и др., 2013; и др.). На основе современной сейсмической томографии эта активность интерпретируется как движение литосферных плит Северо-Восточной Азии под действием верхнемантийной конвекции, связанной с непрерывным погружением тихоокеанской литосферы под континент, что обусловило растяжение и коллизию в отдельных блоках (Лаверов и др., 2013).

Существует и другая версия тектонических событий в этом регионе, связанная с воздействием “ротационного эффекта” на геодинамический режим, результатом которого в поздней юре–раннем меле произошел отрыв Чукотско-Аляскинского блока от Канадского архипелага и его столкновение с Евразийской окраиной с последующим вращением и закрытием Южно-Ануйского палеоокеана (Grantz et al., 1998). След такого закрытия прослеживается в континентальных структурах чукотского сектора Арктики. Наиболее яркие примеры рудно-магматических систем (РМС) известны в пределах вулканоплутонических поясов Северо-Восточной и Восточной окраины Азии, а также континентальных окраин арктического побережья Ледовитого океана. Здесь сосредоточено большое количество объемных и крупнообъемных месторождений золота, серебра и других металлов (Бортников и др., 2014). Перспективными в отношении Au-Ag рудоносности являются континентальные блоки Чукотский и Аляскинский, образовавшиеся в результате распада Арктиды (Лаверов и др., 2013;

и др.). В западной части континентального арктического сектора Чукотки известны два рудных узла с золото-серебряными месторождениями эпitherмального типа: Купольский с месторождениями Купол и др. и Илирнейский с месторождениями Двойное, Сентябрьское и др. Купольский рудный узел располагается в пределах внешней части Охотско-Чукотского вулканоплутонического пояса (ОЧВП), протянувшегося от Ледовитого океана до южной части Охотского побережья более чем на 2000 км.

Разделение ОЧВП на внешнюю и внутреннюю (фронтальную) зоны первоначально проходило по системе крупных разломов (Белый, 1978). Но последующее изучение показало, что это разделение связано с особенностями глубинного строения этих зон, а также эволюцией и временем формирования магматизма. Охотско-Чукотский пояс, залегающий на палеозойских и мезозойских складчатых структурах, докембрийских массивах, сложенных метаморфическими комплексами, разделяется на ряд поперечных зон (секторов) – Чукотскую зону (Центрально- и Восточно-Чукотскую и фланговые зоны) и Анадырский, Пенжинский и Охотский секторы. Новые исследования дают возможность дополнить основные выводы по петрогеохимическим данным и геодинамике этого региона (Вулканические пояса..., 1984; Сахно и др., 2016; Тихомиров и др., 2017).

**Купольский рудный узел** расположен в пределах Верхне-Яблонской металлогенической зоны Центрально-Чукотского сектора Охотско-Чукотского вулканического пояса. К этому узлу приурочено одно из крупнейших месторождений – Купол, а также ряд перспективных рудопроявлений: Морошка, Прикуп, Токай и др. (рис. 2) (Вартанян и др., 2005; Особенности..., 2008; Глухов, 2008; Волков и др., 2012; Григорьев и др., 2012–2014; Савва и др., 2016; Сахно и др., 2016). Для всей территории рудного узла при средневозвышенном типе рельефа характерны отдельные куполовидные структуры, которые, как правило, представляют собой выходы рудно-магматических систем (Прикуп, Токай и др.).

Структурно рудный узел приурочен к северо-западной части Мечкеревской вулканотектонической депрессии, диаметр которой составляет около 100 км (см. рис. 2). Она выполнена среднекислыми вулканитами верхнемелового возраста общей мощностью около 1300 м. В основании выделяется толща туфов, покровы игнимбритов риолитового и риодацитового состава, которые перекрываются лавами андезитов и андезито-базальтов. Эти комплексы мелового возраста, в свою очередь, несогласно перекрываются покровами базальтов предположительно палеогенового возраста. Вулканиды прорваны малыми инрузиями, субвулканическими телами, дайками диоритов, андезитов, ри-



**Рис. 2.** Структурно-металлогеническая схема Мечкеревского вулканоплутонического центра и Купольного рудного поля по данным (Особенности..., 2008).

1 – породы, слагающие основание Мечкеревского ВПЦ; 2 – туфы, игнимбриты риолитов и риодацитов нижней толщи  $K_2^1$ ; 3 – лавы и туфы андезитов и андезито-базальтов средней толщи  $K_2^2$ ; 4 – игнимбриты, туфы и лавы риолитов верхней толщи  $K_2^3$ ; 5 – интрузивные и субвулканические тела различного состава; 6 – осевые зоны глубинных разломов: КМ – Кайемравеемский магмо- и рудоконтролирующий, КС – Крестовско-Саламихинский трансрегиональный глубинный разлом, АН – Анжыйский структурный шов; 7 – границы Мечкеревской ВПЦ; 8 – границы палеокальдер: Кв – Коваленковской, Оз – Озернинской; палеограбенов (вулканотектонических депрессий): Кп – Купольного, Км – Кайемравеемского; 9 – границы поднятий (ВКм – Верхне-Кайемравеемского); 10 – разломы; 11 – месторождения и рудопроявления: а – главная рудная зона месторождения Купол, б – участки с развитием промышленного оруденения; 12 – рудные зоны.

**Fig. 2.** Structural-metallogenic map of Mechkerovsky center of volcanic-plutonic activity and Kupol ore field (Oso-bennosti..., 2008).

1 – basement complex of the Mechkerovsky center of volcanic-plutonic activity; 2 – tuffs, rhyolitic and rhyodacitic ignimbrites of lower suit  $K_2^1$ ; 3 – andesitic and andesite-basaltic lavas and tuffs of intermediate suit  $K_2^2$ ; 4 – ignimbrites, rhyolitic tuffs and lavas of upper suit  $K_2^3$ ; 5 – intrusive and subvolcanic bodies of various composition; 6 – axial zones of deep faults: КМ – Kaiemraveem magma- and ore-controlling fault, КС – Krestovsko-Salamikhinsky trans-regional deep fault, АН – Anyuisky suture; 7 – boundaries of Mechkerovsky center of volcanic-plutonic activity; 8 – lines for paleocalderas: Кв – Kovalenkovskaya, Оз – Ozerninskaya; paleograben: Кп – Kupol, Км – Kaiemraveem; 9 – lines for uplifts: ВКм – Verkhne-Kaiemraveem; 10 – faults; 11 – ore fields and occurrences – main ore zone of the Kupol deposit, б – areas of commercial mineralization; 12 – ore zones.

олитов. Весь этот комплекс пород слагает Мечкеревскую вулканоструктуру.

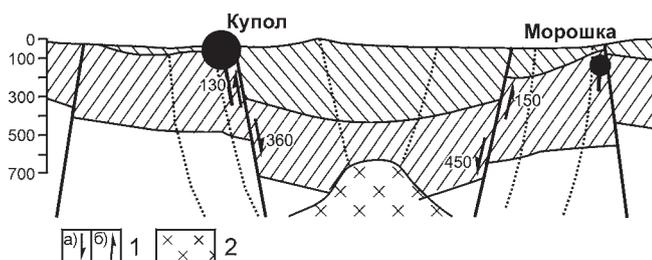
Месторождение Купол было детально исследовано как на поверхности, так и в скважинах. Оно

разбурено до глубины 900 м и более, что позволило получить подробную характеристику геологического строения месторождения и окружающего региона (Особенности..., 2008) (см. рис. 2).

По данным геологических исследований, этот объект представляет собой эталонный тип рудно-магматической системы (РМС), и его изучение представляет важный этап для прогноза многих подобных вулcano-купольных рудных объектов региона.

Как отмечалось выше, в размещении магматических и рудных образований определяющую роль играют региональные разломы, большая часть которых является магмо- и рудоконтролирующими структурами высокого порядка. Это Средне-Кайемравеевский глубинный разлом субмеридианального направления, а также Имрвеевский разлом СВ направления. Эти разломы сопряжены с осевой зоной Крестовско-Саламихинского трансрегионального глубинного разлома (см. рис. 2). Важную роль структурного фактора играют также вулканоструктуры (палеокальдеры): Коваленковская, Озернинская и Кайемравеевская (см. рис. 2).

Рудное поле месторождения Купол сложено толщей (более 700 м) переслаивающихся лав андезитов с туфами, игнимбритами дацитов, перекрытых покровами андезито-базальтов предположительно палеогенового возраста. В пределах рудного поля распространены дайки риолитов: дорудные и пострудные, прорывающие рудные жилы. Выделяются две разновидности риолитовых даек – афировые с флюидалной структурой и обломками вмещающих лав и редкопорфировые массивные риолиты. В пределах рудного поля встречаются дайки риолитовых стекол. По данным бурения и геофизических материалов, под рудным полем предполагается залегание интрузии гранитоидов (рис. 3).



**Рис. 3.** Структурный разрез по данным интерпретации гравиметрической съемки, по (Особенности..., 2008).

1 – цифры со стрелками: а – предполагаемые глубины условного горизонта центральной просадки, б – взброса; 2 – предполагаемое интрузивное тело гранитов (по данным геофизики).

**Fig. 3.** Structural cross-section according to interpretations of gravimetric survey (Osobennosti..., 2008).

1 – figures with arrows show supposed depths of theoretical horizon of central sagging (a) and uplift (b); 2 – supposed intrusion of granitic magma (on the geophysical evidences).

Данные по петрохимии пород и особенностям распределения микро- и редкоземельных элементов представлены в табл. 1. Три образца относятся к покровным образованиям: андезит (WP-5220), кристаллокластический туф (WP-4325) и риолит (WP-4319). Остальные характеризуют вулканиты рудного объекта и отличаются по многим компонентам от покровных пород. Особенности распределения микро- и редкоземельных элементов представлены на мультикомпонентной диаграмме (рис. 4). Возраст пострудных даек: F-2 =  $87.76 \pm 0.79$ , F-3 =  $88.89 \pm 0.87$  и F-4 =  $88.98 \pm 0.89$  млн лет. К-Ag методом определен также возраст флюидалного покровного дацита –  $89.5 \pm 2$  млн лет – и андезита, отвечающего нижней части толщи, –  $94.5 \pm 2$  млн лет (рис. 5, 6). Это позволило определить возраст оруденения в промежутке 88–89 млн лет и сделать вывод о том, что процессы рудообразования и магматизма сопряжены во времени.

Купольский рудный узел помимо месторождения Купол включает еще три РМС – Морошка, Прикуп и Токай (см. табл. 1). Данные о возрасте магматических пород РМС Прикуп и Токай представлены в табл. 2 (см. рис. 5, 6). На рудопроявлении Морошка была пробурена скв. KW-14-232, вскрывшая вулканические породы, представленные брекчиями и туфами риодацитов, в различной степени измененными вторичными процессами (карбонатизация, окварцевание, калишпатизация). Скважиной KP-14-232 была пересечена также дайка гранитпорфира (скв. KW-13-147), возраст которой близок к покровным вулканитам по соотношениям  $^{207}\text{Pb}/\text{U}^{235}$  и  $^{206}\text{Pb}/\text{U}^{238}$  в цирконах (табл. 3). Покровные образования, перекрывающие рудное поле, представлены свежими базальтами, андезито-базальтами, в которых в качестве фенокристов встречаются клинопироксен, оливин, плагиоклаз, а основная масса частично раскристаллизована. В петрохимическом отношении это типичные породы известково-щелочной серии, большая часть которых характеризуется преобладанием натрия над калием. В измененных породах, в значительной степени затронутых калишпатизацией, появляются разности с повышенным содержанием калия. В некоторых породах отмечаются высокие концентрации бария. В большей степени это свойственно андезитдацитовым разностям. Для них характерны и более высокие концентрации кадмия, мышьяка и серебра (см. рис. 4).

Следует подчеркнуть, что для всех пород РМС Купольского рудного узла свойственны корреляционные связи мышьяка, кадмия и серебра. Но это не свойственно для пород РМС Прикуп и Токай. В них отмечаются повышенные концентрации хрома, бария, а также присутствие кадмия. Как указывают многие исследователи, наличие кадмия как в составе магматических комплексов, так и в рудных зонах позволяет рассматривать такие РМС как пер-

**Таблица 1.** Петрохимические (мас. %), микро- и редкоземельные элементы (г/т) представительных магматических пород Купольского рудопоявления

**Table 1.** Concentrations of major (wt %), trace, and rare-earth elements (ppm) in igneous rocks of the Kupol deposit

Компонент	Купол											Морошка	
	КЛ-1А	КЛ-1Б	КЛ-2А	КЛ-2Б	КЛ-2С	КЛ-3А	КЛ-4	КЛ-5	WP-4220	WP-4325	WP-4319	109907	109908
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	Р	Р	Рст	Рт	Р	Рст	Р	Р(из)	Др	Д	Р	Д(из)	Ан
SiO <sub>2</sub>	74.38	74.23	74.38	74.23	74.82	75.46	75.64	73.06	56.62	67.02	71.78	61.86	56.41
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.07	0.06	0.76	0.43	0.22	0.63	0.74
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.37	13.61	13.37	13.61	13.60	12.22	13.09	12.32	16.12	15.11	14.32	15.27	16.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.50	1.53	1.50	1.53	1.39	1.27	1.22	1.06	7.52	3.63	2.14	5.58	7.47
MnO	0.06	0.11	0.06	0.11	0.09	0.07	0.05	0.09	0.15	0.03	0.04	0.13	0.13
MgO	0.19	0.12	0.19	0.12	0.06	0.06	0.07	0.08	4.52	0.37	0.20	1.76	3.60
CaO	0.73	0.72	0.73	0.72	0.71	0.60	0.57	0.48	6.02	1.23	1.24	3.45	5.58
Na <sub>2</sub> O	2.93	3.56	2.93	3.56	4.05	3.54	3.63	3.49	2.97	2.18	4.09	0.87	2.35
K <sub>2</sub> O	3.55	3.92	3.55	3.92	4.29	3.87	4.79	4.16	2.19	7.42	3.80	5.02	2.79
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.23	0.13	0.04	0.19	0.26
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.69	0.36	0.69	0.36	0.16	2.27	0.08	н.о.	0.58	0.49	0.75	0.71	0.50
П.п.п.	2.27	1.54	2.27	1.54	0.64	0.65	0.92	4.79	2.07	1.55	1.16	4.14	4.00
Σ	99.76	99.79	99.76	99.79	99.90	100.08	100.13	99.59	99.75	99.60	99.78	99.61	99.83
Sc	21.65	21.56	2.5	2.4	2.2	2.5	2.8	2.1	21.91	11.65	2.99	16	21
V	148.3	141.9	3.622	2.736	3.024	4.041	4.521	2.291	194.3	37.58	17.84	92.45	121.6
Cr	133.26	139.97	18.74	45.13	11.67	51.46	50.48	16.87	189.7	50.63	148.1	209.84	140.8
Co	19.58	19.96	0.48	0.651	0.214	0.387	0.374	0.246	25.26	4.22	2.06	8.17	13.27
Ni	11.72	11.87	4.883	4.053	2.689	5.715	2.948	4.569	51.70	3.34	9.48	6.66	11.30
Cu	27.27	31.75	20.57	14.62	11.86	14.12	10.31	11.21	38.11	5.09	3.68	33.78	33.12
Zn	89.88	82.34	55.5	58	49.3	39.1	36.9	41.3	86.68	61.04	43.64	59	81
As	17.50	10.77							9.39	8.50	2.94	98.12	7.83
Rb	71.39	63.47	78.0	103.0	101.4	91.2	111.8	140.4	48.82	207.1	99.23	153.0	62.45
Sr	451.5	535.5	71.36	99.78	80.31	71.21	59.87	40.91	423.0	147.0	198.0	142	439
Y	23.60	20.82	12.25	15.06	13.14	12.61	10.92	13.29	21.12	21.52	13.86	19.26	18.48
Zr	132.1	131.0	89.57	122.2	120	109.9	105.4	89.72	94.03	235.3	159.7	157.7	124.7
Nb	5.83	4.79	5.791	7.023	7.1	5.783	6.91	6.79	5.10	8.84	8.12	5.59	4.72
Mo	6.94	5.92	1.88	4.114	1.945	4.804	5.38	3.425	7.27	4.06	10.87	20.99	10.36
Ag	0.18	0.18											
Cd	0.28	0.18	0.13	0.177	0.252	0.248	0.155	0.222	0.28	0.09	0.10	0.16	0.12
Cs	2.51	1.97	1.539	1.393	1.148	0.917	1.155	2.406	1.05	4.44	2.02	16.16	11.46
Ba	510.8	503.5	722.5	794.1	814.1	696.6	742.2	723.2	501.9	1102	949.9	771.1	641.1
La	21.00	18.07	16.92	23.37	24.91	21.09	21.35	17.31	17.80	26.79	25.09	26.88	24.06
Ce	47.61	40.31	32.2	42.66	45.75	38.66	39.58	34.75	39.79	55.33	48.71	57.35	50.00
Pr	5.66	4.84	3.507	4.864	4.951	4.454	4.28	3.932	4.26	5.62	4.62	6.30	5.47
Nd	22.51	19.67	14.02	18.22	18.96	16.06	16.56	13.98	17.38	21.38	16.08	23.23	21.76
Sm	4.85	4.18	2.458	2.945	3.417	2.633	2.844	2.77	3.69	4.24	2.73	4.77	5.18
Eu	1.16	1.08	0.42	0.561	0.541	0.471	0.412	0.305	1.04	1.23	0.68	1.02	1.05
Gd	4.63	4.20	2.557	3.48	3.188	2.705	2.423	2.545	3.61	3.69	2.31	3.05	3.27
Tb	0.68	0.61	0.359	0.505	0.446	0.389	0.372	0.38	0.47	0.52	0.31	0.87	0.75
Dy	3.66	3.51	2.072	2.749	2.454	2.393	1.904	2.308	2.73	2.88	1.71	5.37	5.33
Ho	0.76	0.68	0.46	0.615	0.51	0.477	0.39	0.481	0.55	0.57	0.33	0.97	0.94
Er	2.15	2.06	1.499	1.904	1.756	1.489	1.428	1.603	1.65	1.73	1.05	2.44	2.28
Tm	0.32	0.29	0.259	0.3	0.258	0.254	0.224	0.252	0.22	0.24	0.17	0.38	0.32
Yb	2.16	1.89	1.739	1.897	2.274	1.919	1.349	1.813	1.52	1.69	1.22	2.99	2.56
Lu	0.31	0.28	0.24	0.347	0.358	0.298	0.259	0.292	0.21	0.24	0.18	0.38	0.28
Hf	2.87	3.10	2.571	3.48	3.186	3.099	3.157	2.605	3.27	6.74	4.77	6.29	4.47
Ta	0.36	0.32	0.571	0.776	0.759	0.494	0.715	0.636	0.41	0.91	0.85	0.71	0.52
W	4.04	4.52	1.182	3.449	1.209	3.273	3.525	2.133	4.02	2.46	5.59	11.62	7.99
Pb	8.40	8.95	18.06	28.72	20.62	19.78	20.51	18.48	12.37	18.46	15.08	12.97	15.53
Th	5.46	5.39	10.33	13.26	13.31	12.01	11.75	11.12	4.42	11.42	10.00	9.16	6.78
U	1.79	2.04	3.43	4.25	3.94	3.70	3.44	4.40	1.42	2.42	2.78	3.53	2.11

Таблица 1. Продолжение

Table 1. Continuation

Ком- по- нент	Морошка															
	MP-1	MP-2	MP-3	MP-4	MP-5	MP-Гр-1	Скв. КР-14-232					Скв. КВ-14-232				
							274	308	320	328	387	72	211	240	272	292
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Б	Б	Ан	Ан	Ан-Б	Р	Ан-Б	Ан	Б	Б	Ан	Б	Ан	Ан-Д	Д	Д	
SiO <sub>2</sub>	55.60	55.51	57.81	57.43	56.00	70.76	56.51	61.18	50.83	53.60	59.15	52.88	61.63	57.19	63.14	61.80
TiO <sub>2</sub>	0.59	0.70	0.63	0.82	0.72	0.22	0.59	0.56	0.71	0.54	0.64	0.97	0.57	0.71	0.29	0.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.25	15.80	17.32	15.54	17.54	14.67	17.26	15.48	16.24	17.06	16.19	18.56	15.09	18.02	15.80	15.58
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.19	6.30	6.07	7.67	7.26	2.73	4.83	4.37	7.64	6.07	6.11	8.86	4.44	6.56	3.71	4.07
MnO	0.15	0.15	0.11	0.16	0.15	0.05	0.07	0.08	0.13	0.10	0.11	0.14	0.09	0.07	0.08	0.09
MgO	2.59	3.05	2.54	3.85	3.43	0.30	1.40	1.45	3.54	2.48	2.61	2.58	1.57	2.94	2.00	1.47
CaO	7.02	5.38	6.41	6.49	6.67	1.03	4.74	3.54	5.86	4.65	4.19	2.53	3.40	2.28	2.34	3.58
Na <sub>2</sub> O	2.38	2.29	3.12	2.69	3.03	4.07	3.68	3.69	1.65	1.97	3.63	2.37	3.76	2.85	1.01	3.90
K <sub>2</sub> O	1.70	2.42	1.95	1.90	1.82	3.68	3.09	3.15	3.04	3.73	2.83	2.70	2.72	2.99	4.41	3.27
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.19	0.23	0.23	0.30	0.20	0.07	0.22	0.23	0.17	0.12	0.18	0.17	0.22	0.15	0.10	0.22
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.20	0.64	0.57	0.69	0.27	0.35	0.77	0.82	0.58	0.45	0.21	1.27	0.68	0.58	0.43	0.14
П.п.п.	5.93	7.46	2.94	2.37	3.05	1.78	6.56	5.23	9.35	9.37	3.91	6.78	5.53	5.78	6.36	5.02
Σ	99.79	99.91	99.70	99.92	100.14	99.72	99.72	99.78	99.73	100.14	99.76	99.80	99.71	100.12	99.67	99.68
Sc	17.90	21.7	20.2	27.5	21.24	3.2	8.86	8.46	22.62	16.23	16.11	26.65	8.59	21.26	5.24	9.17
V	133.5	107.1	114.5	151.3	160.6	2.528	73.5	67.9	177.3	135.8	122.2	194.6	67.1	161	29	68.8
Cr	83.64	66.04	97.34	72.08	101.35	29.79	61.02	30.64	37.30	58.86	64.92	43.30	26.80	46.25	91.95	35.80
Co	16.89	13.18	14.88	16.82	19.82	0.568	9.77	7.28	19.26	10.99	14.47	20.08	7.25	15.26	5.67	7.24
Ni	9.52	8.233	9.653	11.38	7.07	4.055	5.40	5.98	11.59	4.79	6.82	11.83	19.73	9.59	7.28	3.37
Cu	30.41	24.7	27.19	35.55	30.52	17.65	11.83	10.30	20.22	10.38	22.17	42.95	7.35	23.31	2.97	14.62
Zn	75.74	67.3	70.7	83.5	85.24	70.1	80.58	72.96	91.87	77.47	78.22	99.02	78.10	86.80	49.77	68.39
As	6.43	0.0	0.0	0.0	4.76	0.0	6.13	6.79	5.58	7.13	18.84	7.06	8.41	2.86	3.37	11.20
Rb	48.83	66.6	44.1	31.4	42.72	82.1	103.8	93.47	126.9	121.7	76.70	84.25	86.61	105.5	168.7	97.54
Sr	508.4	318.9	494.7	788.3	552	168.6	328.5	393.4	217.5	198.9	467.8	373.5	272.1	290.2	156.1	369
Y	18.44	15.93	15.85	19.7	20.36	17.76	17.85	17.15	16.82	17.39	20.38	16.91	17.10	15.73	15.88	18.04
Zr	131.4	141.1	132.7	155.7	107.3	276.2	103.4	90.74	54.32	129.1	136.6	92.69	91.94	83.40	137.3	86.52
Nb	4.29	4.427	4.459	4.621	4.51	8.057	6.61	6.20	3.93	4.64	5.32	4.80	6.31	4.64	3.84	5.79
Mo	3.54	3.483	5.56	3.854	4.88	3.345	4.34	2.48	1.34	2.17	2.96	0.85	2.39	0.90	5.04	2.94
Ag	0.10	0.0	0.0	0.0	0.18	0.0	0.10	0.13	0.10	0.16	0.25	0.13	0.11	0.12	0.07	0.16
Cd	0.19	0.284	0.231	0.23	0.17	0.349	0.18	0.12	0.11	0.13	0.23	0.14	0.12	0.14	0.22	0.14
Cs	29.99	7.859	0.797	11.93	1.28	3.669	14.87	9.07	16.55	10.59	8.31	12.29	11.51	6.56	15.39	7.87
Ba	370.2	424.2	529.1	795.2	499.9	1015	208.8	765.6	397.9	364.4	528.5	578.7	675.6	567.1	675.6	758.3
La	17.33	16.07	15.63	16.66	16.95	23.17	26.96	23.20	16.03	20.44	20.77	15.79	22.67	19.66	15.83	23.37
Ce	38.86	33.53	31.97	35.83	37.09	45.09	54.86	47.19	34.86	43.37	43.91	36.30	46.79	44.09	32.48	48.22
Pr	4.55	4.345	4.122	4.577	4.43	5.254	6.38	5.52	4.48	5.13	5.33	4.38	5.33	5.26	3.73	5.51
Nd	18.14	18.7	16.33	19.59	18.10	20.83	24.32	21.31	18.33	19.93	21.09	17.42	19.98	21.51	13.68	21.04
Sm	3.84	3.749	3.881	4.488	3.83	4.083	4.70	4.12	3.92	4.03	4.42	3.74	3.76	4.35	2.73	4.09
Eu	1.08	1.022	1.067	1.119	1.12	1.003	1.16	1.14	1.16	1.03	1.06	1.08	1.09	1.06	0.78	1.13
Gd	3.85	3.875	3.679	4.502	3.97	4.09	4.48	4.03	3.96	3.74	4.29	3.79	3.68	4.08	2.85	3.92
Tb	0.54	0.489	0.594	0.643	0.59	0.526	0.60	0.55	0.57	0.54	0.62	0.56	0.51	0.54	0.42	0.53
Dy	2.93	3.243	3.195	4.209	3.27	2.931	3.15	2.97	3.16	3.01	3.46	3.12	2.81	2.87	2.45	3.02
Ho	0.63	0.631	0.65	0.806	0.67	0.534	0.64	0.61	0.63	0.64	0.72	0.63	0.58	0.57	0.51	0.60
Er	1.73	1.867	1.952	2.05	1.91	2.184	1.88	1.86	1.77	1.83	2.08	1.77	1.75	1.65	1.51	1.71
Tm	0.26	0.291	0.279	0.326	0.27	0.325	0.28	0.26	0.25	0.27	0.31	0.26	0.24	0.23	0.22	0.25
Yb	1.57	1.804	1.801	2.034	1.87	2.449	1.78	1.81	1.49	1.76	1.98	1.73	1.73	1.51	1.63	1.65
Lu	0.25	0.26	0.29	0.331	0.28	0.341	0.27	0.26	0.22	0.27	0.29	0.25	0.25	0.22	0.25	0.26
Hf	3.00	3.2	3.249	3.538	2.52	5.762	2.94	2.90	1.44	3.16	3.74	2.41	2.55	2.04	3.21	2.27
Ta	0.29	0.363	0.331	0.361	0.28	0.738	0.47	0.43	0.26	0.35	0.37	0.31	0.43	0.30	0.31	0.39
W	2.54	4.14	5.573	2.703	3.41	2.449	3.23	2.05	2.30	2.39	2.45	0.99	1.67	1.26	3.72	1.67
Pb	9.25	11.23	10.53	12.51	7.13	17.78	14.70	12.19	5.26	8.79	9.01	10.31	9.26	10.94	4.13	11.89
Th	4.50	5.71	4.78	6.09	4.11	8.63	10.03	8.60	2.88	5.71	6.07	4.15	8.28	3.91	7.71	7.77
U	1.59	2.10	1.98	2.35	1.42	3.21	3.66	3.42	1.09	1.71	2.10	1.28	3.06	1.43	2.58	3.16

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4: Ан – андезит, Ан-Б – андезито-базальт, Ан-Д – андезито-дацит, Б – базальт, Г – гранит, Гр-с – грано-сиенит, Д – дацит, Дт – туф дацита, Др – диорит, Р-Д – риолито-дацит, Р – риолит, Рг – туф риолита, Рст – стекло, Иг – игнимбрил, (из) – изменен. Определение содержания H<sub>2</sub>O<sup>-</sup>, п.п.п., SiO<sub>2</sub> выполнено методом гравиметрии (аналитик Л.И. Алексеева), остальных элементов – методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре iCAP 6500Duo (Thermo Scientific Corporation, США), определение содержания РЗЭ выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700 (Agilent Techn., США) (ответственный исполнитель Н.В. Зарубина).

Таблица 1. Окончание

Table 1. Ending

Компо- нент	Прикуп							Токай				
	Пр-1	Пр-2	Пр-3	Пр-4	Пр-5	Пр-6	Пр-7	ТК-1	ТК-3	ТК-4А	ТК-5	ТК-6
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Р	Ан	Р	Р-Д	Д	Ан	Р-Д	Ан	Р	Ан	Ан-Д	Ан
SiO <sub>2</sub>	80.46	54.68	74.49	70.94	65.67	57.41	70.46	62.42	78.95	58.13	55.07	57.60
TiO <sub>2</sub>	0.24	0.74	0.33	0.40	0.39	1.01	0.22	0.59	0.36	0.74	0.67	0.75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.14	17.37	13.55	15.90	14.92	16.19	12.47	15.12	10.31	15.67	20.85	15.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.94	7.74	1.44	1.30	3.72	7.71	2.22	4.88	2.11	5.74	5.92	5.77
MnO	0.01	0.17	0.02	0.02	0.11	0.12	0.08	0.15	0.02	0.20	0.30	0.44
MgO	0.25	2.66	0.75	0.84	0.91	1.91	0.66	2.22	0.42	3.20	1.71	3.02
CaO	0.08	6.46	0.29	0.24	2.91	4.77	0.78	0.19	0.27	3.51	7.78	2.77
Na <sub>2</sub> O	0.12	3.14	0.08	0.06	3.06	3.68	3.23	1.86	0.11	2.50	3.92	1.46
K <sub>2</sub> O	4.38	2.04	4.08	4.76	3.13	3.62	3.34	8.39	3.06	4.91	1.46	7.59
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.22	0.02	0.07	0.15	0.42	0.03	0.23	0.05	0.25	0.22	0.23
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.18	0.30	0.53	0.55	0.28	0.44	0.51	0.57	0.56	0.40	0.46	0.28
П.п.п.	2.64	4.30	4.17	4.48	4.34	2.35	5.52	3.03	3.35	4.28	1.34	3.90
Σ	99.51	99.81	99.76	99.57	99.59	99.65	99.52	99.64	99.56	99.53	99.69	99.56
Sc	5.5	23.25	5.51	10.40	9.7	18.03	6.7	9.51	7.5	13.1	14.81	12.18
V	32.31	179.5	53.3	67.3	39.89	95	20.35	73.6	54.7	92.49	100.5	106.2
Cr	321.7	129.39	130.92	91.58	225.3	57.48	31.22	142.61	505.8	184.5	26.77	142.33
Co	1.528	17.87	0.91	1.08	4.398	13.33	2.921	3.30	2.829	11.68	18.75	16.54
Ni	7.292	8.13	2.31	16.49	6.937	5.23	3.95	13.32	13.2	16.94	6.32	43.07
Cu	23.45	26.70	5.27	4.43	15.78	16.97	16.06	9.75	56.25	25.8	13.23	17.78
Zn	12.2	99.47	10.16	21.43	59.1	104.24	40.6	130.24	13.7	74.1	84.27	169.92
As	0.0	21.13	67.28	367.82	0.0	5.92	0.0	81.08	0.0	0.0	21.90	11.41
Rb	101.2	60.31	212.9	204.1	63.29	123.5	56.53	369.0	85.33	114.3	36.46	364.4
Sr	40.35	509.5	34.2	109.7	228.8	394.5	72.23	151.4	15.63	392.2	725.9	401.6
Y	6.333	24.23	8.27	12.18	15.7	41.11	8.803	10.14	10.51	13.3	16.82	18.02
Zr	73.61	134.6	46.51	76.94	171.2	237.9	81.77	127.8	118.2	139.7	112.0	133.3
Nb	3.158	4.87	5.90	5.41	5.497	11.34	6.341	5.37	4.533	4.885	4.25	5.90
Mo	76.15	6.60	14.23	4.58	16.15	3.94	1.504	2.48	67.49	7.077	1.79	4.07
Ag	0.0	0.16	1.53	0.94	0.0	0.17	0.0	3.33	0.0	0.0	0.66	0.31
Cd	0.1293	0.20	0.09	0.09	0.2603	0.29	0.2204	0.18	0.2212	0.1779	0.50	1.35
Cs	3.147	9.14	22.61	15.09	5.432	3.55	1.474	4.12	5.943	5.407	0.97	13.92
Ba	565.4	525.2	297.1	486.4	619.1	758.7	292	658.5	207.4	732.6	482.9	711.6
La	9.981	19.55	16.98	27.47	20.57	34.14	17.13	10.31	23.25	20.81	14.67	24.41
Ce	20.43	43.24	33.45	54.56	42.62	72.27	31.95	20.62	44.45	42.72	40.75	53.75
Pr	2.246	5.17	3.89	5.95	4.865	8.36	3.269	2.16	5.225	5.336	4.00	6.05
Nd	8.402	20.97	13.73	21.48	19.15	33.61	12.54	7.12	19.63	22.64	16.49	23.63
Sm	1.706	4.44	2.44	3.73	3.728	7.04	2.087	1.27	3.815	4.301	3.63	4.56
Eu	0.4104	1.18	0.60	0.84	0.8321	1.64	0.366	0.40	0.8932	1.267	1.30	1.34
Gd	1.725	4.63	2.21	3.20	3.836	7.21	2.263	1.44	3.434	4.127	3.63	4.31
Tb	0.219	0.69	0.28	0.39	0.5699	1.07	0.2887	0.24	0.4277	0.5464	0.54	0.58
Dy	1.212	3.85	1.40	1.97	2.904	5.98	1.827	1.46	2.025	2.784	2.81	2.96
Ho	0.279	0.77	0.28	0.38	0.678	1.29	0.3776	0.34	0.4016	0.5234	0.58	0.57
Er	0.945	2.24	0.86	1.23	2.082	3.69	1.165	1.02	1.142	1.455	1.65	1.57
Tm	0.09214	0.33	0.13	0.18	0.3209	0.53	0.169	0.16	0.1779	0.211	0.23	0.22
Yb	0.8983	2.07	0.89	1.28	2.233	3.28	1.251	1.02	1.259	1.493	1.59	1.43
Lu	0.129	0.31	0.14	0.22	0.3271	0.52	0.2249	0.14	0.1739	0.2375	0.24	0.21
Hf	2.083	2.93	1.57	1.87	4.831	5.19	2.734	2.94	3.832	4.126	2.30	2.98
Ta	0.3229	0.31	0.36	0.34	0.4558	0.62	0.5869	0.30	0.3545	0.3883	0.22	0.34
W	16.39	4.60	4.89	4.67	15.05	2.57	1.517	3.69	25.98	6.813	0.84	3.41
Pb	45.99	7.99	13.15	15.90	24.78	11.56	18.27	11.29	20.08	13.86	5.93	9.93
Th	5.544	4.71	5.57	6.30	8.427	7.45	7.614	6.20	4.723	6.842	2.70	5.57
U	1.951	1.62	1.57	2.32	2.987	2.39	2.541	1.93	2.069	2.249	0.88	1.83

Note. Here and in Table 3, 4: Ан – andesite, Ан-Б – basaltic andesite, Ан-Д – andesite-dacite, Б – basalt, Г – granite, Гр-с – granosuenite, Д – dacite, Дт – dacitic tuff, Др – diorite, Р-Д – rhyolite-dacite, Р – rhyolite, Пр – rhyolitic tuff, Пер – glass, Иг – ignimbrite, (из) – altered. Concentrations of major elements were measured at Analytical Center of FEGI FEB RAS by the atomic emission spectrometry method with inductively coupled plasma on iCAP 6500Duo spectrometer (Thermo Scientific Corporation, USA). Trace and rare-earth elements was analyzed on Agilent 7700 mass spectrometer (Agilent Technologies, USA).

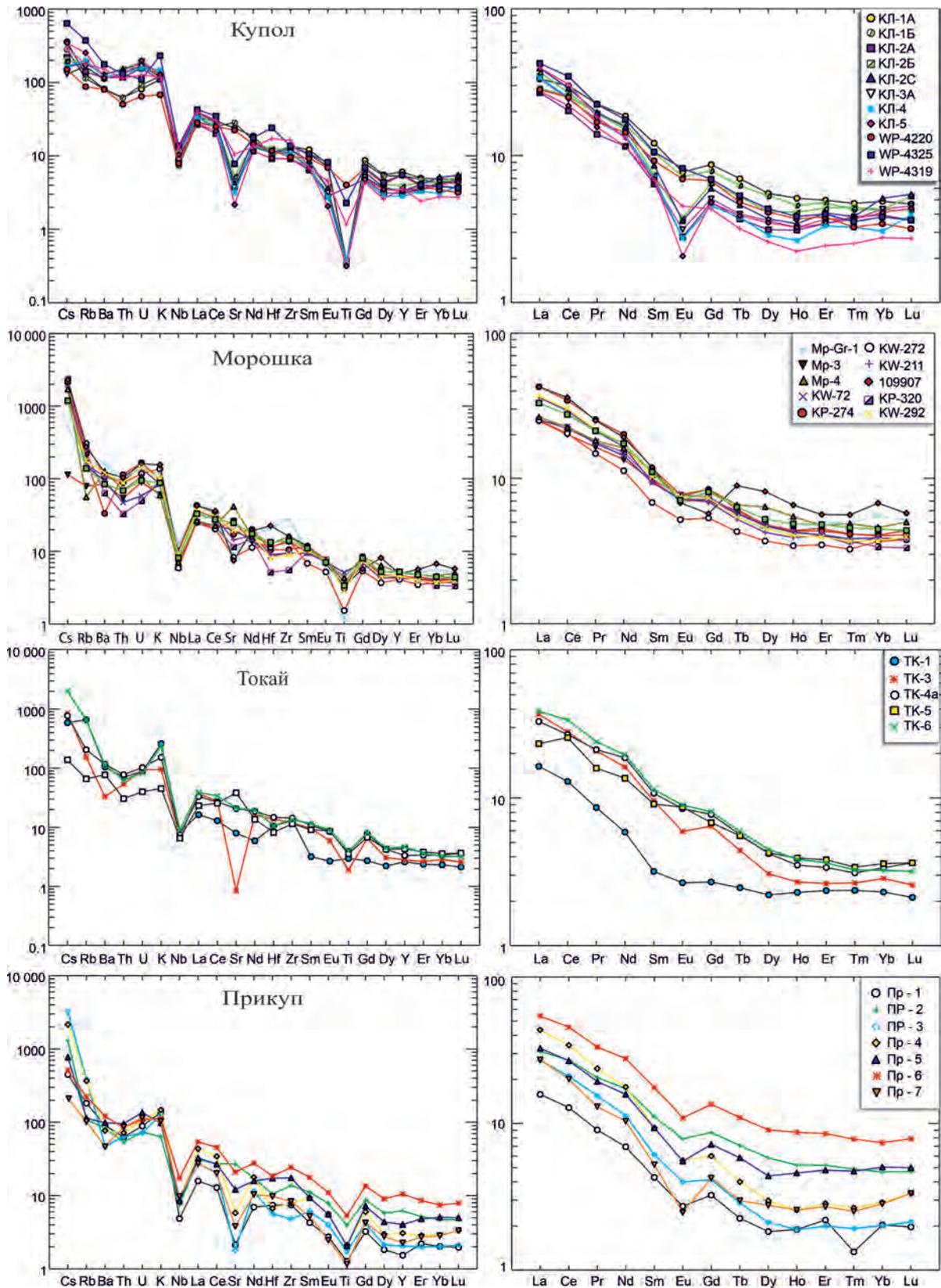
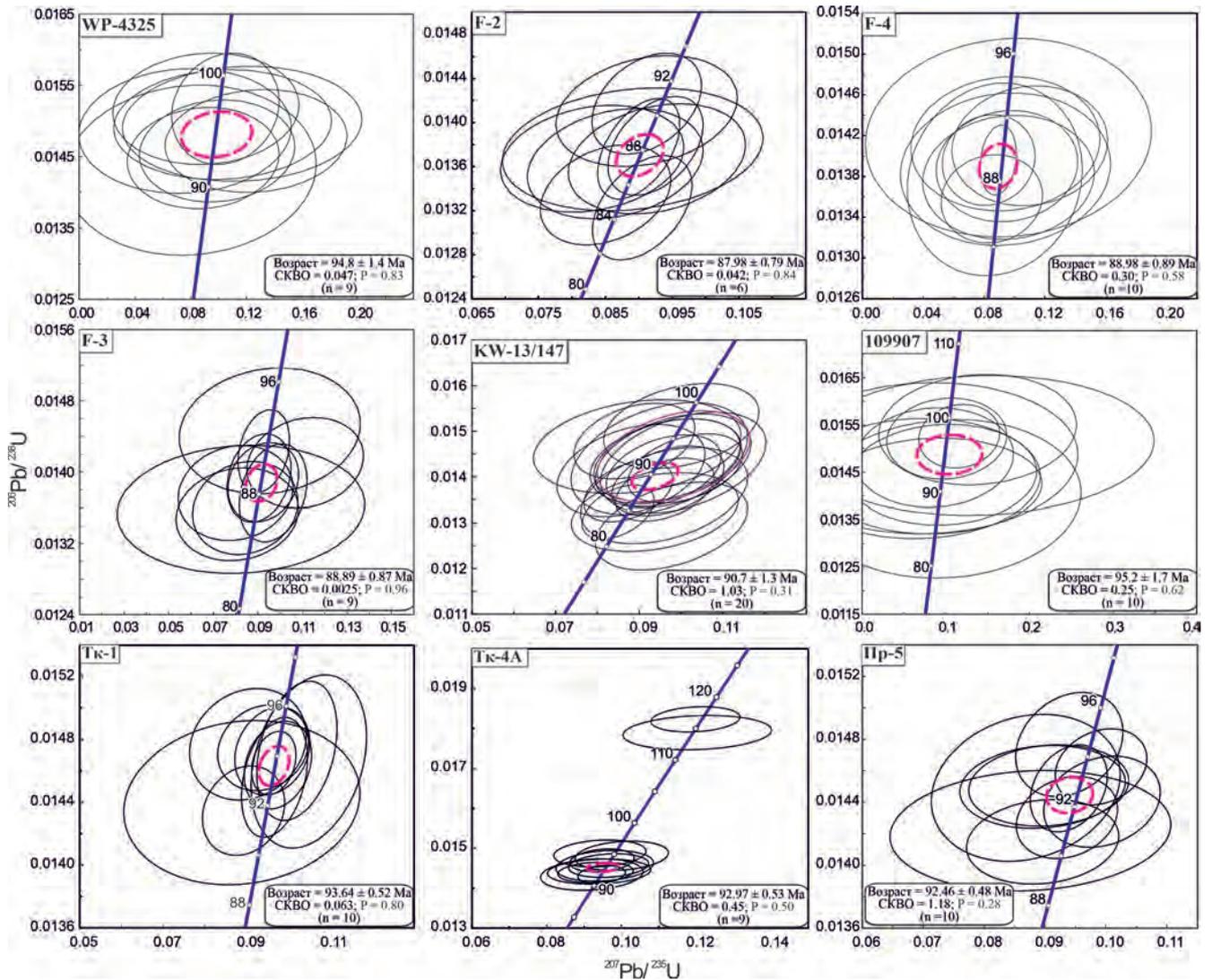


Рис. 4. Мультикомпонентные диаграммы (спайдер-диаграммы) микро-редкоземельных и элементов, магматических пород Купольского рудного узла, нормированных по примитивной мантии (по данным табл. 1).

Fig. 4. Primitive mantle-normalized trace element diagrams for igneous rocks of the Kupol ore field (by Table 1).



**Рис. 5.** SHRIMP датирования из цирконов представительных магматических пород рудных месторождений.

Купол – покровный туф WP-4325; пострудные риолитовые дайки – F-2, F-3, F-4; покровные дациты месторождения Морощка – 109907, KW-13/147; вулканический комплекс Токай – ТК-1, ТК-4; магматический комплекс Прикуп – Пр-5. Диаграммы для всех совокупностей анализов по цирконам: размер эллипсов соответствует величине  $2\sigma$ . Средневзвешенные результаты показаны утолщенными эллипсами. Определение возраста пород проводилось в ЦИИ ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) и ДВГИ (г. Владивосток).

**Fig. 5.** SGRIMP zircon U-Pb concordia diagrams for igneous rocks.

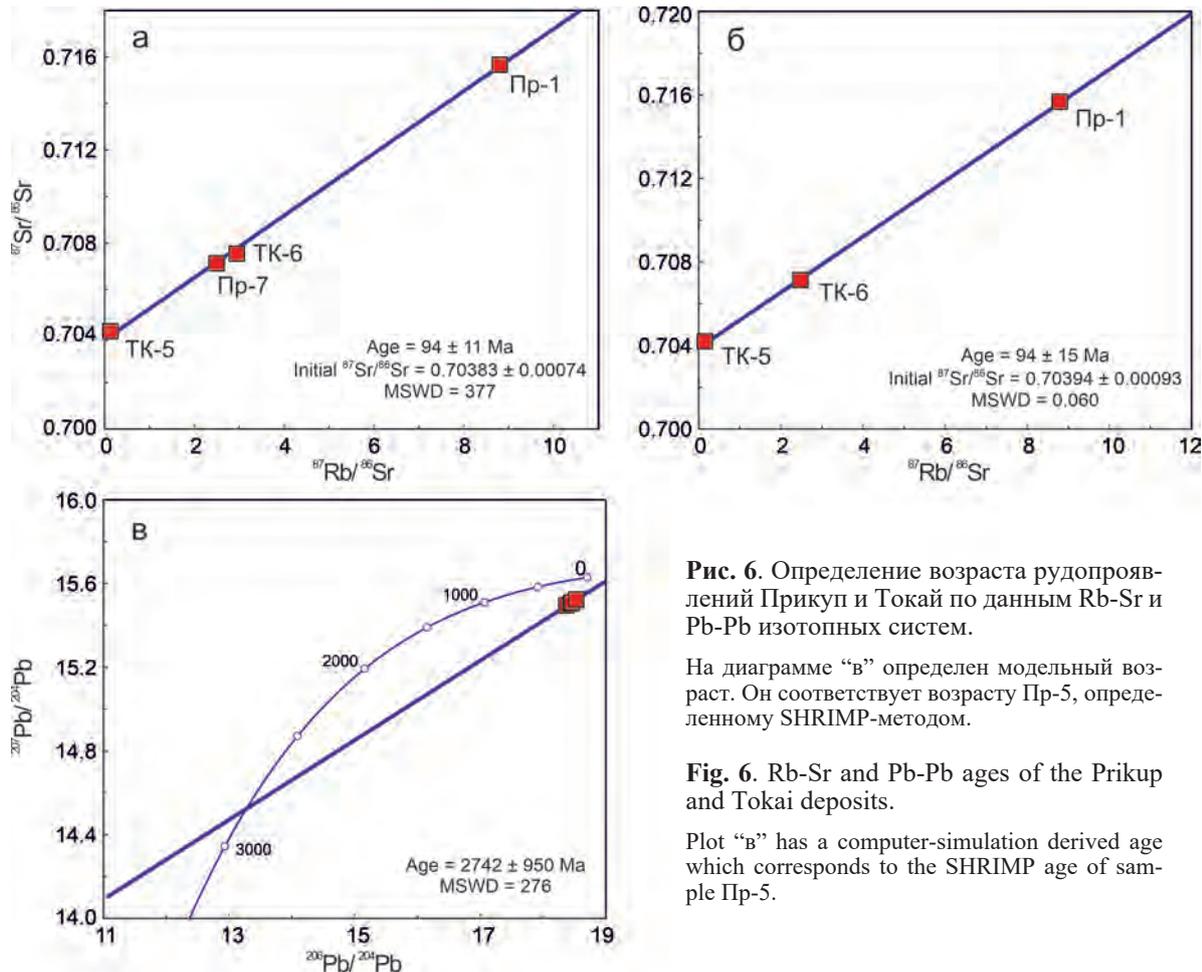
The Kupol deposit – covering tuff WP-4325, postmineral rhyolitic dykes – F-2, F-3, F-4; and the Moroshka deposit – covering dacites 109907, KW-13/147; volcanic complex Tokai – TK-1, TK-2; magmatic complex Prikup – Pr-5. Weighted mean results are presented by a thicker ellipse. Age determination was carried out at the Center for Isotope Investigations of A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (St-Petersburg) and Far East Geological Institute FEB RAS (Vladivostok).

спективные на Au-Ag оруденение (Волков и др., 2012; Николаев и др., 2013).

**Илирнейский рудный узел** располагается к северо-западу от Купольского, в пределах восточной окраины тыгильвеевской впадины, наложенной на мезозиды Верхояно-Чукотской складчатой области. Для нее характерно северо-западное простирание структур, что указывает на формирование области после закрытия Южно-Анхойского

океана. К востоку от Верхояно-Чукотской области и наложенных впадин (Мангазейской, Тыгильвеевской, Раучуанской и др.) располагается Охотско-Чукотский вулканогенный пояс северо-восточного простирания, поперечный к структурам складчатого основания и перекрывающий наложенные впадины аптского возраста (см. рис. 1).

Формирование пояса связано с более поздним этапом – альб-кампанским (Белый, 1977, 1978; Со-



**Рис. 6.** Определение возраста рудопроявлений Прикуп и Токай по данным Rb-Sr и Pb-Pb изотопных систем.

На диаграмме “в” определен модельный возраст. Он соответствует возрасту Пр-5, определенному SHRIMP-методом.

**Fig. 6.** Rb-Sr and Pb-Pb ages of the Prikup and Tokai deposits.

Plot “в” has a computer-simulation derived age which corresponds to the SHRIMP age of sample Пр-5.

**Таблица 2.** Возраст рудопроявлений Прикуп и Токай по данным Rb-Sr и Pb-Pb изотопных систем

**Table 2.** Isotopic Rb-Sr and Pb-Pb ages for the Prikup and Tokai deposits

Порода	m, г	Rb, г/т	Sr, г/т	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	2 $\sigma$ , %	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2 $\sigma$ , %	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 $\sigma$ , абс.	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 $\sigma$ , абс.	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	2 $\sigma$ , абс.
ПР-1	0.11206	148	48.8	8.79739	0.522	0.715682	0.0013	18.3715	0.0002	15.4949	0.0002	38.0815	0.0004
ПР-7	0.10911	95.2	93.5	2.94490	0.451	0.707518	0.0019	18.4392	0.0003	15.5046	0.0003	38.1960	0.0010
ТК-5	0.12189	32.8	687	0.13822	0.416	0.704196	0.0010	18.4696	0.0003	15.5086	0.0004	38.2174	0.0012
ТК-6	0.11227	320	373	2.48382	0.778	0.707127	0.0005	18.5319	0.0005	15.5252	0.0005	38.3044	0.0018

колов и др., 2015; Тихомиров и др., 2017; и др.). Отмечено, что угловые несогласия между комплексами ОЧВП и структурами основания выражены слабо. Это позволило В.Ф. Белому (1977) выделить породы впадин в качестве предвулканогенной молассы. Вулканогенные образования, подстилающие вулканиты ОЧВП, особенно среднего состава (нуте-сынская свита и др.), а также тытыльвеевскую свиту, выделяют в “Тытыльвеевский пояс”, петрохимический тип которого близок к вулканитам ОЧВП, что позволило рассматривать их в составе нижнего звена ОЧВП (Белый, 1978). Но, как будет показано ниже, на основании определения возраста методами цирконометрии (SHRIMP) вулканиты Ты-

тыльвеевской свиты следует считать более древними, чем вулканиты ОЧВП. Более того, в восточной части Тытыльвеевской впадины отмечается налегание вулканитов ОЧВП на вулканиты Тытыльвеевской свиты и их интрузивные комплексы. Эти, а также многие другие петро- и геохимические данные и определения возрастов позволили выделить на этой территории самостоятельный рудный узел – Илirianский – с золото-серебряным оруденением, где известны месторождения Сентябрьское-СВ, Двойное и др. (Особенности..., 2008).

**Рудопроявление Сентябрьское-СВ** расположено в восточной части рудного поля Сентябрьское в пределах Илirianского рудного узла.

Таблица 3. Петрохимические (мас. %), микро- и редкоземельные элементы (г/т) магматических пород рудопроявления Сентябрьское  
Table 3. Concentrations of major (wt %), trace, and rare-earth elements (ppm) in igneous rocks of the deposit Sentyabrskoe

Компонент	СТ-1	СТ-2	СТ-3	СТ-4	СТ-5/1	СТ-5/2	СТ-6	СТ-10	СТ-11/1	СТ-11/2	СТ-12	СТ-13	СТ-14	СТ-15/1	СТ-15/2	504017	504018	504019	504020
	Ан	Рт	Р	Ан	Р	Д(из)	Рт	Рт	Рт	Рт	Рт	Ан	Рт	Рт	Рт	Д	Ан	Д	Р
SiO <sub>2</sub>	60.48	76.17	76.41	61.38	74.34	67.10	76.80	78.81	77.33	65.70	81.42	55.18	57.58	76.48	74.81	50.57	60.69	63.09	75.80
TiO <sub>2</sub>	0.60	0.07	0.20	0.61	0.21	0.56	0.18	0.07	0.07	0.45	0.06	1.00	0.70	0.14	0.18	0.88	0.64	0.50	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.28	10.33	13.85	16.22	13.98	12.60	13.28	10.95	10.98	13.04	10.12	16.74	15.23	11.79	12.87	16.67	14.67	14.05	11.93
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.77	1.24	0.86	5.64	0.91	2.76	1.25	1.07	1.65	4.67	0.81	8.06	5.95	1.66	1.69	8.21	6.53	4.64	2.39
MnO	0.07	0.06	0.03	0.07	0.01	0.16	0.03	0.02	0.05	0.06	0.01	0.12	0.09	0.02	0.01	0.16	0.10	0.07	0.03
MgO	0.79	0.66	0.01	0.89	0.02	0.42	0.02	0.41	0.26	1.91	0.05	4.18	6.44	0.26	0.18	4.21	2.53	1.54	0.14
CaO	2.84	2.78	0.02	2.53	0.02	4.87	0.08	0.75	1.31	3.28	0.03	6.26	5.93	0.61	0.40	7.15	2.42	3.69	0.85
Na <sub>2</sub> O	2.99	1.09	7.99	2.91	5.11	3.49	7.42	1.96	1.59	1.82	2.04	3.15	3.58	2.53	3.50	4.54	2.80	2.15	3.61
K <sub>2</sub> O	6.08	3.54	0.06	5.72	4.38	2.08	0.15	3.65	4.21	2.48	4.26	2.42	1.90	4.79	5.07	1.14	2.75	3.75	3.85
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.17	0.01	0.02	0.16	0.02	0.06	0.02	0.01	0.01	0.21	0.01	0.28	0.22	0.03	0.02	0.47	0.23	0.22	0.02
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.50	0.46	0.12	0.48	0.20	0.66	0.14	0.33	0.35	0.59	0.33	0.34	0.29	0.39	0.24	0.30	0.91	0.69	0.12
П.п.п.	3.33	3.12	0.54	3.35	0.68	5.09	0.25	1.49	1.83	5.43	0.63	1.93	1.76	0.87	0.63	5.28	5.49	5.21	0.71
Σ	99.89	99.53	100.1	99.95	99.88	99.86	99.62	99.53	99.63	99.65	99.78	99.65	99.67	99.58	99.60	99.57	99.76	99.60	99.54
Sc	16.53	3.785	4.798	15.21	5.494	12.92	6.759	4.396	3.972	12.01	3.56	24.56	18	6.213	3.993	22.63	14.37	13.17	2.34
V	39.34	21.64	1.856	42.25	5.112	34.73	10.13	12.64	10.15	77.86	6.729	178.4	119.8	22.65	16.64	197.7	115.6	107.3	32.88
Cr	52.05	136.5	21.69	72.95	111.8	38.92	235.3	176.9	231.1	260.6	147.0	113.2	397.7	213.4	238.2	113.7	166.2	325.6	797.5
Co	2.542	1.79	0.244	1.311	0.616	1.722	0.882	1.038	1.372	9.531	0.721	12.99	23.91	2.646	2.115	23.57	13.64	14.25	3.95
Ni	3.094	5.465	2.338	3.802	3.812	3.742	6.529	5.35	5.867	19.51	4.307	9.06	122	8.5	6.725	34.79	11.14	22.84	19.66
Cu	38.14	14.9	18.81	27.05	17.65	23.21	18.42	21.84	20.87	40.48	38.24	71.34	35.26	24.31	16.64	73.47	30.39	21.62	25.67
Zn	82.4	16.8	32.5	81.7	22.6	56.9	19.1	35.1	27.1	76.3	16.6	73.1	70.3	25	16.9	81.94	82.89	50.93	24.63
Rb	182.2	100.7	1.611	154.2	96.53	67.16	6.44	126.6	116.8	79.33	92.82	57.93	54.97	167.4	105.5	33.40	127.5	131.9	111.1
Sr	271.2	165.2	162.4	240.9	177.4	241	326	85.23	68.66	173.8	44.36	568.6	545.2	60.99	55.29	476.2	296.0	286.3	83.86
Y	18.51	9.699	29.35	16.96	37.91	25.08	36.64	9.615	9.697	10.38	6.634	25.48	15.08	11.04	7.299	21.93	18.69	12.43	13.21
Zr	286	74.1	431.6	281.5	393.2	418	330.1	77.2	76.9	119.1	56.5	159.9	137.8	84.1	177.3	133.3	142.8	105.5	74.65
Nb	14.46	6.389	9.039	14.31	14.74	7.586	13.5	7.438	7.517	5.252	5.309	8.335	5.683	7.114	4.823	6.64	8.68	6.08	10.12
Mo	3.946	11.54	1.463	5.468	8.335	2.197	15.59	19.08	14.39	14.7	8.116	4.877	4.7	14.74	13.94	4.18	11.99	25.82	53.77
Cd	0.285	0.133	0.338	0.453	0.281	0.416	0.261	0.467	0.239	0.257	0.130	0.260	0.190	0.119	0.176	0.09	0.13	0.10	0.09
Cs	15.38	10.55	0.510	9.474	2.792	8.418	1.016	5.752	5.291	16.82	2.673	1.243	4.055	7.521	4.568	3.57	31.92	35.36	5.89
Ba	1696	594.4	16.15	1594	64.35	168.3	22.4	165.2	302.9	332.4	101.3	1056	1140	207.8	508.1	431.5	374.2	510.4	213.8
La	30.28	23.89	27.24	28.16	40.5	28.76	35.78	29.78	28.04	18.94	18.38	25.49	36.7	25.38	22.31	35.60	26.06	18.45	29.27
Ce	62.32	40.78	57.85	58.58	84.33	56.78	73.81	49.93	46	34.76	32.02	52.14	69.44	43.67	37.29	73.73	55.63	37.87	54.52
Pr	8.132	3.873	6.912	7.602	10.37	6.881	8.999	4.841	4.665	3.877	3.055	6.501	7.986	4.487	3.787	7.85	5.67	3.61	4.53
Nd	33.45	13.7	28.27	31.34	38.7	27.28	36.51	15.24	14.36	13.69	10.54	27.81	30.11	14.57	13.27	31.38	21.79	13.28	13.99
Sm	6.417	2.43	5.569	5.944	7.895	5.879	7.203	2.342	2.394	2.769	1.768	5.721	5.168	2.302	1.896	5.91	4.17	2.49	2.29
Eu	2.069	0.632	0.612	1.868	0.813	1.031	0.800	0.158	0.097	0.711	0.081	1.546	1.305	0.204	0.407	1.62	1.12	0.72	0.07
Gd	5.022	2.308	5.342	4.818	7.493	5.618	8.087	2.198	2.059	2.678	1.55	5.441	5.169	2.409	2.1	4.72	3.57	2.26	1.89
Tb	0.713	0.34	0.852	0.636	1.087	0.785	1.049	0.291	0.338	0.342	0.209	0.785	0.542	0.307	0.208	0.59	0.47	0.30	0.29
Dy	3.823	1.622	5.835	3.537	6.677	5.172	7.127	2.109	2.059	1.712	1.139	5.148	3.213	2.021	1.531	3.11	2.59	1.78	1.63
Ho	0.736	0.369	1.212	0.708	1.459	0.930	1.356	0.448	0.391	0.378	0.259	1.012	0.557	0.415	0.286	0.58	0.50	0.33	0.33

Таблица 3. Окончание  
Table 3. Ending

Компо- нент	СТ-1	СТ-2	СТ-3	СТ-4	СТ-5/1	СТ-5/2	СТ-6	СТ-10	СТ-11/1	СТ-11/2	СТ-12	СТ-13	СТ-14	СТ-15/1	СТ-15/2	504017	504018	504019	504020
	Ан	Рт	Р	Ан	Р	Д(из)	Рт	Рт	Рт	Рт	Рт	Ан	Рт	Рт	Рт	Д	Ан	Д	Р
Er	2.597	1.126	3.791	2.366	4.74	2.814	4.481	1.182	1.196	1.178	0.857	2.961	1.594	1.235	0.839	1.70	1.46	1.04	1.08
Tm	0.38	0.212	0.55	0.33	0.75	0.44	0.71	0.19	0.19	0.18	0.18	0.44	0.21	0.211	0.15	0.23	0.21	0.15	0.17
Yb	2.60	1.30	3.63	2.21	4.958	2.968	4.63	1.605	1.45	1.375	1.215	3.228	1.387	1.401	1.023	1.52	1.44	1.00	1.26
Lu	0.372	0.259	0.597	0.302	0.713	0.438	0.725	0.269	0.241	0.228	0.184	0.470	0.181	0.234	0.205	0.21	0.20	0.15	0.20
Hf	8.189	2.809	8.197	7.781	10.77	7.426	8.717	2.78	2.65	3.126	1.829	4.548	4.141	2.778	4.908	3.40	4.08	3.88	2.70
Ta	1.302	1.035	0.708	1.05	1.128	0.475	1.043	1.04	1.065	0.398	0.798	0.569	0.435	0.933	0.446	0.38	0.59	0.63	1.13
W	7.204	8.226	3.608	7.703	8.369	2.829	17.43	10.17	12.48	13.87	7.986	4.699	5.102	11.33	12.45	2.50	6.34	13.63	25.36
Pb	41.42	26.57	7.581	35.75	14.7	9.919	25.29	41.9	24.65	13.23	13.38	16.02	28.37	26.15	17.39	6.91	15.45	31.14	88.13
Th	34.69	32.85	19.59	32.32	26.23	13.38	22.53	35.12	32.14	11.25	21.96	6.334	13.65	27.24	19.28	6.95	14.35	13.62	30.81
U	14.78	8.01	5.44	13.2	8.622	3.475	6.068	10.94	7.141	4.129	5.098	1.62	5.264	8.408	3.462	1.80	4.01	5.15	11.87

Примечание. Обозначения – см. табл. 1.

Note. Designations – see Table. 1.

Геолого-разведочными работами, которые неоднократно проводились начиная с 1976 г., установлено, что рудное поле Сентябрьское представлено тремя рудными участками: Сентябрьское Центральное, Сентябрьское Южное и Сентябрьское Северо-Восточное. Последнее выделено в ходе поисково-оценочных работ, проведенных компанией “KINROSS” в 2010 г. Оно расположено в пределах развития эффузивов Тытыльвеевской свиты к северо-востоку от многофазного Илirianейского гранитоидного массива, в 16 км от месторождения Двойное (рис. 7).

Рудопроявление Сентябрьское-СВ располагается в восточной части Илirianейской вулканотектонической структуры и связано с проявлением более раннего этапа магматизма Центрально-Чукотской зоны (Савва и др., 2016). В его пределах развиты вулканытытыльвеевской свиты. Нижняя часть свиты представлена в большей степени андезитами, средняя сложена туфами риолитов, риолито-дацитов, лавобрекчиями этих пород, а верхняя часть – андезитами (лавами и лавобрекчиями). Весь комплекс прорывают экстрезивные тела андезитов. Дайковые тела прорываются оруденелыми эксплозивными брекчиями, агломератами, а также дайками риолитов и замещены кварц-полевошпат-хлоритовыми и хлорит-гидрослюдистыми породами, которые слагают тела, представляющие собой трубку взрыва с золото-кварц-полиметаллическим оруденением. Протяженность оруденения достигает 100 м при мощности до 40 м (см. рис. 7) (Савва и др., 2016). Бурением скважин оруденение прослежено до 250 м и более. Содержание золота колеблется в широких пределах: в сульфидных рудах – от 6 до 400 г/т при Au/Ag от 2:1 до 10:1.

Детальное описание геологии и условий образования золото-серебряного месторождения опубликовано в статьях Ю.Н. Николаева с соавторами (2013) и Н.Е. Савва с коллегами (2016). Нами проводились петролого-геохимические исследования вулканических пород рудопроявления Сентябрьское-СВ, определение возраста вулканитов и интрузивных аналогов, а также изотопные исследования (Rb-Sr, Sm-Nd, Pb-Pb и других систем) в целях установления происхождения рудоносных магм этой уникальной рудно-магматической системы (РМС) и влияния различных факторов на их генезис и процессы рудообразования.

Петрохимический и микроэлементный состав пород представлен в табл. 3. Как правило, почти все они в большей или меньшей степени изменены. Наибольшая степень изменения характерна для пород андезит-дацитово-риолитовой серии, вмещающей рудную ассоциацию, в меньшей степени – для риолитовой. Среди пород андезитовой и риолитовой серии встречаются различия с высоким содержанием  $K_2O$ , при этом наиболее высокие содержания

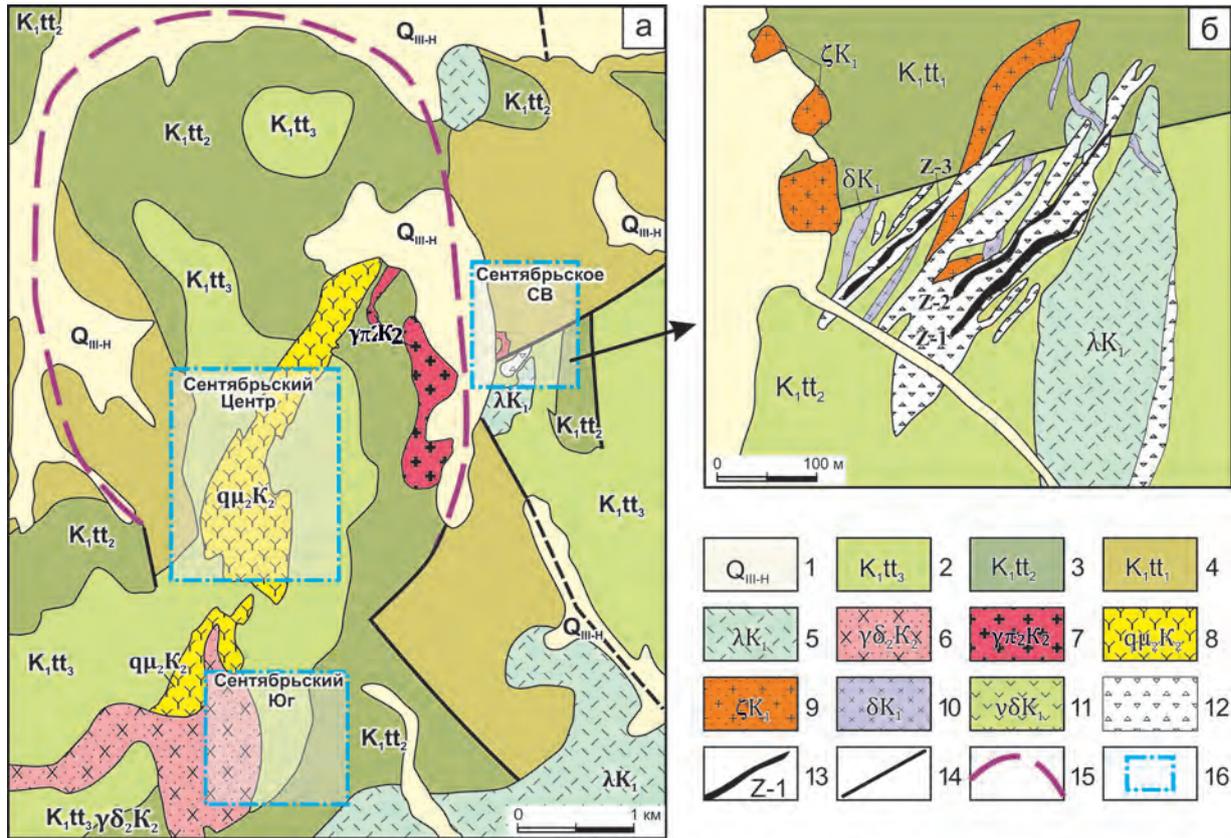


Рис. 7. Геологическое строение Сентябрьского рудного поля (Савва и др., 2016).

а – геологический план Сентябрьского рудного поля; б – геологический план месторождения Сентябрьское-СВ; 1 – объединенные ледниковые и аллювиальные отложения ( $Q_{III-H}$ : валунники, галечники, гравий, пески, глины); 2–4 – тытыльве-емская свита: 2 – андезиты, их туфы и кластолавы ( $K_1tt_3$ ), 3 – риолиты, риодациты, дациты, андезиты, их туфы, игнимбри-ты, туфоконгломераты, туфопесчаники, туфоаргиллиты ( $K_1tt_2$ ), 4 – андезиты, андезибазальты, грахиандезиты, их класто-лавы туфы, туфопесчаники, туфоаргиллиты, редко – туфоконгломераты ( $K_1tt_1$ ); 5 – субвулканические образования, риолиты ( $\lambda K_1$ ); 6 – гранодиориты и граниты ( $\gamma\delta_2K_2$ ); 7 – гранит-порфиры ( $\gamma_2K_2$ ); 8 – кварцевые монзониты ( $q\mu_2K_2$ ); 9 – риода-циты ( $K_1$ ); 10 – диориты ( $\delta K_1$ ); 11 – андезиты ( $\nu\delta K_1$ ); 12 – взрывные брекчии; 13 – обогащенные участки рудоносной брекчии; 14 – разломы разного порядка; 15 – граница купольной структуры; 16 – участки детальных поисковых и развед-очных работ.

Fig. 7. Geology of the Sentyabrskoe ore field (Savva i dr., 2016).

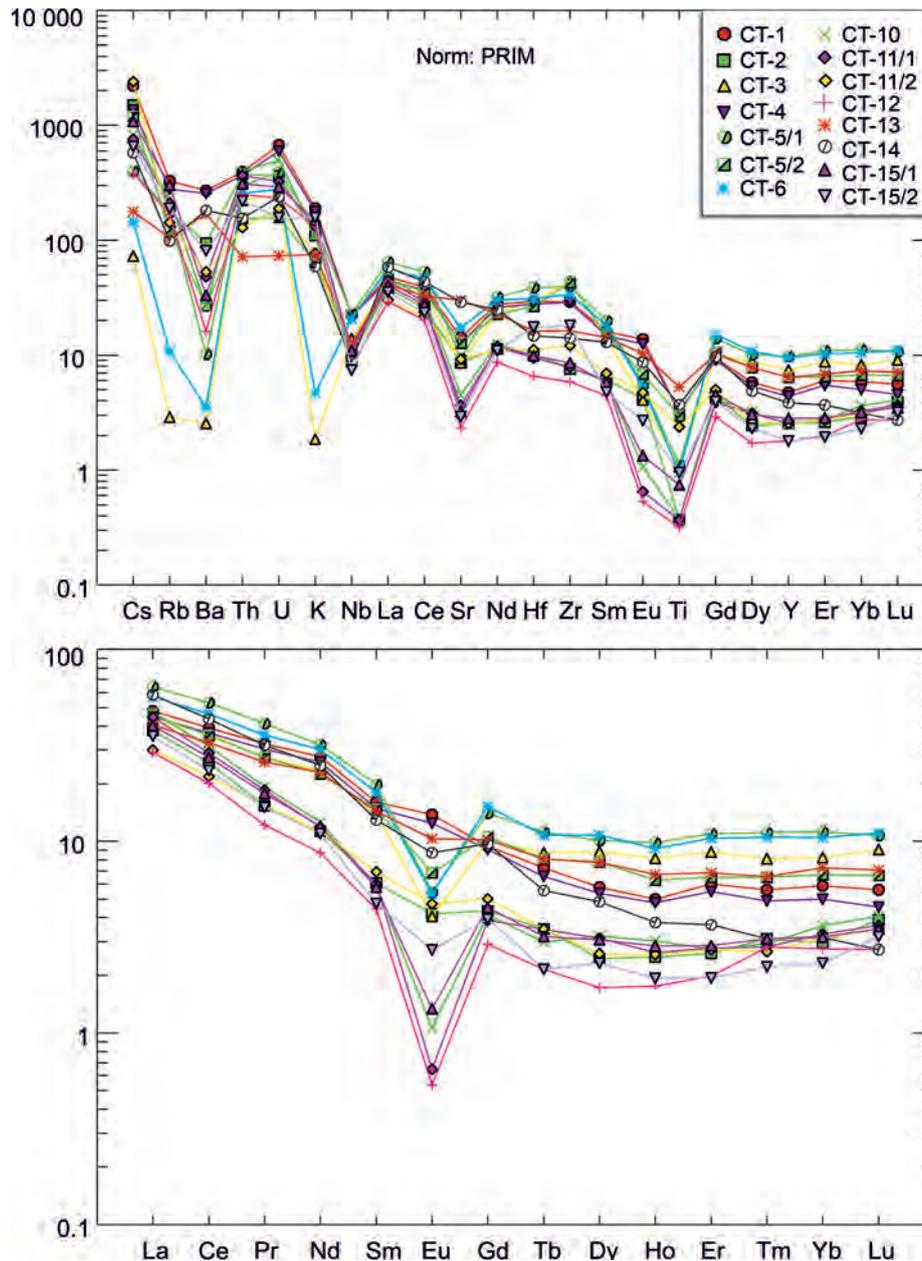
а – geological scheme of the Sentyabrskoe ore field; б – geological scheme of main ore zone Sentyabrskoe-SV; 1 – combined glacial and alluvial deposits ( $Q_{III-H}$ : boulder and pebble beds, gravel, sands, and clays); 2–4 – Tytylveemskaya Formation: 2 – ande- sites, their tuffs and clastic lavas ( $K_1tt_3$ ), 3 – rhyolites, rhyodacites, dacites, andesites and their tuffs, ignimbrites, tuff conglome- rates, tuffaceous sandstones, tuffaceous argillite ( $K_1tt_2$ ), 4 – andesites, andesite-basalt, trachyandesite and their clastic tuffs, tuffa- ceous sandstone, tuffaceous argillite, few tuffaceous conglomerates ( $K_1tt_1$ ); 5 – subvolcanic intrusions, rhyolites ( $\lambda K_1$ ); 6 – grano- diorites and granites ( $\gamma\delta_2K_2$ ); 7 – granite porphyry ( $\gamma_2K_2$ ); 8 – quartz monzonites ( $q\mu_2K_2$ ); 9 – rhyoda- cites ( $K_1$ ); 10 – diorites ( $\delta K_1$ ); 11 – andesites ( $\nu\delta K_1$ ); 12 – explosion breccias; 13 – highly mineralized zones of the ore-bearing breccia; 14 – different faults; 15 – dome boundary; 16 – prospecting areas.

характерны для пород андезито-дацитово- вой серии (нижняя толща). В то же время среди риолитов отмечаются высоконатровые разности (СТ-3, СТ-5/1, СТ-6). Это типично для плагioriолитов либо по- лосчатых риолитов.

У микро- и редкоземельных элементов также наблюдаются значительные колебания концен- траций. Высокие содержания бария типичны как для риолитов, так и андезитов. Можно предполагать, что это свойственно ранней стадии метасоматоза и

особенно породам, вмещающим рудные тела (Сав- ва и др., 2016). Степень вариаций содержаний ред- ких и редкоземельных элементов показана на мульт- икомпонентных диаграммах (рис. 8). Для вулка- нитов этого рудопроявления типичны метасомати- ческие преобразования пород, которые прослежи- ваются в виде линейных зон в кровле интрузивных и субинтрузивных тел (Николаев и др., 2013; и др.).

Возраст пород определялся U-Pb (SHRIMP) ме- тодом по цирконам (рис. 9). Необходимость дати-



**Рис. 8.** Мультикомпонентные диаграммы (спайдер-диаграммы) микро- и редкоземельных элементов, магматических пород Сентябрьского рудного поля, нормированных по примитивной мантии.

**Fig. 8.** Primordial mantle normalized trace and REE spider-diagrams for igneous rocks of the Sentyabr'skoe ore field.

рования оруденения и магматизма чрезвычайно важна для решения вопроса о их генетической связи, что в большей степени позволяет прогнозировать перспективность рудоносности структур подобного типа. Возраст оруденения рудопроявления Сентябрьское-СВ ( $89 \pm 3$  млн лет) определен по адуляру, отобранному из рудной зоны. Возрастная оценка магматических пород на рудопроявлениях Сентябрьское-СВ и частично Двойное проводилась по цирконам методами SHRIMP, а также ICP-MS. В результате установлены широкие

возрастные колебания в пределах одной пробы. Эти вариации вызывают определенный интерес к возможности установить причины такого разброса. Следует подчеркнуть, что породы, из которых извлекались цирконы, в большей или меньшей степени изменены. Это хорошо устанавливается как по химическому составу, так и по степени корродированности исследуемых цирконов. Среди них присутствуют как зерна с хорошей огранкой, так и кристаллы с корродированными гранями (см. рис. 9).

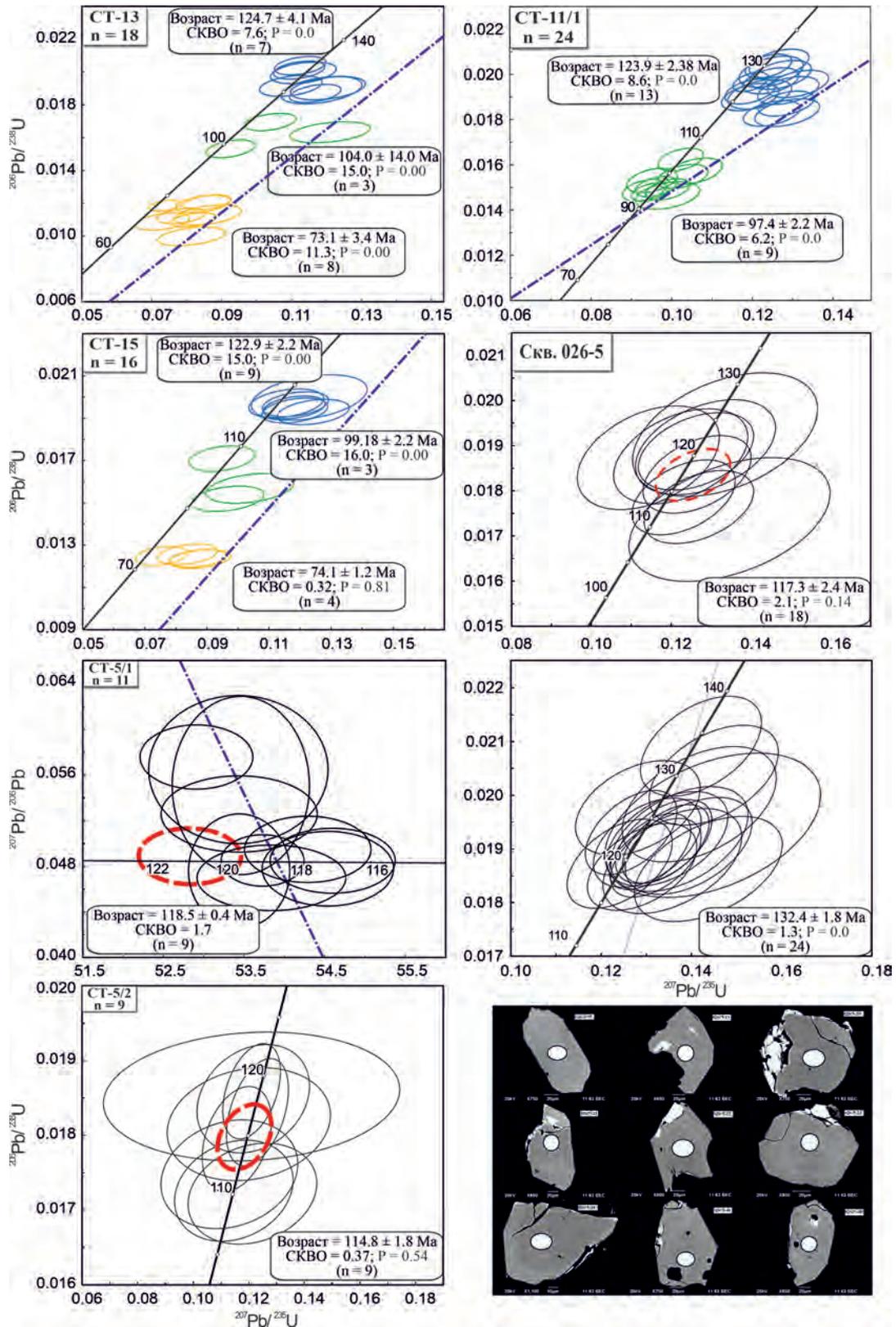


Рис. 9. Определение возраста по цирконам из рудопроявления Сентябрьское.

а–д – покровные образования; е – рудоносная дайка; ж – зерна цирконов. Диаграммы для всех совокупностей анализов по цирконам: размер эллипсов соответствует величине  $2\sigma$ . Средневзвешенные результаты показаны утолщенными эллипсами (Фор, 1989). Определение возраста пород проводилось в ЦИИ ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург) и ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) методом LA-MC-ICP-MS.

**Fig. 9.** The Concordia diagrams of U-Pb zircon dating results for samples from the Sentyabr'skoe deposit.

The average weighted results are shown as thickened ovals. Ages were determined in the Center for Isotope Investigations at VSEGEI (St.Petersburg) and at DV GI DVO RAN (Vladivostok) by LA-MC-ICP-MS method.

Установлены широкие колебания концентраций микроэлементов в цирконах, особенно по рудным образцам (см. рис. 8). Тем не менее возник вопрос, не могут ли наиболее “древние” цирконы отражать некоторые события в истории развития вулканоструктур Иллирийского узла в связи с недавним закрытием (150–140 млн лет назад) Южно-Анжуйского океана и динамической обстановкой этого региона (Лаверов и др., 2013). Но характер конкордий по цирконам показывает, что это не может соответствовать данным событиям, более того, наблюдается определенная тенденция, связанная с характером измененных пород, из которых извлекались цирконы. В Сентябрьской рудной структуре, которая, по данным исследователей, представляет собой взрывную воронку, рудный процесс сопровождался активной газотермальной и сольфатарной деятельностью (Савва и др., 2016; и др.). Нами было показано, что гидротермальные изменения, которым подверглись породы, влияют и на состав цирконов. Установлено, что в таких цирконах появляется слабая или отсутствует осцилляционная зональность, что связывается с воздействием газов и повышенной температурой. Более того, “гидротермальные цирконы” обогащены V, Ti, Hf, U, Y, а также Yb и другими РЗЭ относительно магматических. Для магматических цирконов характерно “плоское” распределение легких РЗЭ и ряд других признаков.

Как правило, текстурно эти цирконы пористые, в чем повинно, вероятно, кислотное выщелачивание и катионный обмен, а также ряд других факторов. Этот эффект был зафиксирован при исследовании на сканирующем микроскопе. Последнее позволяет утверждать, что гидротермальное изменение цирконов может быть связано с процессами инфильтрации флюидов. Особенно это свойственно золоторудным месторождениям. Для цирконов, подвергшихся такой “переработке”, характерны диаграммы с конкордией, представляющей собой “лестничный рисунок”, а на мультикомпонентной диаграмме РЗЭ разделены блоками по спектрам на слабо, средне и сильно измененные по составу (см. рис. 8).

Безусловно, один из главных вопросов – причина таких изменений, при этом не только для низкотемпературных, но и высокотемпературных элементов. Процесс был изучен на взрывных трубках кальдеры вулкана Кудрявый и на Милоградском месторождении (Приморье) (Коржинский и др., 1996; Сахно и др., 2014). Это свойственно структурам, где проявлена высокотемпературная сольфатарная деятельность либо субли-

мация вещества высокотемпературными газами при неравновесных газотранспортных условиях. Такие условия возникают при образовании кальдерных комплексов, приуроченных к глубинным разломам, уходящим глубоко в мантию, в пределах которых формируется поток восходящих углеводородных газов, содержащих рудные элементы, что подтверждается данными формирования рудной минерализации подобных структур (Коржинский и др., 1996; Дистлер и др., 2008).

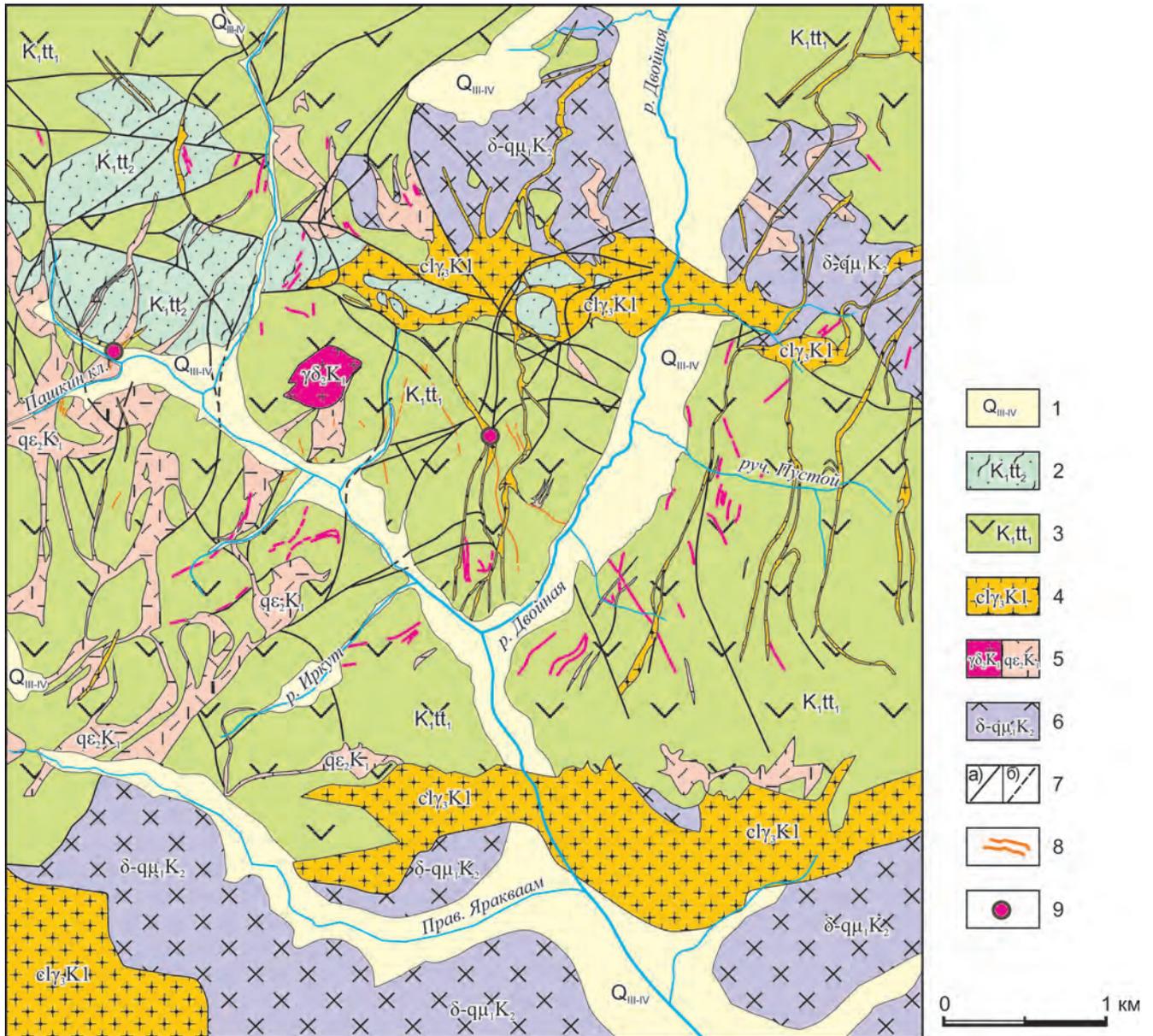
Альтернативный вариант, который мог бы объяснить такой разброс определений возраста, обычно связывают с ксеногенными цирконами, которые попадают в магму при ее контаминации коровыми породами. Это позволяет предполагать, что магматизм и наличие здесь трубок взрыва в зоне закрытия Южно-Анжуйского океана были связаны с зонами восходящих флюидных потоков. Возможно также предположение, что средой, в которой генерировались расплавы, была молодая океаническая кора (данные анализа Pb-Pb, Rb-Sr и Sm-Nd изотопных систем). Можно рассматривать и другой вариант с учетом активной геодинамической обстановки этого региона – поток глубинных флюидов, в том числе и рудоносных.

### Рудномагматическая система Двойное

Месторождение относится к золото-серебряному эпитептермальному типу. Оно расположено вблизи Сентябрьской РМС. Как полагают исследователи (Особенности..., 2008; Николаев и др., 2013), оно отвечает малосульфидному типу золото-серебряного оруденения и ассоциирует с кварц-адуляровыми прожилками в андезитах и туфах нижней подсвиты Тытыльвеевской свиты (рис. 10).

В пределах площади месторождения, которое в настоящее время разрабатывается, широко распространены андезитовые образования и более древние интрузии и субвулканические породы Иллирийского комплекса. Они проявлены в южной и северной частях месторождения. В пределах месторождения известны дайки андезитов, риолитов, которые прорывают как покровные образования тытыльвеевского комплекса, так и интрузивные массивы.

Петрохимический и микроэлементный состав магматических пород представлен в табл. 4, а также на мультикомпонентных диаграммах, где наблюдается определенное сходство соотношений микро- и редкоземельных элементов рудопроявлений Сентябрьское и Двойное. Существуют и различия, которые отражены на диаграммах (см. табл. 4, рис. 11). Наиболее показателен в этом отношении



**Рис. 10.** Схема геологического строения месторождения Двойное по данным (Особенности..., 2008).

1 – верхнечетвертичные аллювиальные и пролювиальные отложения ( $Q_{III-IV}$ ): пески, галечники, щебень, глыбы, суглинки; 2, 3 – тытыльвеевская свита: 2 – ( $K_1tt_2$ ) средняя подсвита, жерловая фация игниспумиты, игнимбриты кислого состава, 3 – ( $K_1tt_1$ ) нижняя подсвита: лавы, лавобрекчии, кластолавы, туфы, гуффиты, туфопесчаники, туфогреелиты среднего состава; 4–6 – раннемеловые интрузивные образования: 4 – ( $cl_3K_1$ ) третья фаза, субщелочные лейкограниты и лейкогранит-порфиры гидрослюдисто-хварцевые и каолинит кварцевые метасоматиты; кварцевые, кварц-карбонатные, кварц-адуляровые, кварц-хлоритовые жилы и прожилки, 5 – ( $\gamma\delta_2K_1$ ,  $qe_2K_1$ ) вторая фаза: гранодиориты, кварцевые сиениты, кварцевые сиенит-порфиры, кварц-кальцитовые жилы, 6 – ( $\delta-qm_1K_2$ ) первая фаза: кварцевые монзониты, диориты; 7 – границы разновозрастных подразделений: а – достоверные, б – скрытые под четвертичными отложениями; 8 – рудные жилы; 9 – месторождения.

**Fig. 10.** Geology of the Dvoynoye deposit from (Osobennosti..., 2008).

1 – upper Cretaceous alluvial and proluvial deposits ( $Q_{III-IV}$ ): sands, pebbles, rock debris, boulders, and loams; 2, 3 – Tytylveemskaya Formation: 2 – ( $K_1tt_2$ ) Middle subformation comprising ignispumites and silicic ignimbrites of volcanic neck facies, 3 – ( $K_1tt_1$ ) Lower subformation comprising lava, lava-breccia, tuff, tuffaceous sandstones, mediosilicic tuffaceous argillites; 4–6 – Early Cretaceous intrusive formations: 4 – ( $cl_3K_1$ ) subalkaline leucogranites and leucogranite porphyries, hydromicaceous-quartz and kaolinite-quartz metasomatic rocks, quartz-adularia, and quartz-chlorite veins and veinlets of the third phase, 5 – ( $\gamma\delta_2K_1$ ,  $qe_2K_1$ ) granodiorites, quartz syenites, quartz syenite-porphyries, and quartz-calcite veins of the second phase, 6 – ( $\delta-qm_1K_2$ ) quartz monzonites, diorites; 7 – lines for age-diverse unite boundaries: a – exposed boundaries, б – hidden boundaries overlapped by Quaternary sediments; 8 – lodes; 9 – deposits.

**Таблица 4.** Петрохимические (мас. %), микро- и редкоземельные элементы (г/т) представительных магматических пород рудопроявления Двойного  
**Table 4.** Concentrations of major (wt %), trace, and rare-earth elements (ppm) in igneous rocks of the Dvoynoe deposit

Компо- нент	ДВ-1	ДВ-2	ДВ-5	ДВ-6	ДВ-7	ДВ-8	ДВ-9	ДВ-11/1	ДВ-12/1	ДВ-12/2	ДВ-12/4	ДВ-16-06/1	ДВ-16-06/2	ДВ-16-06/3	VO-16-0004	Zr-1-16-0004	18	504005	504006	504007	504008	504010	504021	504022	504025
	Ан	Ан	Гр	Р-Д	Рт	Р	Гр	Ан	Ан-Т	Дт	Дт	Ан	Ан	Гр	Ан-Д	Р	Гр	Гр-с	Гр-с	Р	Ан	Д	Гр	Д	Гр
SiO <sub>2</sub>	57.94	56.25	74.67	68.38	76.75	76.75	76.72	57.93	56.27	65.16	60.12	56.19	56.98	75.56	57.88	75.47	76.73	67.99	68.74	75.39	60.47	68.44	65.39	56.28	76.30
TiO <sub>2</sub>	0.77	0.80	0.20	0.47	0.07	0.07	0.06	0.69	0.81	0.66	0.73	0.89	0.73	0.11	0.79	0.13	0.09	0.43	0.37	0.10	0.66	0.45	0.69	1.09	0.13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.03	17.00	13.60	14.56	12.39	12.38	12.36	16.06	15.83	13.38	15.83	16.31	14.43	12.19	15.87	12.00	11.75	14.82	14.05	12.79	14.59	14.31	15.09	17.31	12.16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.99	8.77	1.53	3.50	1.26	1.24	1.20	7.03	8.16	6.37	6.76	9.24	6.75	1.47	8.41	1.58	1.28	3.26	3.24	1.32	6.59	2.83	4.89	7.67	1.70
MnO	0.14	0.17	0.04	0.08	0.04	0.04	0.03	0.17	0.16	0.18	0.13	0.18	0.12	0.06	0.13	0.04	0.02	0.08	0.09	0.04	0.09	0.02	0.03	0.13	0.03
MgO	3.33	4.62	0.25	0.77	0.09	0.13	0.10	3.22	3.39	2.65	2.68	3.35	4.15	0.15	3.59	0.33	0.08	0.68	0.55	0.17	3.13	0.56	1.86	4.07	0.23
CaO	4.44	3.34	0.76	2.62	0.59	0.45	0.19	4.66	3.96	2.94	2.34	2.96	5.89	0.66	6.78	0.83	0.37	1.42	1.76	0.66	0.89	0.52	2.58	7.18	0.55
Na <sub>2</sub> O	2.72	2.78	4.08	2.86	2.67	3.36	3.14	1.35	1.65	2.05	1.52	2.06	1.88	3.45	2.77	1.19	3.71	3.60	3.73	2.40	0.01	0.29	3.46	2.76	2.39
K <sub>2</sub> O	3.63	2.46	4.53	5.59	4.70	4.50	4.89	5.61	6.25	3.51	5.98	4.53	4.75	5.03	2.87	5.73	5.39	4.48	4.63	5.02	6.67	9.60	3.60	2.35	4.74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.22	0.26	0.06	0.09	0.01	0.02	0.02	0.19	0.21	0.18	0.22	0.32	0.22	0.01	0.20	0.03	0.02	0.13	0.10	0.01	0.18	0.09	0.22	0.30	0.04
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	0.47	0.49	0.22	0.11	0.51	0.45	0.45	0.38	0.59	0.44	0.81	0.58	0.39	0.22	0.18	0.59	0.25	0.31	0.24	0.31	0.64	0.32	0.20	0.29	0.33
П.п.п.	1.89	2.73	0.16	0.68	1.01	0.68	0.54	2.41	2.33	2.12	2.50	3.10	3.83	1.17	0.59	1.69	0.48	2.46	2.05	1.61	5.64	2.39	1.96	0.31	1.27
Σ	99.58	99.66	100.11	99.71	100.10	100.08	99.70	99.69	99.60	99.64	99.62	99.72	100.12	100.08	100.07	99.62	100.1	99.65	99.54	99.81	99.56	99.81	99.96	99.74	99.86
Sc	27.79	26.48	5.482	10.91	5.957	4.734	5.217	19.09	27.3	18.17	21.11	31.89	18.38	5.458	25.56	5.247	3.02	6.16	5.29	3.04	25.64	8.35	11.49	24.45	3.86
V	201.4	167.3	11.59	62.05	9.232	8.654	9.03	144.4	206.1	174.9	166.8	170.5	169.4	15.04	196.6	20.74	9.16	33.12	38.16	18.07	208.1	55.45	74.59	162.7	17.48
Cr	129.3	65.36	81.04	306.8	180.1	196.2	204.8	109.1	118.5	158.4	117.9	82.36	162.1	319.4	145.2	222.1	159.3	360.9	486.0	340.1	292.2	417.6	140.1	286.5	203.2
Co	18.75	19.55	1.295	5.714	0.932	1.261	0.942	13.62	18.79	13.23	14.3	24.44	16.23	1.689	18.73	2.249	1.20	4.03	4.69	2.13	19.27	5.98	7.75	14.46	1.72
Ni	9.618	9.617	3.79	15.4	5.825	6.166	5.326	10.04	11.47	10.03	12.65	23.64	33.26	8.855	12.93	11.27	4.76	9.63	11.48	8.51	28.91	13.07	5.15	8.50	8.44
Cu	59.27	40.31	14.54	31.62	13.19	12.84	13.88	27.2	52.01	27.16	68.25	134.2	43.35	18.37	47.45	13.44	2.54	7.19	17.13	4.20	51.70	27.42	20.19	12.14	3.62
Zn	80.8	100.6	46.2	45.4	25.5	27.8	21.8	90.1	88.8	101.1	100.5	243.8	66.9	38.8	82.7	31.6	26.30	63.11	61.88	12.48	55.59	31.78	28.41	83.96	26.81
Rb	107.9	80.2	125.1	173.5	143.3	146.2	149.9	148.5	178.6	96.34	172.8	118.3	103.5	129.3	69.39	205.1	178.9	165.5	143.3	190.6	477.3	405.5	134.6	74.12	184.3
Sr	378.5	430.8	61.43	224.1	30.33	37.83	36	269	327.2	243.8	229.9	309.5	146.2	54.3	375.5	47.36	17.71	118.3	120.8	47.10	76.35	90.14	386.4	470.0	32.92
Y	20.1	19.52	17.54	21.49	26.54	26.48	25.46	17.51	19.84	16.62	19.78	25.74	14.08	13.11	21.34	19.09	20.92	22.29	21.31	16.95	21.55	25.02	24.36	31.53	21.20
Zr	137.2	166.5	186.5	325.9	105.3	86.66	144.2	152.7	147.9	135.9	155.9	153.1	130.6	88.08	155.1	121	109.2	318.3	308.9	90.4	164.3	316.1	182.9	146.4	135.1
Nb	5.468	6.017	10.16	10.47	9.893	9.184	9.255	5.734	5.351	4.895	5.845	5.995	4.43	7.213	5.452	8.497	13.28	9.83	8.38	6.31	7.57	13.63	10.8	11.95	7.41
Mo	6.234	2.845	5.315	16.57	10.29	13.02	12.44	5.904	5.173	9.489	5.784	4.029	4.41	20.44	7.486	12.6	12.21	23.52	34.36	22.21	14.29	31.66	8.21	15.14	13.61
Cd	0.221	0.151	0.185	0.334	0.156	0.067	0.195	0.126	0.147	0.743	0.17	0.723	0.121	0.139	0.222	0.267	0.01	0.15	0.17	<п.о.	0.18	0.18	0.04	0.15	0.03
Cs	3.29	2.105	2.788	4.265	5.305	5.546	4.843	1.649	2.424	4.526	3.931	8.079	2.834	3.795	6.147	9.419	6.22	12.92	5.45	12.66	57.89	18.36	5.90	4.43	10.15
Ba	594.2	656.4	413.2	788.3	163.8	204.3	198	646	679.4	524.3	1022	772.5	383.6	277.9	612.2	431.8	143.2	683.6	694.9	274.1	255.0	637.3	1203	833.2	369.5
La	18.71	18.43	14.24	28.92	17.88	16.41	17.6	17.63	17.42	16.62	18.51	18.11	14.19	21.55	16.38	22.45	22.61	36.34	35.61	24.60	19.72	28.12	39.25	28.46	27.20
Ce	37.61	38.44	28.29	55.79	34.8	32.42	35.57	36.14	36.51	35.18	36.36	38.6	29.24	38.47	35.42	43.21	58.40	70.40	59.49	47.01	44.00	58.70	74.88	60.71	54.08
Pr	4.65	4.685	3.455	6.962	4.554	3.997	4.349	4.695	4.354	4.087	4.835	5.255	3.671	4.084	4.441	5.031	4.58	6.76	5.62	4.09	4.45	6.01	7.39	6.35	5.13
Nd	19.6	19.9	13.03	24.2	16.8	14.93	16.64	16.58	20.25	17.11	18.69	22.41	14.93	13.33	19.01	17.58	15.82	24.82	20.28	13.33	17.39	21.20	27.43	25.55	17.93
Sm	4.073	4.374	2.953	4.843	3.994	3.513	4.12	3.878	4.14	3.753	4.097	5.102	3.101	2.495	3.986	4.076	2.96	4.49	3.77	2.51	3.52	4.15	5.19	5.26	3.37
Eu	1.004	1.099	0.403	0.8	0.166	0.145	0.162	1.07	1.128	0.886	0.925	1.368	0.764	0.225	1.003	0.32	0.10	0.95	0.75	0.17	0.71	0.59	1.18	1.49	0.25

Таблица 4. Окончание  
Table 4. Ending

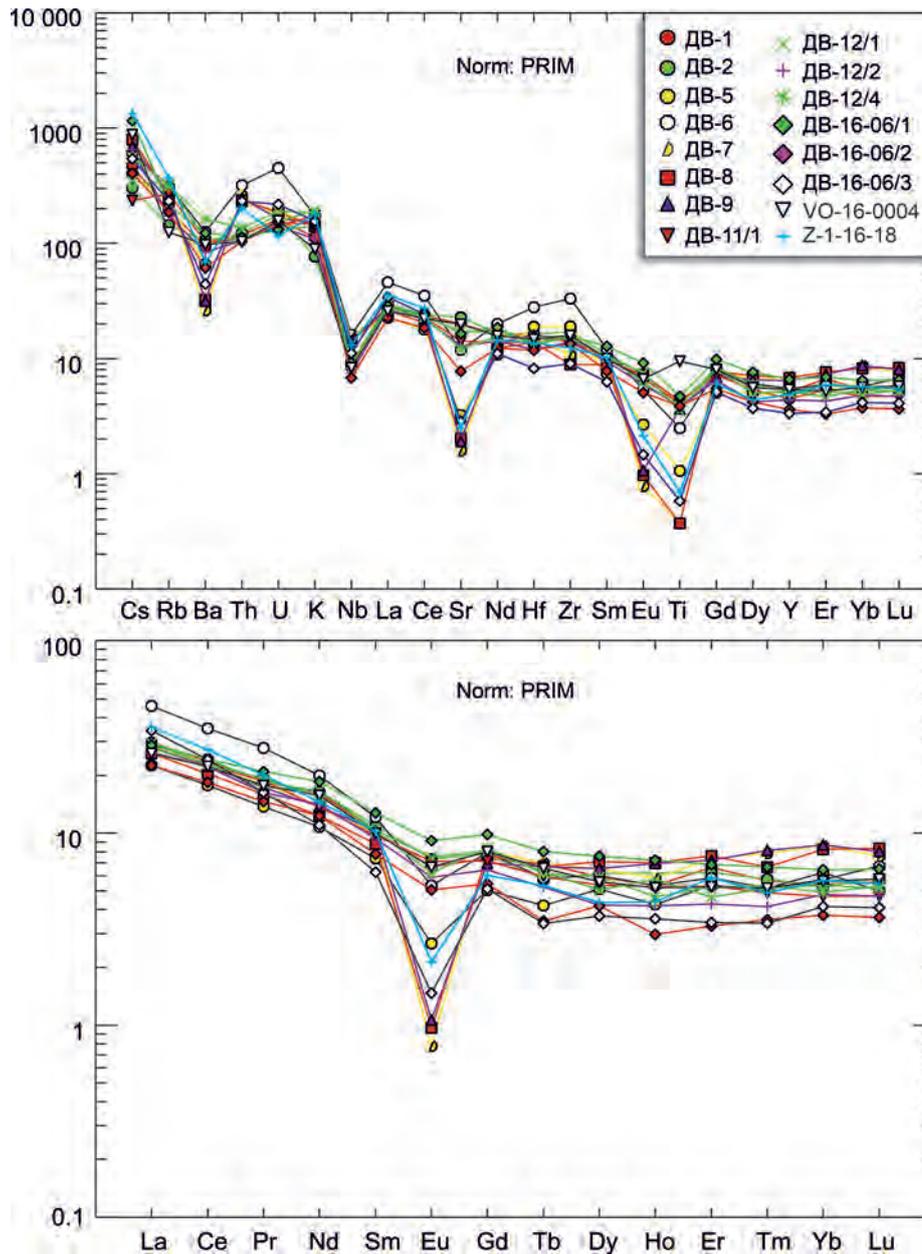
Компо- нент	ДВ-1	ДВ-2	ДВ-5	ДВ-6	ДВ-7	ДВ-8	ДВ-9	ДВ-11/1	ДВ-12/1	ДВ-12/2	ДВ-12/4	ДВ-16-06/1	ДВ-16-06/2	ДВ-16-06/3	VO-16-0004	Z-1-16-18	503954	504005	504006	504007	504008	504010	504021	504022	504025
	Ан	Ан	Гр	Р-Д	Рт	Р	Гр	Ан	Ан-т	Дт	Дт	Ан	Ан	Гр	Ан-Д	Р	Гр	Гр-с	Р	Ан	Д	Гр	Д	Гр	
Gd	3.944	4.175	2.691	4.224	4.297	4.094	3.72	3.825	4.297	3.432	4.463	5.245	2.91	2.742	4.28	3.213	2.54	4.00	2.26	3.24	3.69	4.62	5.03	2.94	
Tb	0.675	0.555	0.412	0.567	0.68	0.647	0.652	0.579	0.609	0.51	0.6	0.782	0.343	0.336	0.635	0.522	0.39	0.55	0.33	0.46	0.54	0.61	0.74	0.43	
Dy	3.924	4.072	3.371	3.979	4.332	4.701	4.328	3.549	3.346	2.794	3.911	5.021	2.769	2.446	3.694	2.878	2.50	2.98	1.99	2.72	3.13	3.25	4.28	2.53	
Ho	0.786	0.842	0.627	0.787	0.859	1.044	1.033	0.785	0.849	0.618	0.693	1.072	0.441	0.53	0.768	0.653	0.53	0.58	0.42	0.56	0.64	0.64	0.84	0.55	
Er	2.869	2.686	2.318	2.519	3.181	3.29	3.128	2.289	2.011	1.854	2.267	2.97	1.421	1.479	2.271	2.535	1.76	1.84	1.38	1.74	2.03	1.82	2.54	1.81	
Tm	0.382	0.39	0.352	0.352	0.526	0.464	0.548	0.335	0.35	0.283	0.359	0.454	0.237	0.228	0.352	0.33	0.28	0.26	0.21	0.26	0.30	0.25	0.35	0.28	
Yb	2.386	2.316	2.761	2.53	3.808	3.637	3.828	2.074	2.372	2.119	2.17	2.854	1.654	1.829	2.491	2.508	1.97	1.80	1.52	1.66	2.03	1.58	2.27	2.02	
Lu	0.369	0.386	0.384	0.447	0.504	0.546	0.527	0.318	0.339	0.305	0.349	0.427	0.237	0.273	0.374	0.361	0.30	0.26	0.23	0.24	0.30	0.22	0.32	0.30	
Hf	4.329	4.561	5.283	7.817	4.136	3.865	4.476	3.899	3.933	3.356	4.211	3.637	3.291	2.301	4.129	3.801	2.18	8.63	3.74	4.97	10.80	5.37	4.86	4.85	
Ta	0.447	0.464	0.935	1.05	1.073	1.198	0.923	0.444	0.443	0.419	0.457	0.467	0.368	0.657	0.541	0.851	1.18	1.08	1.64	0.61	1.19	1.24	1.11	1.28	
W	7.123	4.281	5.01	15.66	8.693	10.15	10.8	6.801	5.569	8.793	6.286	5.712	4.291	16.4	6.721	10.38	6.22	13.76	11.28	7.37	15.16	8.34	8.21	6.97	
Pb	14.54	26.8	28.82	42.24	23.68	25.72	19.41	17.5	14.96	26.09	17.44	47.39	20.89	31.77	16.02	16.48	25.89	31.69	40.41	25.92	24.96	35.03	12.37	12.39	20.40
Th	10.36	10.71	19.22	28.06	22.92	20.87	21.67	9.524	9.494	9.263	11.96	9.9	9.172	20.43	9.124	17.78	26.40	19.19	21.26	14.95	29.66	14.32	5.99	18.17	
U	3.551	3.886	4.248	9.93	3.764	4.08	3.624	3.117	3.386	3.076	4.157	2.893	3.338	4.78	3.486	2.554	4.81	5.35	9.40	5.38	10.37	2.63	1.41	3.42	

такой элемент, как европий (европиевый и неодимовый минимумы), что характерно для комплекса дифференцированных щелочно-салических типов пород. Более того, для пород среднего состава типичны низкие концентрации ниобия, близкие к островодужному типу андезитов. Практически для пород всех ранних массивов гранитоидов средних и кислых (интрузивных и дайковых) свойственно преобладание калия над натрием, что определяет генетический тип всего комплекса, отнесенного к породам натрий-калиевого ряда с повышенным содержанием калия. Также для большинства пород отмечаются пониженные содержания церия (см. рис. 11). Для пород вулканических и интрузивных комплексов характерны несколько повышенные концентрации иттербия.

Определения возраста пород проводились на основе цирконометрии (SHRIMP-методом), а возраста оруденения – по адулярам из рудных зон К-Аг методом (рис. 12). Данные возрастов по цирконам в большинстве случаев совпадают, что позволяет определять магматические этапы. Ранний (121–115 млн лет) связан с проявлением гранитов, грано-сиенитов ранних фаз илирнейского интрузивного комплекса. Как было отмечено выше, они отличаются высокой щелочностью, особенно грано-сиениты. Ранние фазы илирнейского комплекса синхронны началу формирования древней кальдеры обрушения, а с более поздней фазой магматизма, главным образом дайковой (96–93 млн лет), связано оруденение. Эти породы (монцограно-диориты, андезитовые дайки) с монцитонитовой спецификой относятся к породам андезитового ряда. Возраст оруденения, определенный по адулярам, соответствует интервалу  $(88 \pm 3) - (87 \pm 3)$  млн лет. Это позволяет сделать вывод о том, что возраст оруденения и в Сентябрьской, и в Двойном РМС связан с одной эпохой. Аналогичные данные о возрасте магматизма и связанного с ним оруденения были получены для золото-серебряных РМС Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса, что позволяет предполагать трансрегиональный характер проявления этапа магматизма, с которым связано и проявление золото-серебряного оруденения. Следует подчеркнуть и главную петрогеохимическую особенность – монцитонитовый тип рудоносного магматизма этого региона.

#### ОСОБЕННОСТИ МИКРОЭЛЕМЕНТНОГО СОСТАВА МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД РМС РУДНЫХ УЗЛОВ

Сопоставляя магматизм двух рудных узлов, отметим некоторое сходство по петрогеохимическому составу интрузивных пород, а именно – их монцитонитовость. Более значимые различия характерны для пород кремнекислого состава, которые в определенной степени отражают условия генера-



**Рис. 11.** Мультикомпонентные диаграммы (спайдер-диаграммы) микро- и редкоземельных элементов, магматических пород месторождения Двойное, нормированных по примитивной мантии.

**Fig. 11.** Primordial mantle normalized trace and REE spider-diagrams for igneous rocks of the Dvoynoe deposit.

ции магм. Соотношения таких индикаторных элементов, как Nb/Ta, La/Yb, Ta/Yb–SiO<sub>2</sub>, Zr/Hf и др., позволяют решать многие вопросы генерации и условий взаимодействия глубинных магм с породами коры и судить о роли флюидной составляющей в рудообразовании (рис. 13).

Рассмотрение рудно-магматических систем Купольского (см. рис. 13а–в) и Илирнейского (см. рис. 13г, д) рудных узлов выявляет определенную специфику и в эволюции магматизма в РМС. Это отражается на диаграммах соотношений микроэле-

ментов. Так, для магматических пород Купольского рудного узла значения соотношений Nb/Ta–Zr/Hf располагаются в области ниже мантийной корреляции, что свойственно для РМС Купол и Морошка. Но для РМС Токайской и Прикуп значения этих отношений лежат выше этой линии, что позволяет предполагать несколько иной процесс взаимодействия основных магм с веществом коры. Эту особенность можно рассматривать и как процесс петрогенезиса, в котором участвовало вещество неистощенной мантии (Wilson, 2007).

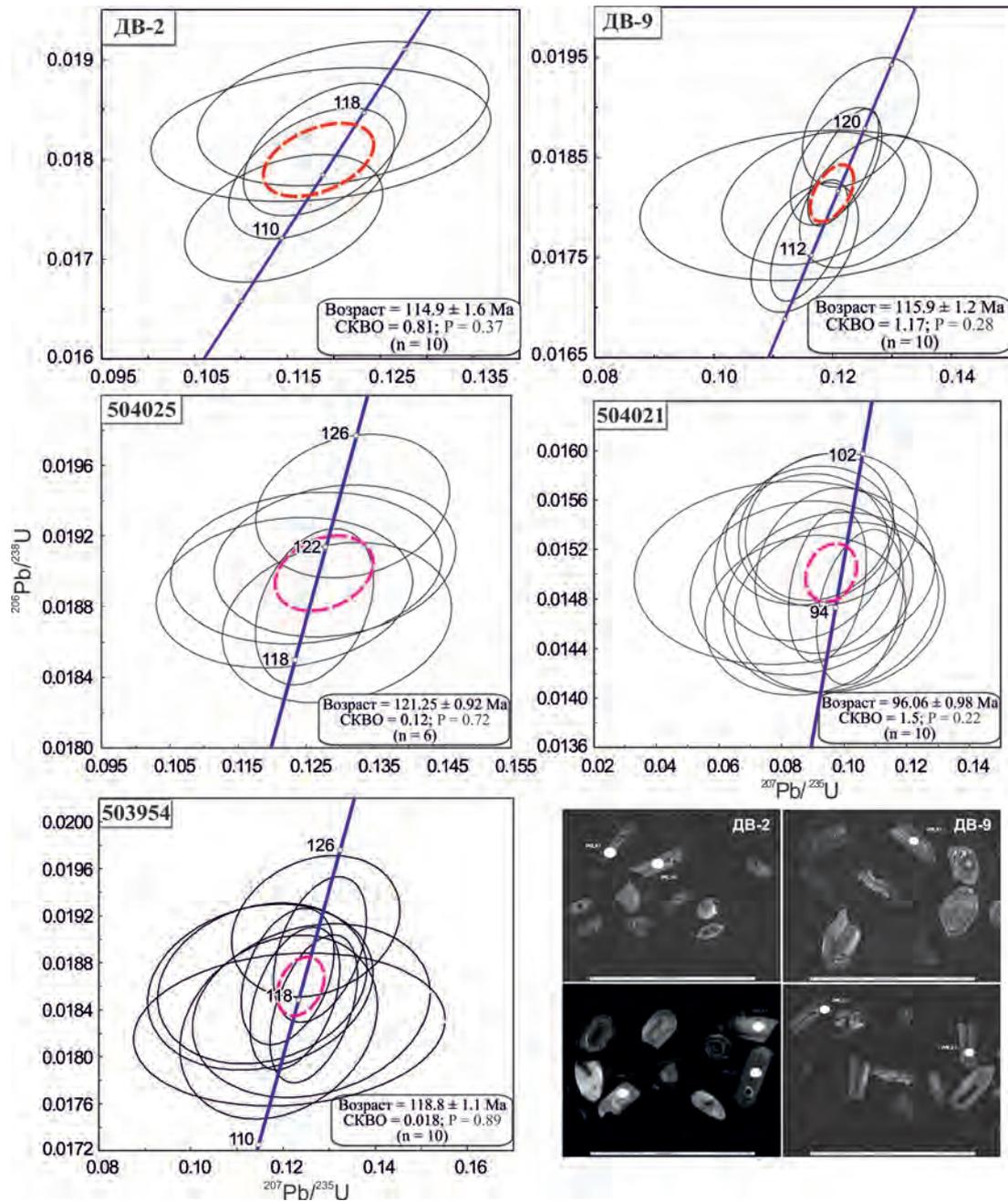


Рис. 12. SHRIMP датирования цирконов из рудного комплекса Двойное.

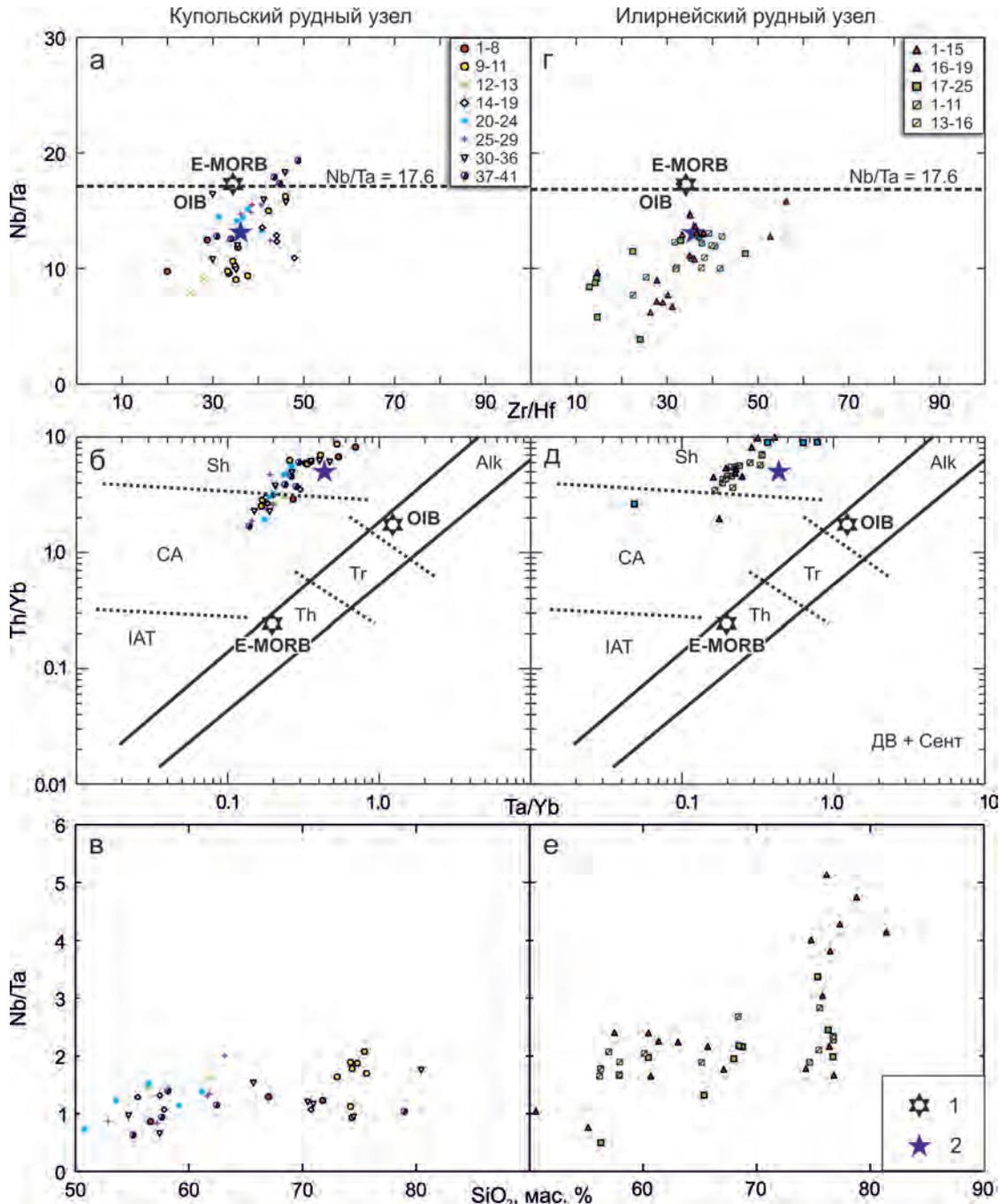
а–б – покровные образования кальдеры; в–д – древняя кальдера обрушения: ранняя фаза – 504025, граниты и сиениты Илirianейской фазы; 504021 – гранит молодой кальдеры, с которыми связано оруденение; е – зерна цирконов. Диаграммы для всех совокупностей анализов по цирконам: размер эллипсов соответствует величине  $2\sigma$ . Средневзвешенные результаты показаны утолщенными эллипсами [Фор, 1989]. Определение возраста пород проводилось в ЦИИ ВСЕГЕИ (Санкт-Петербург).

Fig. 12. The Concordia diagrams of U-Pb zircon dating results for samples from the Dvoynoe.

Ancient collapse caldera: early phase – 504025, granites and syenites of the Ilirianey group; 504021 – ore-bearing granites of young caldera. Ages were determined in the Center for Isotope Investigations at VSEGEI (St.Petersburg).

В Илirianейском рудном узле магматические образования представлены Тыгильвиемским вулканогенным комплексом, в пределах которого извест-

но рудопроявление Сентябрьское, а южнее, в районе месторождения Двойное, где проявлен крупнообъемный магматизм (граниты, грано-диориты,



**Рис. 13.** Геохимические диаграммы Zr/Hf–Nb/Ta, Th/Yb–Ta/Yb, SiO<sub>2</sub>–Nb/Ta для вулcano-интрузивных комплексов Купольского (а, б, в) и Илirнейского (г, д, е) рудных узлов Западной Чукотки (Pearce, 1982; Тихомиров и др., 2017; и др.).

Индексы полей: WPB – внутриплитные базальты, PMB – базальты прочих геохимических типов; N-MORB, E-MORB – внутриплитные толеиты, IAT – толеиты островных дуг, CA – известково-щелочные серии, Sh – шохонитовые серии, Th – толеиты срединно-океанических хребтов, Tr – субщелочные внутриплитные серии и переходные серии срединно-океанических хребтов, Alk – щелочные внутриплитные серии; 1 – средние составы E-MORB и OIB, 2 – средний состав верхней континентальной коры.

**Fig. 13.** Zr/Hf–Nb/Ta, Th/Yb–Ta/Yb, and SiO<sub>2</sub>–Nb/Ta diagrams for igneous complexes of the Kupol (a, б, в) and the Ilirney (г, д, е) ore clusters in Western Chukotka, after (Pearce, 1982; Tikhomirov et al., 2017; and others).

Abbreviations: E-MORB – enriched midocean-ridge basalt, OIB – ocean island basalt, IAT – island-arc tholeiite, CA – calk-alkali series, Sh – shoshonite series, Th – midoceanic-ridge tholeiite, Tr – subalkali within-plate and transitional midoceanic-ridge series, Alk – alkali within-plate series; 1 – average compositions of E-MORB and OIB, 2 – average composition of upper continental crust.

грано-сиениты и дайки диоритов и андезитов), область значений отношений Nb/Ta–Zr/Hf располагается ниже мантийной корреляции (см. рис. 13). Тем не менее вся совокупность магматических пород для Купольского и Илirianейского РМС, по данным петрогеохимического анализа, располагается в области переходных петрогеохимических типов от известково-щелочной к субщелочной шощонитовой серии. Следует подчеркнуть, что для РМС Купольского узла характерен более протяженный тренд. Но покровные вулканиты этих РМС полностью располагаются в области субщелочной серии, что отражено на диаграммах Th/Yb–Ta/Yb. Для магматитов Илirianейского узла отмечается та же особенность, но несколько укороченный тренд (см. рис. 13).

Анализируя эти данные, можно сделать выводы о том, что в петрогенезисе магматических пород участвовали породы неистощенной мантии, а вариации этих отношений, возможно, отражают неоднородность состава протолита (Wilson, 2007; Тихомиров и др., 2017; и др.). Как отмечалось выше, и в Илirianейском, и в Купольском рудных узлах среди магматитов преобладают кислые породы (гранитоиды, грано-диориты, лейкограниты, риолиты, андезито-дациты). На диаграмме Nb/Ta–SiO<sub>2</sub> отмечается разброс значений этих соотношений для РМС обоих рудных узлов. Но анализ диаграмм для РМС региона выявляет определенные различия, связанные со спецификой петрогенезиса пород двух регионов (см. рис. 13в, е). Если считать, что кислые разности рудоносных магматических комплексов этих регионов имеют характеристики вещества коры и глубинных протолитов, то, исходя из анализа изотопных данных (Сахно и др., 2016), более реальным является процесс смешения мантийных и коровых магм.

Для магматитов Илirianейского узла на диаграмме Nb/Ta–SiO<sub>2</sub> этот процесс подтверждается трендом зависимости между SiO<sub>2</sub> и отношением Nb/Ta и объемным накоплением кислых вулканитов в составе Тытыльвеевской свиты, а также объемным формированием интрузивов Илirianейского комплекса как производных смещения коровых магм с веществом глубинного источника. Это проявляется и в разбросе отношений на диаграмме Nb/Ta–SiO<sub>2</sub>. Выделяются две области: с низкой зависимостью этих отношений и кремнекислотностью пород (ниже 70% SiO<sub>2</sub>) как для РМС Двойного, так и Сентябрьского. Выше этого уровня по кремнекислотности зависимость резко возрастает с ростом значений Th/Nb, что, возможно, связано с высокой степенью дифференциации расплава и увеличения содержания тория при высокой доле в расплаве фторводородной флюидной фазы, что привело к эксплозивному взрыву и формированию трубки взрыва (Сентябрьское-СВ).

В породах РМС Купольского рудного узла (Купол, Морошка, Токай, Прикуп) соотношения Nb/Ta–SiO<sub>2</sub> практически не меняются от основных пород (андезито-базальты, андезиты) до риодацитов и риолитов как в дорудных, так и в пострудных магматических фазах. Эта тенденция, возможно, связана с относительной однородностью протолита или является следствием процесса фракционирования в кислых магмах, что отражается также в характере поведения REE (Тихомиров и др., 2017). Возможна и другая версия – влияние состава флюидных комплексов в расплаве. Это подтверждается присутствием в минералах и породах РМС Купол и других восстановительного флюида – метана (Сахно и др., 2014, 2016). Из геологических, петрогеохимических и других данных следует сделать вывод о том, что РМС Илirianейского и Купольского рудных узлов формировались при различных тектонических режимах и в различном временном интервале, в соответствии с возрастом главных фаз магматизма. Но если учесть, что в Илirianейском узле рудогенерирующие фазы магматизма определялись поздними внедрениями, а именно дайковыми, экструзивными телами и малообъемными интрузивами среднекислого состава, то на основе сравнения индикаторных отношений в этих двух рудных узлах выявляется некоторое сходство условий формирования рудных фаз. Можно предположить, что оно определялось близкими геодинамическими условиями в сравнительно узком временном интервале, связанным с режимом формирования трансформной окраины и проявлением трансрегионального магматизма – Восточно-Азиатским линеаментом по окраине Азиатского континента, протяженность которого более 8 тыс. км (Вулканические пояса..., 1984; Сахно, 2001).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Определение возраста магматических комплексов в Илirianейском и Купольском рудных узлах на основе цирконометрии (SHRIMP-метод) показало, что магматиты в пределах РМС имеют различный возраст: в Илirianейском рудном узле, где магматизм представлен более ранними вулканитами Тытыльвеевского комплекса (Сентябрьское) и крупнообъемными массивами гранитоидов (Двойное), он проявлен в пределах от 121 до 115 млн лет. Но оруденение в этих двух РМС сопряжено с более поздним этапом – внедрением даек монцо-гранодиоритов и андезитов с возрастным интервалом 93.5–95.0 млн лет. Возраст оруденения (по адуляру) из рудной зоны определен в интервале (89–85) ± 2 млн лет. РМС Купол и другие рудопроявления сопряжены с Мечкеревской вулкано-структурой, осложненной просядками (кальдерами) и представляющей собой палеовулкан сложного строения. Магмо- и рудо-

контролирующими структурами высокого порядка являются Средне-Кайемравеемский субмеридианальный разлом и ряд других разломов северо-западного направления.

Возраст как покровных, так и дайковых пород, определенный SHRIMP-методом по цирконам, составляет: в Купольском РМС – покровного туфа (кислого состава) –  $94.8 \pm 1.4$  млн лет, а верхних покровных андезитов из нижнего разреза –  $94.5 \pm 2$  и флюидалных дацитов –  $89.5 \pm 2$  млн лет. Возраст пострудных даек (среднее из трех определений) –  $88.89 \pm 0.87$  млн лет. Это позволяет предполагать, что возраст оруденения месторождения Купол отвечает интервалу 88–89 млн лет.

В Илirianейском рудном узле наибольшим распространением пользуются экструзивные магматиты и крупнообъемные гранитоидные массивы. Поздняя фаза связана с внедрением даек и экструзий (94–93 млн лет). Эти данные позволяют считать, что рудогенез в Илirianейском (Двойное, Сентябрьское) и Купольском (Купол, Морошка и др.) РМС связаны с магматизмом: в Илirianейском – с поздним завершающим этапом, а в Купольском – с активной фазой его проявления. Следовательно, магматизм и оруденение сопряжены во времени (поздний альб–сеноман?) и представляют собой единый эволюционный процесс во всех РМС этого региона. Результаты анализа микро- и редкоземельных элементов и их индикаторных отношений позволяют считать, что магматические породы этих РМС имеют смешанную мантийно-коровую природу источника расплавов и, соответственно, флюидов глубинного и корового происхождения.

Из анализа РМС Купольского и Илirianейского рудных узлов можно предположить, что рудообразование в этом регионе связано с единым этапом активизации глубинных процессов и мантийно-коровым взаимодействием с участием глубинных (мантийных) флюидов. Масштабность этого процесса и характер связанного с ним оруденения определялись длительностью его проявления. Как следует из публикаций (Николаев и др., 2013; Сахно и др., 2014, 2016; и др.), эти вопросы частично уже обсуждались ранее.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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.
- Бортников Н.С., Лобанов К.В., Галямов А.В., Лаломов А.В., Мурашо К.Ю., Викентьев И.В., Тарасов Н.Н., Дистлер В.В., Аристов В.В., Чижова И.А. (2014) Арктические ресурсы стратегических металлов в глобальной перспективе. *Изучение и освоение природных ресурсов Арктики*. М.: Наука, 40-48.
- Вартанян С.С., Лоренц Д.А., Сергиевский А.П., Щепотьев Ю.М. (2005) Золото-серебряные руды Кайемравеемского узла (Чукотский АО). *Отеч. геология*, (4), 10-16.
- 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.
- Волков А.В., Прокофьев В.Ю., Савва Н.Е., Сидоров А.А., Бянкин М.А., Уютнов К.В., Колова Е.Е. (2012) Рудообразование на Au-Ag эпитеpмальном месторождении Купол по данным изучения включений (Северо-Восток России). *Геол. рудн. месторождений*, **54**(4), 350-359.
- Вулканические пояса Востока Азии. Геология и металлогения. (1984) М.: Наука, 504 с.
- Геологическая карта России и прилегающих акваторий. М-6 1 : 250 000. (2012) (Гл. ред. О.В. Петров). Мин-во природных ресурсов и экологии РФ, ВСЕГЕИ.
- 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. (2012–2014) Отчет о результатах проведения разведочных работ на рудопроявлении Морошка. Магадан: KINROSS.
- Дистлер В.В., Диков Ю.П., Юдовская М.А., Чаплыгин И.В., Булеев М.И. (2008) Платино-хлор-фосфор-углеродородные 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 (о-в 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.
- 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. *Геол. рудн. месторождений*, **54**(2), 114-144.
- Особенности геологического строения золото-серебряного месторождения “Купол”. (2008) Магадан: KINROSS, 31 с.
- Прокофьев В.Ю., Волков А.В., Сидоров А.А., Савва Н.Е., Колова Е.Е., Уютнов К.В., Бянкин М.А. (2012) Геохимические особенности рудообразующего флюида Au-Ag-эпитеpмального месторождения Купол (Северо-Восток России). *Докл. АН*, **447**(4), 433-436.
- Савва Н.Е., Колова Е.Е., Фомина М.И., Курашко В.В., Волков А.В. (2016) Золото-полиметаллическое оруденение в эксплозивных брекчиях: минералого-гене-

- тические аспекты (м-е Сентябрьское СВ, Чукотка). *Вестник СВНЦ ДВО РАН*, (1), 16-36.
- Сахно В.Г. (2001) Позднемезозойско-кайнозойский континентальный вулканизм Востока Азии. Владивосток: Дальнаука, 338 с.
- Сахно В.Г., Баринов 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/gasprograms/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.
- 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.
- Соколов С.Д., Тучкова М.И., Бондаренко Г.Е. (2010) Тектоническая модель Южно-Ануйской сутуры и ее роль в формировании структур Восточной Арктики. *Строение и история развития литосферы*. М.: Paulsen, 204-227.
- Соколов С.Д., Тучкова М.И., Ганелин А.В., Бондаренко Г.Е., Лейер П. (2015) Тектоника Южно-Ануйской сутуры (Восток Азии). *Геотектоника*, (1), 5-30.
- Тихомиров П.Л., Прокофьев В.Ю., Калько И.А., Аплеталин 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. Пер. с англ. М.: Мир, 291 с.
- 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.
- Pearce J.A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Ed. R. Thorpe. Wiley, Chichester, 525-548.
- Wilson M. (2007) *Igneous Petrogenesis: a Global Tectonic Approach*. Springer, 466 p.
- prospects. *Izuchenie i osvoenie prirodnykh resursov Arktiki* [Study and assimilation of natural resources of the Arctic]. Moscow, Nauka Publ., 40-48. (In Russian)
- Distler V.V., Dikov Yu.P., Yudovskaya M.A., Chaplygin M.I. (2008) Platiunum-chlorine-phosphorus-hydrocarbon complexes in volcanic fluids – first finding in terrestrial environments. *Dokl. Akad. Nauk*, **420**(2), 217-220. (In Russian)
- For 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. *Vestnik 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 razvedochnykh rabot na rudoproyavlenii Moroshka* [Report on the results of exploration at the Moroshka ore manifestation]. Magadan, KINGROSS Publ., (In Russian)
- Korzhinskii 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)
- 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)
- Laverov N.P., Lobkovskii L.I., Kononov M.V., Dobretsov N.L., Vernikovskii B.A., Sokolov S.D., Shipilov E.V. (2013) Geodynamic model of the Arctic basin and adjacent territories for Mesozoic and Cenozoic and outer boundary of the continental shelf of Russia. *Geotektonika*, (1), 3-35. (In Russian)
- Nikolaev Yu.N., Prokof'ev V.Yu., Apletanin A.V., Vlasov E.A., Bakheev I.A., Kal'ko I.A., Komarova Ya.S. (2013) Gold-telluride mineralization of West Chukotka: mineralogy, geochemistry and formation conditions. *Geol. Rudn. Mestorozhdenii*, **54**(2), 114-144. (In Russian)
- Osobennosti geologicheskogo stroeniya zoloto-serebryanogo mestorozhdeniya "Kupol"* [Features of geological structure of the Kupol gold-silver deposit]. Magadan, KINROSS Publ., 2008, 31 p. (In Russian)
- Pearce J.A. (1982) Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. Ed. R. Thorpe. Wiley, Chichester, 525-548.
- Prokof'ev V.Yu., Volkov A.V., Sidorov A.A., Savva N.E., Kolova E.E., Uytunov K.V., Byankin M.A. (2012) Geochemical features of the ore-forming fluid in the Kupol gold-silver epithermal deposit (Northeastern Russia). *Dokl. Akad. Nauk*, **447**(4), 433-436. (In Russian)
- Sakhno V.G. (2001) *Pozdnemezozoisko-kainozoiskii kontinental'nyi vulkanizm Vostoka Azii* [Late Mesozoic-Cenozoic continental volcanism of East Asia]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 338 p. (In Russian)
- Sakhno V.G., Barinov N.N., Karas' O.A., Ivin V.V., Pippko M.S., Tsurikova L.S. (2014) Petrological and geo-

## REFERENCES

- 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)
- Bortnikov N.S., Lobanov K.V., Galyamov A.V., Lalomov A.V., Murashov K.Yu., Vikent'ev I.V., Tarasov N.N., Disler V.V., Aristov V.V., Chizhova I.A. (2014) The Arctic resources of strategic metals in global

- chemical 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)
- Savva N.E., Kolova E.E., Fomina 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. *Vestnik SVNTs DVO RAN*, (1), 16-36. (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)
- Sokolov S.D., Tuchkova M.I., Bondarenko G.E. (2010) Tectonic model of the South Anyui suture zone and its role in the formation of structural pattern of Eastern Arctic. *Stroyeniye i istoriya razvitiya litosfery* [Structure and evolution history of lithosphere]. Moscow, Paulsen Publ., 204-227. (In Russian)
- Sokolov S.D., Tuchkova M.I., Ganelin A.V., Bondarenko G.E., Leier P. (2015) Tectonics of the South Anyui suture zone (East Asia). *Geotectonika*, (1), 5-30. (In Russian)
- Tikhomirov P.L., Prokofiev V.Yu., Kalko I.A., Apletalin A.V., Nikolaev Yu.N., Kobayasi K., Nakamura E. (2017) Post-collisional magmatism of western Chukotka and Early Cretaceous tectonic rearrangement in northeastern Asia. *Geotectonika*, (2), 32-54. (In Russian)
- Vartanyan S.S., Lorents D.A., Sergeevskii A.P., Shepot'ev Yu.M. (2005) Au-Ag ores of the Kaiemraveem ore cluster, Chukchi Autonomous District. *Otech. geologiya*, (4), 10-16. (In Russian)
- Vernikovskii V.A., Metelkin D.V., Matushkin N.Yu., Travin A.V., Vernikovskaya A.E., Zhdanova A.I. (2013) Basement age and geodynamic models for main structures of the Eastern Arctic. *Geologicheskaya model' evolyutsii Arktiki v melu i kainozoe na osnove geologicheskikh dannykh* [Geological model of the Arctic evolution in Cretaceous and Cenozoic based on geological data]. Moscow, Nauka Publ., 45-54. (In Russian)
- Vulkanicheskie poyasa vostoka Azii. Geologiya i metallogeniya* [Volcanic belts of East Asia. Geology and metallogeny]. (1994) Moscow, Nauka Publ., 504 p. (In Russian)
- Volkov A.V., Prokof'ev V.Yu., Savva N.E., Sidorov A.A., Byankin M.A., Uyutnov K.V., Kolova E.E. (2012) Orogenesis of the Kupol gold-silver epithermal deposit: on the data of inclusions study (Northeast of Russia). *Geol. Rudn. Mestorozhdenii*, **54**(4), 350-359. (In Russian)
- Wilson M. (2007) *Igneous Petrogenesis: a Global Tectonic Approach*. Springer, 466 p.