

**КЫЗЫКЧАДРСКОЕ МЕДНОПОРФИРОВОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ (ТУВА):
ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОЗРАСТ МАГМАТИЗМА**

Кызыкчадрское меднопорфировое золотосодержащее месторождение расположено в интрузивном массиве, в составе которого выделяется пять фаз внедрения: 1) габбродиориты, 2) кварцевые монцодиориты, 3) гранодиориты, 4) граниты, 5) субвулканические интрузии и дайки порфировых пород среднего и кислого состава. Установлен возраст (U-Pb, SHRIMP II по цирконам) гранитов 508 ± 7 , кварцевых порфиров 507 ± 2 , гранодиорит-порфиров 490 ± 4 млн лет. Продуктивные на золото-медное оруденение малые порфировые интрузии имеют геохимические характеристики пост-коллизийных адакито-подобных гранитоидов и отличаются низкими содержаниями Y и Mn. Возраст порфирового магматизма Кызыкчадрского месторождения совпадает с Re-Os возрастом золото-сульфидной минерализации месторождений Сухой Лог, Олимпиада, а также с возрастом порфирового медного оруденения месторождения Аксуг и молибденового оруденения месторождения Сора.

Ключевые слова: Тува, Кызыкчадрское месторождение, золото-меднопорфировое оруденение, адакито-подобные гранитоиды, U-Pb возраст по цирконам SHRIMP II.

The Kizikchadr gold-bearing porphyry copper deposit is located in intrusive massif, which included are five phases of implementation: 1) gabbrodiories, 2) quartz monzodiorites, 3) granodiorites, 4) granites, 5) subvolcanic intrusions and porphyry dikes of intermediate and acidic rocks. The age (zircon U-Pb, SHRIMP II) of granites of 508 ± 7 Ma, quartz porphyry of 507 ± 2 Ma, granodiorite-porphyry of 490 ± 4 Ma. Small porphyritic intrusions, which productive for gold-copper mineralization, possess geochemical characteristics of post-collisional adakite-like granitoids and have distinctive low contents of Y and Mn. The porphyry magmatism age of Kyzikchadr ore field coincides with Re-Os age of gold-sulphide mineralization of Sukhoi Log and Olympiada deposits as well as the age of porphyry copper mineralization of Aksug deposit and molybdenum mineralization of Sora deposits.

Keywords: Tuva, Kizikchadr deposit, porphyry gold-copper mineralization, adakite-like granitoids, zircon U-Pb age SHRIMP II.

Золотосодержащие молибден-меднопорфировые месторождения (далее – меднопорфировые) обеспечивают три четверти мировой добычи меди, половину молибдена, одну пятую часть золота и большую часть рения [24]. В Алтае-Саянском регионе выявлен целый ряд месторождений порфирового типа, представляющих интерес для освоения и первоочередного прогнозирования. Более известны месторождения этого типа в Хакасии и Туве [2, 8], среди них месторождение Сора в последнее десятилетие обеспечивает более 90% добычи молибдена в России, месторождение Аксуг находится в стадии доразведки и подготовки к освоению, недропользователи проявляют интерес к Кызыкчадрскому месторождению [4]. По мнению И. В. Гаськова и др. [8], меднопорфировые месторождения в Алтае-Саянском регионе генетически связаны с девонскими порфировыми интрузивами гранитного состава, по другим данным [2], с посторогенной позднепалеозойско-раннемезозойской тектономагматической активизацией.

Общие сведения. Для прогнозирования промышленного медно-порфирового оруденения важную роль играют эталонные объекты. Одним из таких объектов в Ожинском золото-молибден-меднорудном районе центральной части Республики Тува является Кызыкчадрский рудный узел с учтенными прогнозными ресурсами 2,35 млн т меди (P_1 1053, P_2 770, P_3 525 тыс. т) [9]. Основу рудного узла состав-

ляет молибден-золото-меднопорфировое Кызыкчадрское месторождение, расположенное в 50 км к северо-западу от г. Кызыл в бассейне верхнего течения рек Кызык-Чадр и Мезель.

Оруденение Ожинского рудного района относится к медно-молибденовой формации и генетически связано с интрузивами кызыкчадрского комплекса. Кызыкчадрский рудный узел, объединяющий месторождение молибден-меднопорфирового типа и несколько мелких проявлений того же генезиса (Тараскырское, Ласковое, Чернореченское), ограничивается одноименным тектоническим выступом на северной границе Тоджинско-Уюкской впадины. Выступ сложен вулканическими образованиями и гранитоидами раннего палеозоя, вблизи разломов прорванными малыми интрузивами (штоками, дайками) гранитоидов кызыкчадрского комплекса. С заключительной фазой комплекса связывают золотосодержащее молибден-меднопорфировое оруденение.

Геологическая позиция. Кызыкчадрский рудный узел расположен вблизи границы Хемчикско-Систигхемской зоны Восточно-Тувинской салаирской складчатой системы и Тоджинско-Уюкской наложенной палеозойской впадины. Месторождение размещается в южной части Ожинского плутона гранитоидов таннуольского комплекса, который характеризуется в плане неправильной овальной формой и прослеживается на 60 км в широтном

направлении, достигая 15 км в поперечнике. В южной части plutона в провесе кровли, сложенной вулканогенными образованиями нижнего кембрия, размещается Кызыкчадрский интрузивный массив размером 12,5 × 3 км, который имеет выпуклую на север эллипсоидальную форму и вытянут в субширотном направлении. Кызыкчадрский массив прорывает метаморфизованные вулканогенно-осадочные образования кембрия и вмещает одноименное молибден-золото-меднопорфировое месторождение. Возраст комплекса точно не определен. Для плагиогранит-порфиров, гранодиоритоподобных бластитов, гнейсовидных гранитов и других пород Кызыкчадрского интрузива [13] приводятся К-Аг возрасты 255, 283, 305, 257, 403 и 408 млн лет. Позже были получены К-Аг значения возраста для кызыкчадрских гранодиоритов 257, для гранитов 237, по афодизе гранитов 329 млн лет [15]. В серийных легендах ГГК-200/2 и ГГК-1000/3 возраст кызыкчадрского комплекса принят раннедевонским на основании прорывания гранитами осадочных отложений атчольской свиты силура. Однако на детальных геологоразведочных планах между атчольской свитой и интрузивом показана тектоническая граница.

Рудная минерализация. На месторождении выявлены два (Первый и Второй) перспективных участка (рис. 1), расположенных в 2 км друг от друга. На Первом участке, по данным поисковых работ 1949–1956 и 1976–1978 гг., рудные тела

связаны с небольшим (1 × 0,1 км) линзовидным выходом гранитов среди алевролитов атчольской свиты силура. Выявлены несколько золото-кварцевых жил и небольшие по размеру тела прожилково-вкрапленных медных руд. Рудная минерализация представлена борнитом, в небольшом количестве присутствуют халькопирит и самородное золото. Содержание золота неравномерное, от следов до 150 г/т (среднее 8,2), меди от долей процента до 20% (в среднем 3,9), присутствует серебро до 28 г/т.

На Втором участке развита молибден-медная минерализация штокверкового типа на площади 3,5 × 0,3–0,5 км. Рудные тела представлены апопорфировыми кварц-серицитовыми и серицит-кварцевыми метасоматитами с прожилково-вкрапленной минерализацией, представленной молибденитом, халькопиритом, борнитом, энаргитом с подчиненными галенитом, сфалеритом, иногда [4] с самородным золотом. По результатам поисковых (горнопроходческих и буровых) работ 1976–1978 гг. на Втором участке проведена оценка прогнозных ресурсов кат. P₂: медь 1 млн т при среднем содержании 0,29%, молибден 42 тыс. т при среднем содержании 0,012%. Ресурсы золота не оценивались. Суммарные прогнозные ресурсы Кызыкчадрского месторождения категорий P₁, P₂ и P₃: медь 2350 и молибден 93,6 тыс. т, золото 45–56 т [4]. По результатам геолого-структурного изучения условий локализации рудных тел и минералообразующих растворов флюидных включений в кварце и карбонатах продуктивных стадий, выполненных

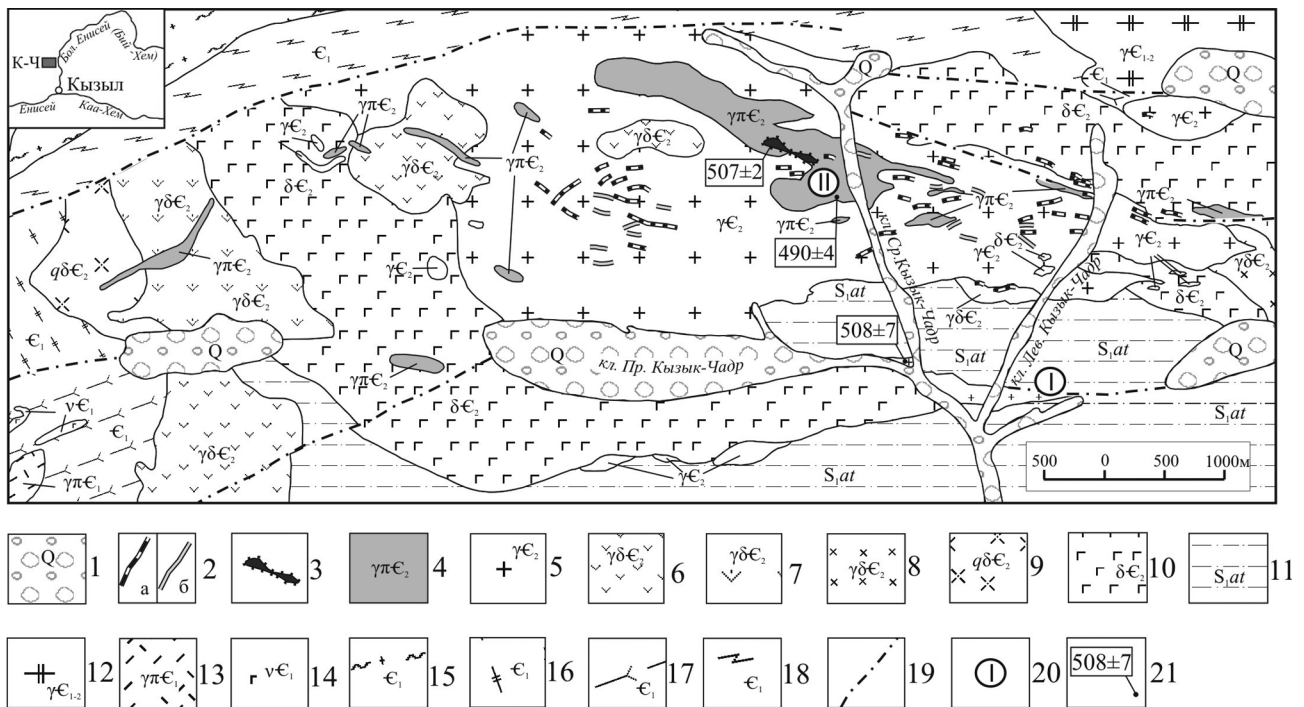


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Кызыкчадрского рудного поля (составлена по материалам Р. Т. Уссар, 1978, и Э. Л. Варанд, 1956)

На врезке К-Ч – Кызыкчадрское рудное поле. 1 – отложения квартера; 2–10 – кызыкчадрский комплекс: 2 – дайки (а – кварцевых, кварц-плагиоклазовых и биотит-кварц-плагиоклазовых порфиров, б – диорит-порфиров), 3 – эксплозивные брекчии, 4 – порфиры кварцевые, кварц-плагиоклазовые и биотит-кварц-плагиоклазовые, 5 – граниты биотитовые среднезернистые, 6 – гранодиориты среднеравномернозернистые, 7 – гранодиориты порфиоровидные, 8 – микрогранодиориты, 9 – диориты, габродииориты, 10 – кварцевые монодиориты; 11 – красноцветные терригенные отложения атчольской свиты силура; 12 – ранне-среднекембрийские граниты крупнозернистые гнейсовидные; 13–17 – раннекембрийский комплекс: 13 – гранит-порфиры, 14 – габбро, 15 – бластокатаклазиты по породам среднего состава, 16 – порфириоиды, 17 – порфиритоиды; 18 – сланцы серицит-хлорит-кварц-полевошпатовые; 19 – разрывные нарушения; 20 – рудные участки (I – Первый, II – Второй); 21 – пункты определения и значения возраста пород в млн лет (U-Pb метод по циркону, SHRIMP II)

в ТувИКОПР СО РАН, прогнозируется высокая вероятность распространения Au-Cu-порфирового оруденения до глубин 1500–1700 м [14].

Магматизм. По данным геологосъемочных и поисково-разведочных работ, в Кызыкчадрском массиве условно выделено пять фаз становления (в процентах от площади массива): к первой фазе отнесены габбродиориты и диориты (30), ко второй – кварцевые монцодиориты (10), к третьей – гранодиориты (5), к четвертой – граниты (45), к пятой – малые тела и дайки кислых и средних порфировых пород (10). В порфировой серии заключительной фазы выделяются две породные ассоциации: одна – кислого (кварцевые, кварц-плагиоклазовые и биотит-кварц-плагиоклазовые порфиры), другая – среднего состава (плагиоклаз-роговообманковые диорит-порфириты, кварцевые диорит-порфириты и андезитовые порфириты). В составе массива отчетливо различаются две группы пород: одна – гипабиссального облика (породы первых четырех фаз), вторая – субвулканического (пятая фаза), что давало основание предполагать (Уссар, 1978) их принадлежность к разным комплексам.

Достоверно установлены следующие геологические отношения между породами разных фаз. Диориты первой фазы прорываются гранодиоритами третьей и гранитами четвертой фазы. Дайки кислого и среднего состава прорывают граниты четвертой фазы. Дайки кварцевых диорит-порфиритов прорывают биотит-кварц-плагиоклазовые порфиры.

Интрузивные контакты между габбродиоритами первой и кварцевыми монцодиоритами второй фазы не наблюдались, поэтому существует (Бухаров и др., 1977) альтернативная точка зрения на их фациальные взаимоотношения.

Контакты гранодиоритов третьей фазы с породами более поздних фаз также не наблюдались. Учитывая, что в составе гранитов четвертой фазы выделяются две разновидности, одна из которых биотит-роговообманковые меланограниты с содержанием темноцветных минералов 15–18%, возможно, что гранодиориты третьей и меланограниты четвертой фазы связаны фациальными переходами.

С порфирами кислого состава, распространенными в северной части интрузива, где они образуют тело линзовидной формы размером $2,5 \times 0,1$ – $0,5$ км, связан Второй (главный) поисковый участок рудного поля Кызыкчадрского месторождения. Порфиры превращены в кварцево-серицитовые метасоматиты, пиритизированы и несут молибден-медную минерализацию. Характерно наличие в кварцево-серицитовых апопорфировых метасоматитах реликтовых крупных гексагональных вкрапленников кварца (рис. 2, б).

В южном эндоконтакте интрузии кварцевых порфиритов залегает субширотное удлиненное тело размером 100×300 м, сложенное брекчиями. Обломки округлой изометричной формы размещены в тонко-мелкозернистой флюидальной основной массе. В составе обломков граниты, кварцевые порфиры, кварциты, фельзитовые порфиры, микродиориты, долериты. Цемент брекчий и в меньшей степени обломочный материал серицитизированы, хлоритизированы, окварцованы и пиритизированы. В цементе присутствуют значительное количество обломочного кварца без следов тектонических деформаций и обильная вкрапленность эпидота, что дало основание (Уссар и др., 1978) предполагать их взрывное происхождение.

Дайки кварцевых диорит-порфиритов выявлены только в рудном поле месторождения. Порфириты имеют светло-зеленую окраску, скрытокристаллическую основную массу с флюидально-полосчатой текстурой и разнообразный состав вкрапленников: биотит, кварц, роговая обманка, плагиоклаз. Они прорывают измененные граниты и порфиры Кызыкчадрского массива, сами интенсивно серицитизированы и несут медно-молибденовую минерализацию. Вероятно, эти дайки являются «внутрирудными» и входят в состав продуктивного порфирового комплекса.

Геохимические особенности магматических образований. Для геохимической характеристики использовано 35 петрохимических анализов гипабиссальных пород Кызыкчадрского массива, выполненных в процессе ГС-50 (Бухаров и др., 1977) и поисковых работ на месторождении (Уссар и др., 1978), дополненных авторскими 15 полными

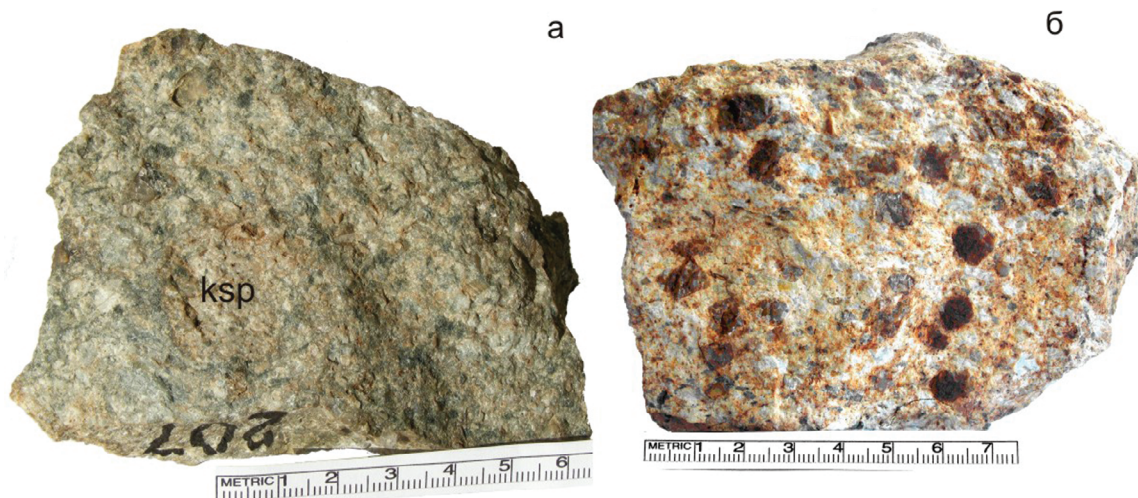


Рис. 2. Породы пятой фазы (малые тела и дайки порфировых пород)

а – гранодиорит-порфиры (пр. 207) с крупным вкрапленником калишпата (ksp); б – кварцевые порфиры из брекчий трубки взрыва (пр. 82111)

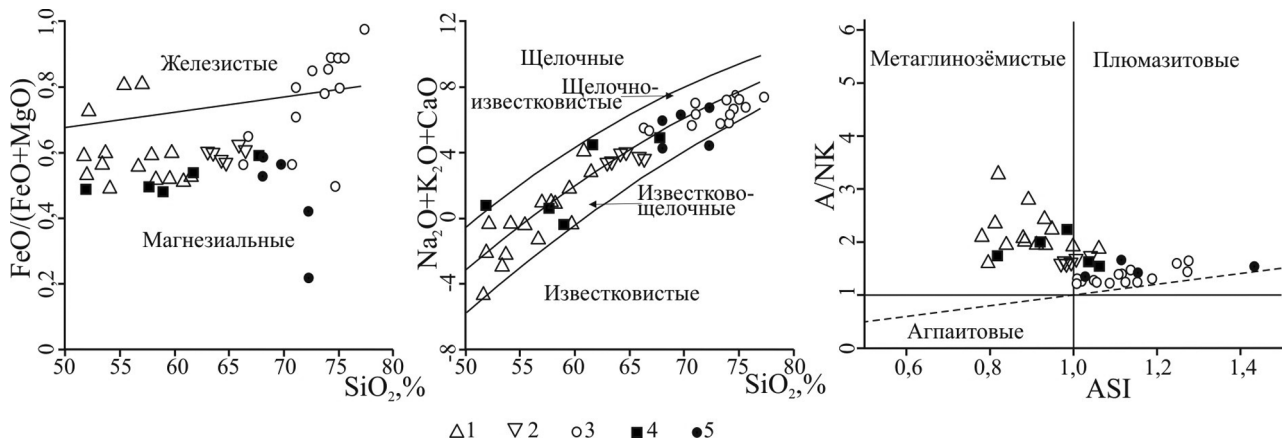


Рис. 3. Положение интрузивных образований Кызыкчадского рудного поля на классификационных диаграммах [21]

1 – габбродиориты и диориты первой фазы; 2 – кварцевые монцодиориты второй фазы; 3 – гранитоиды четвертой фазы; 4, 5 – малые тела и дайки порфировых пород: 4 – среднего состава (плаггиоклаз-роговообманковые диорит-порфири-ты, кварцевые диорит-порфири-ты и андезитовые порфири-ты) и 5 – кислого состава (кварцевые, кварц-плаггиоклазовые и биотит-кварц-плаггиоклазовые порфиры)

анализами пород гипабиссальной и порфировой серий на главные и редкие элементы. В составе как гипабиссальной, так и порфировой серии преобладают магнезиальные разности пород (рис. 3, а). Исключение составляют некоторые габбродиориты и диориты с повышенной железистостью, а также граниты четвертой фазы массива. Почти все породы относятся к известково-щелочным и щелочно-известковистым (рис. 3, б). Породы основного и среднего состава преимущественно метаглинозёмистые, а кислые разности в большинстве плюмазитовые (рис. 3, в).

Общей геохимической особенностью интрузивных пород Кызыкчадского рудного поля, при нормализации содержания элементов на состав примитивной мантии (рис. 4, а), является обогащенность крупноионными литофилами – элементами

мобильными в геологических процессах и склонными к флюидопереносу (K, Cs, Rb, Ba, Pb, Sr) и U по отношению к высокозарядным элементам (Nb, Ta, Zr, Hf, Ti) и легким РЗЭ (La, Ce, Nd). Такая структура распределения редких элементов является характерной чертой субдукционного магматизма [23]. Резкие отличия отмечаются по содержанию Y и величине отношения Sr/Y: в гипабиссальных разностях это отношение 2–13, в порфировой серии 31–133. В кислых разностях порфировой серии низкие содержания Y (6,38–7,35 мкг/г) сочетаются с низкими содержаниями MnO (0,019–0,07%), что является одним из критериев продуктивности порфировых интрузий [18].

Для гипабиссальных разностей в ряду кварцевые монцодиориты – лейкограниты также отмечаются повышенные содержания крупноионных литофи-

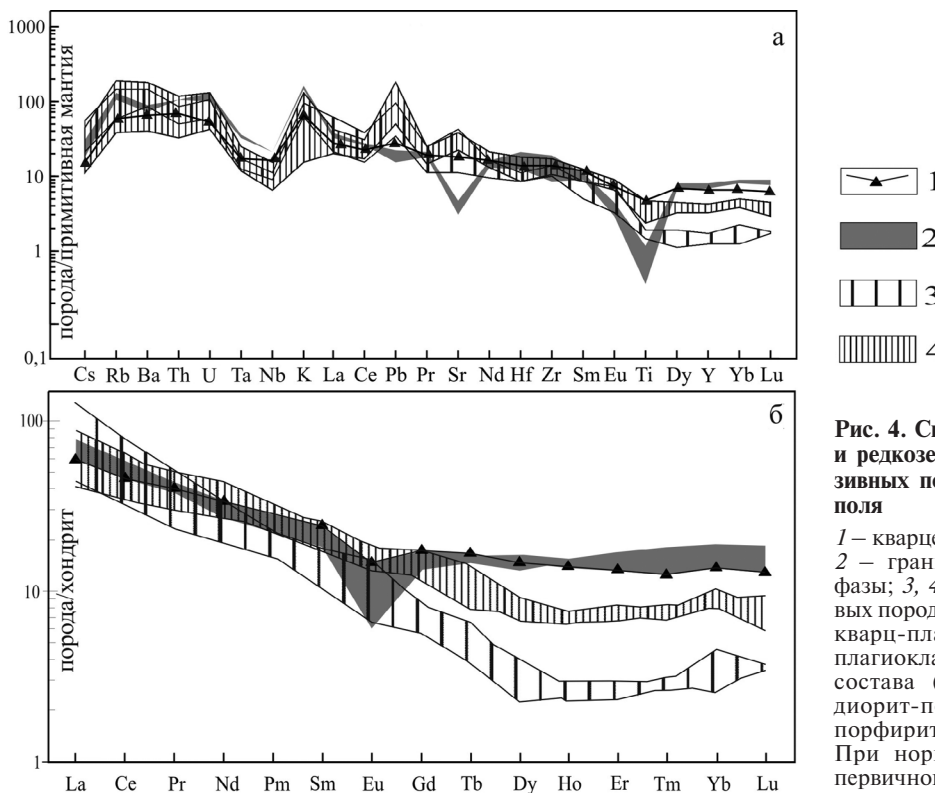


Рис. 4. Спектры распределения редких (а) и редкоземельных (б) элементов в интрузивных породах Кызыкчадского рудного поля

1 – кварцевые монцодиориты второй фазы; 2 – граниты и лейкограниты четвертой фазы; 3, 4 – малые тела и дайки порфировых пород: 3 – кислого состава (кварцевые, кварц-плаггиоклазовые и биотит-кварц-плаггиоклазовые порфиры), 4 – среднего состава (плаггиоклаз-роговообманковые диорит-порфири-ты, кварцевые диорит-порфири-ты и андезитовые порфири-ты). При нормализации использован состав первичной мантии и хондрита по [25]

лов, причем в гранитах уровни содержаний с небольшим превышением положительных аномалий K, Rb, U, Pb. Отрицательные аномалии Ti, Nb, Ta характерны для всего породного ряда, но более интенсивно они проявлены в гранитах, которым свойственны также отрицательные аномалии Sr и P, не выраженные в монцодиоритах. В содержании редкоземельных элементов также мало различий: $\Sigma P3Э$ в кварцевых монцодиоритах 102 и гранитах 121,48 мкг/г при одинаковой фракционированности P3Э ($(La/Yb)_N$ 4,00–4,3) и заметном увеличении Eu-минимума от 0,72 до 0,39.

В отличие от гипабиссальных пород в порфировой серии слабо выражен или отсутствует Eu-минимум (Eu/Eu^* 0,87–1,28) и значительно ниже содержание тяжелых P3Э. Меланократовые породы порфировой серии (габбро-диорит- и диорит-порфиры) с содержанием MgO 3,87–5,31% наиболее обогащены (в мкг/г) Cr (42,5–141), Co (16,8–23,8), Ni (11,4–29,3), иногда Ba (до 1160). Содержание P3Э низкое (75,23–85,65 мкг/г) с отчетливым отрицательным наклоном спектров распределения ($(La/Yb)_N$ 5,04–5,89).

Кварцевые диорит-порфиры и тоналит-порфиры более обогащены P3Э ($\Sigma P3Э$ 114,35–121,43 мкг/г) с более фракционированной структурой распределения ($(La/Yb)_N$ 7,02–9,82). Гранодиорит-порфиры с крупными выделениями калишпата (пр. 207) характеризуются наиболее высоким содержанием P3Э ($\Sigma P3Э$ 138,67 мкг/г) и наиболее крутым графиком распределения ($(La/Yb)_N$ 50,12) за счет низкого содержания тяжелых P3Э. В отличие от них кварцевые порфиры имеют наиболее низкое содержание P3Э ($\Sigma P3Э$ 61,9–94,86) и менее фракционированную структуру распределения ($(La/Yb)_N$ 9,72–23,6).

Результаты изотопного датирования. Для U-Pb датирования выбирались породы специфического местоположения и состава заключительных фаз становления интрузивного массива. В серии плутонических пород датированы красные среднезернистые граниты четвертой фазы кызыкчадрского комплекса на Первом участке (пр. 21008), где считается, что граниты прорывают алевролиты и глинистые сланцы атчольской свиты силура. На Втором участке датированы гранодиорит-порфиры (пр. 207) с круп-

ными вкрапленниками калишпата (рис. 2, а) и рудноминерализованные порфиры (пр. 82111) с крупными гексагональными вкрапленниками кварца из брежчий трубки взрыва (рис. 2, б).

Граниты. Минеральный состав (пр. 21008): олигоклаз (An_{15}) 40, кварц 25–30, калишпат 25–30, вторичный хлорит по темноцветному минералу 5, серицит 1–2%. Циркон в гранитах представлен мелкими субизометричными зернами размером 20–50 мкм в поперечнике и обломками крупных призматических зерен величиной 100–120 мкм с грубой концентрической и элементами секториальной зональности. Содержание U в цирконах 139–405, Th 32–162 мкг/г, отношение Th/U 0,32–0,83. Конкордантный U-Pb возраст по циркону из гранитов Первого участка по 11 измерениям составил 508 ± 7 млн лет (рис. 5). Полученная датировка рассматривается как время кристаллизации гранитов четвертой фазы Кызыкчадрского массива.

Возраст гранитов соответствует рубежу раннего и среднего кембрия. Поскольку на разведочных планах Первого участка между атчольской свитой и гранитами показана тектоническая граница, то реальные геологические взаимоотношения не противоречат полученной датировке, что позволяет возраст гранитов Кызыкчадрского массива считать среднекембрийским.

Кварцевые порфиры из эксплозивных брежчий трубки взрыва (рис. 2, б, пр. 82111) содержат в основном крупные вкрапленники кварца, полностью серицитизированного плаггиоклаза и темноцвета, замещенного хлоритом. Вкрапленники заключены в гранобластовую кварц-альбит-серицитовую основную массу. Циркон светло-серый призматический с большим количеством минеральных и газожидких включений. Коэффициент удлинения 3–4. В КЛ характерна тонкая ритмичная концентрическая зональность (рис. 6), иногда нарушенная темными однородными пятнами. По 10 измерениям содержание в цирконах U_{cp} 382, Th_{cp} 130 мкг/г, отношение Th/U 0,35. Конкордантный возраст 507 ± 2 млн лет соответствует среднему кембрию и принимается в качестве возраста кристаллизации кварцевых порфиров.

Гранодиорит-порфиры (пр. 207, рис. 2, а) отобраны на Втором участке из наиболее крупного

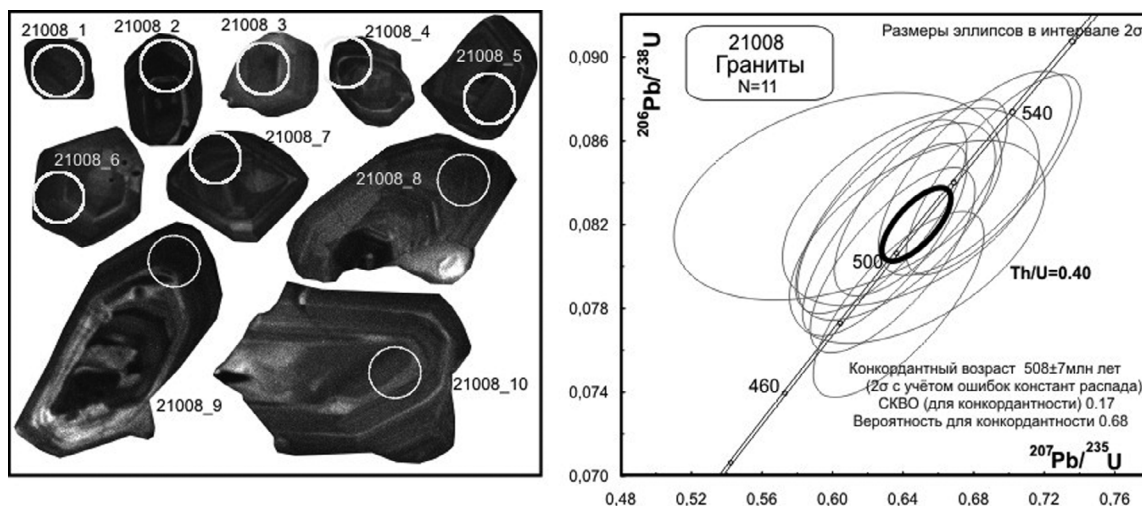


Рис. 5. Катодолуминесцентные (КЛ) изображения с точками измерений и возраст циркона из гранитов четвертой фазы кызыкчадрского комплекса (пр. 21008)

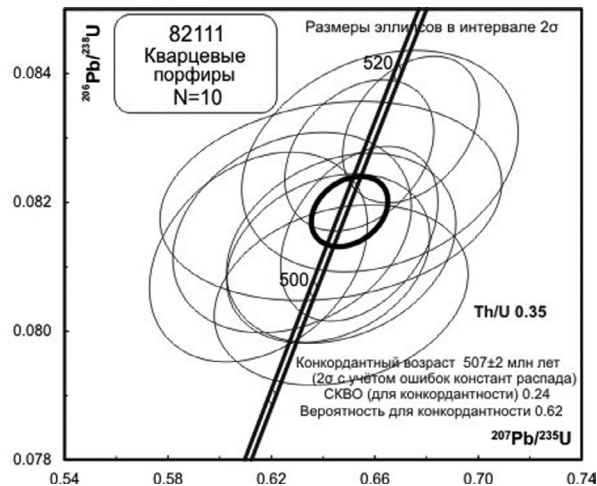
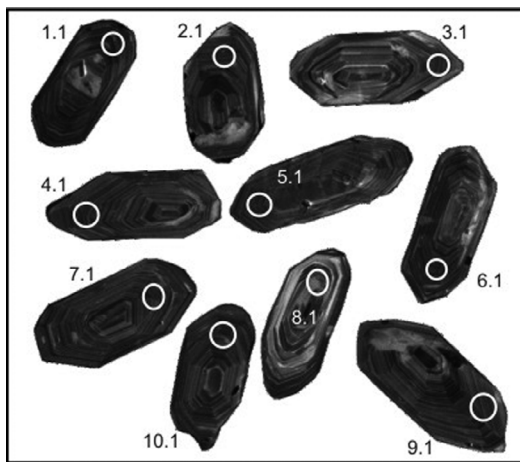


Рис. 6. КЛ изображения с точками измерений и возраст циркона из кварцевых порфиров пятой фазы кызыкчадрского комплекса (пр. 82111)

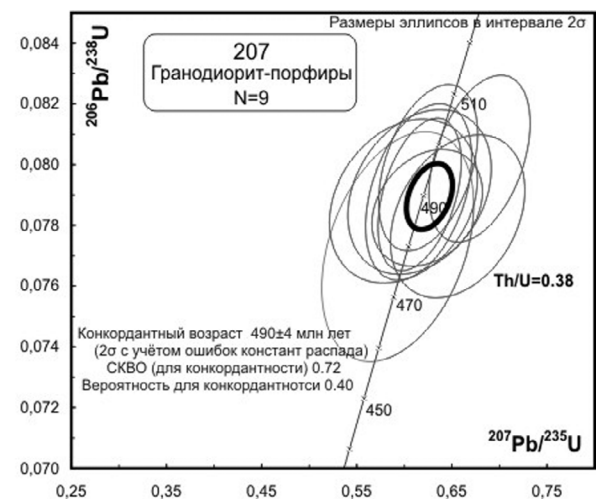
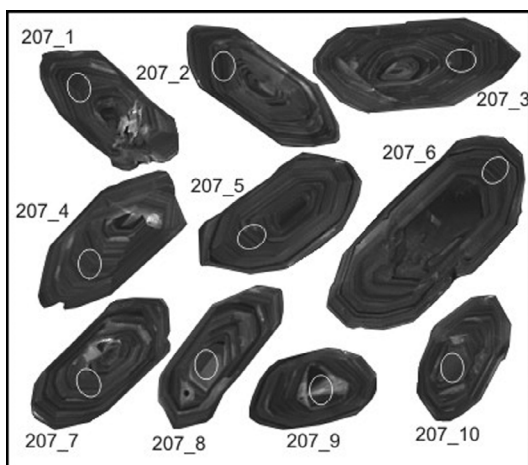


Рис. 7. КЛ изображения с точками измерений и возраст циркона из гранодиорит-порфиров пятой фазы кызыкчадрского комплекса (пр. 207)

тела гранит-порфиров в верховьях ключа Ср. Кызык-Чадр (рис. 1). Они относятся к пятой фазе малых тел и даек кислых и средних порфировых пород. Породы содержат крупные порфировые выделения калишпата (рис. 2, а) и, видимо, соответствуют гранодиоритоподобным бластитам по [13]. Гранодиорит-порфиры содержат порфировые выделения олигоклаза размером до 6×3 мм (An_{15}) 45, кварца 25, редкие, но более крупные, до 2 см в поперечнике выделения калишпата 15 и почти полностью хлоритизированного и эпидотизированного амфибола 15%. Основная масса состоит из преобладающих микролитов плагиоклаза и зерен кварца, в меньшей степени калишпата, апатита, магнетита и вторичных минералов – лейкоксена, хлорита, эпидота.

Цирконы из гранодиорит-порфиров (рис. 7) бесцветные, желтоватые, буроватые или розоватые, субидиоморфные или удлинённо-призматические (удлинение 1,7–3). Характерна грубая концентрическая зональность в средней и краевой частях кристаллов, центральные части тёмные со следами метасоматической перекристаллизации. Содержание в цирконах U 259–661, Th 73–239 мкг/г, отношение

Th/U 0,26–0,44. Для центральных частей зерен характерны наиболее высокие значения дискордантности от +31 до –76%. Конкордантное значение возраста по 9 измерениям (490 ± 4 млн лет) соответствует рубежу кембрия и ордовика и принимается в качестве времени становления гранодиорит-порфиров.

Тектоническая обстановка. Данные о девонском возрасте кызыкчадрского комплекса не подтверждаются результатами U-Pb датирования цирконов из гранитов, кварцевых порфиров и гранодиорит-порфиров. Возраст изученных пород $508 \pm 7 - 490 \pm 4$ млн лет соответствует среднему-верхнему кембрию. Кызыкчадрский плутон размещается на границе венд-раннепалеозойского Тувино-Монгольского магматического (островодужного) пояса и кембро-ордовикского Хемчикско-Систигемского прогиба, сложенного турбидитами, офиолитами и зелеными сланцами. Турбидиты Хемчикско-Систигемского прогиба рассматриваются в качестве фаций островодужного склона и подножия, а офиолитовая ассоциация и зеленосланцевый комплекс как образования аккреционной призмы [7]. Считается, что раннекаледонское ороген-

ное горно-складчатое сооружение Юго-Восточной Тувы сформировалось в результате косоугольной коллизии островодужной системы с Тувино-Монгольским микроконтинентом [6]. На момент формирования Кызыкчадрского комплекса в тектонической эволюции региона происходила смена геодинамических обстановок – от коллизионной (режим сжатия, 520–490 млн лет) к сдвиговой (режим растяжения, 490–430 млн лет).

Определение тектонической обстановки формирования пород кислого состава ($\text{SiO}_2 > 63\%$) проведено на серии многомерных дискриминантных диаграмм с использованием малоподвижных редких элементов: La, Ce, Sm, Yb, Y, Nb, Th, Zr [28]. Для большинства порфировых пород кислого состава геодинамическая обстановка формирования соответствует условиям континентальных магматических дуг. Лейкограниты четвертой фазы и гранит-порфиры из брекчий трубки взрыва (пр. 1146) классифицируются как рифтогенные. В поле рифтогенных пород на рис. 8 попадают или тяготеют к нему граниты с возрастом 508 ± 7 млн лет. Для гранодиорит-порфиров (пр. 207) с возрастом 490 ± 4 млн лет обстановка формирования определяется как коллизионная. По возрасту и геохимическим особенностям гипабиссальные породы Кызыкчадрского массива ближе всего к зубовскому габбро-монцодиорит-граносиенитовому комплексу.

Возраст монцодиоритов зубовского комплекса, определенный $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом по роговой обманке, 512 ± 2 млн лет [16].

Обсуждение результатов и выводы. Формирование порфирового оруденения – следствие сложного взаимодействия крупномасштабных тектонических процессов, магматических расплавов, внедряющихся в верхнюю часть земной коры, гидротермальных растворов разнообразного происхождения и сложных химических реакций между флюидами и вмещающими породами, вызывающими накопление рудных компонентов. Рудно-магматические системы порфировых месторождений являются центрами длительной и многоэтапной магматической активности, поэтому магматический контроль играет определяющую роль в их формировании.

В отличие от типовой тектонической обстановки формирования меднопорфировых месторождений за счет гидротермальных флюидов, отделяющихся из остывающих высоководных известково-щелочных магм, внедряющихся в вулканоплутонических дугах над субдукционными зонами, Кызыкчадрское месторождение формировалось после завершения субдукции в коллизионной обстановке. Магматическое образование постсубдукционных порфировых месторождений отличается повышенной калиевой щелочностью, причем рудная минерализация та-

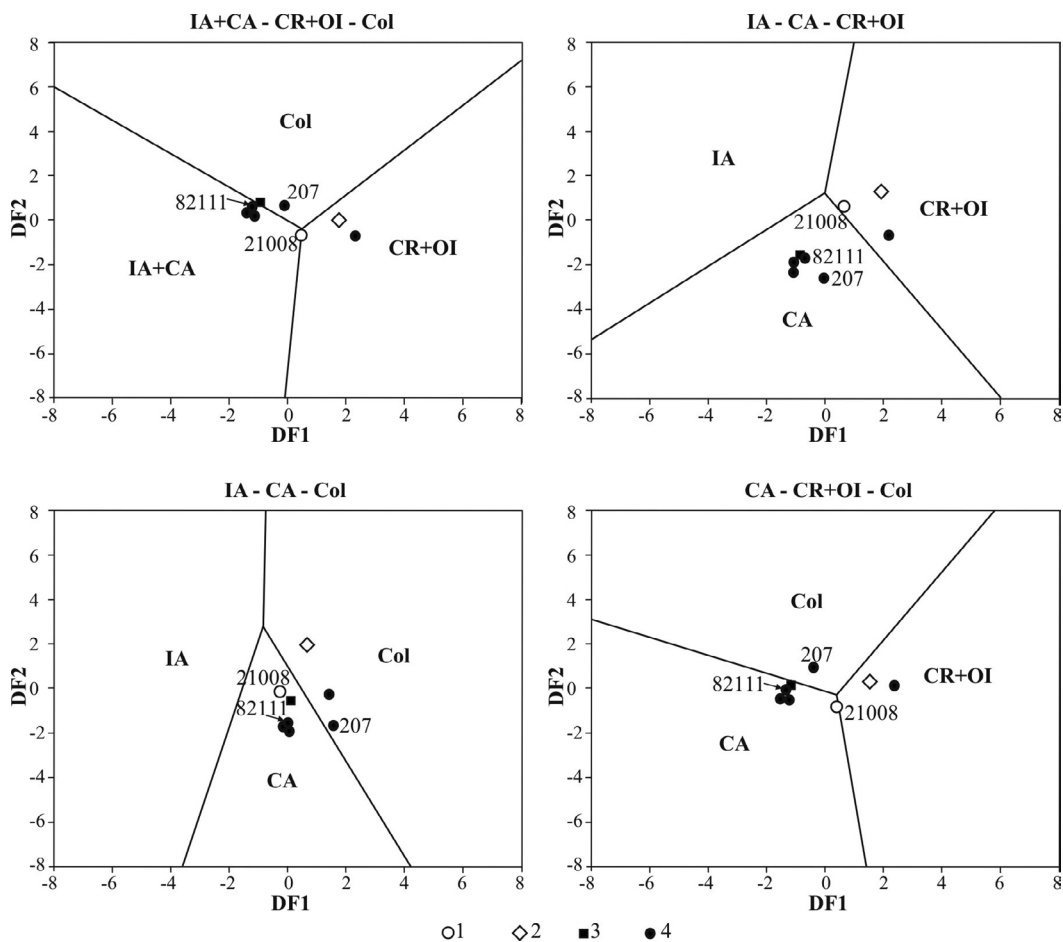


Рис. 8. Положение интрузивных пород кислого состава Кызыкчадрского рудного поля на многомерных дискриминантных диаграммах [28]

DF1 и DF2 – дискриминантные функции. Геодинамические обстановки: IA – островных дуг, CA – континентальных дуг, CR – континентальных рифтов, OI – океанических островов, Col – коллизионные. 1, 2 – четвертая фаза Кызыкчадрского массива: 1 – граниты, 2 – лейкограниты; 3, 4 – пятая фаза – порфировая серия: 3 – породы среднего состава (пр. 102), 4 – породы кислого состава. Номерами обозначены образцы, датированные U-Pb методом по циркону (SHRIMP II)

ких месторождений в большей степени обогащена золотом по сравнению с субдукционными медно-порфировыми месторождениями [26].

По геохимическим данным, продуктивные на меднопорфировое оруденение интрузии в Кызыкчадрском рудном поле представлены кислыми производными порфировой серии. Эти породы характеризуются высокими значениями отношения Sr/Y 41,5–133, наиболее высокой степенью фракционирования P3Э ((La/Yb)_N 9,72–50,12), низкими содержаниями Y (6,38–7,35 мкг/г), MnO (0,019–0,07%), Th и тяжелых P3Э. Возраст гранодиорит-порфиров из этой серии 490 ± 4 млн лет. Низкие содержания Y и Mn в продуктивных порфириновых интрузиях могут частично объясняться ранней кристаллизацией роговой обманки [18]. Эмпирически установленная связь медно-порфириновой минерализации с адакито-подобными интрузивными породами с высоким отношением Sr/Y (> 20) объясняется высоким содержанием воды в расплаве, способствующей кристаллизации и фракционированию водной фенокристовой фазы (амфибола и/или биотита) и подавляющей кристаллизацию плагиоклаза [27].

Высокие величины отношений Sr/Y и La/Yb (рис. 9) отражают как присутствие резидуального граната, так и отсутствие плагиоклаза или в источнике адакитовых магм, или в магматиче-

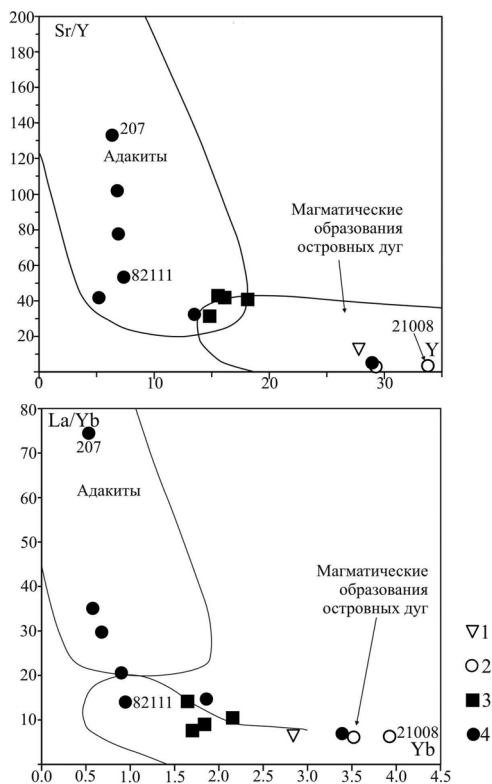


Рис. 9. Диаграммы Sr/Y – Y и La/Yb – Yb для разделения адакитов и обычных известково-щелочных магматических образований островных дуг по [20]

1 – кварцевые монцодиориты второй фазы; 2 – гранитоиды четвертой фазы; 3, 4 – малые тела и дайки порфириновых пород: 3 – среднего состава (плагиоклаз-роговообманковые диорит-порфириты, кварцевые диорит-порфириты и андезитовые порфириты), 4 – кислого состава (кварцевые, кварц-плагиоклазовые и биотит-кварц-плагиоклазовые порфиры). Номерами обозначены образцы, датированные U-Pb методом по циркону (SHRIMP II)

ской камере, из которой кристаллизовался адакито-подобный расплав. Такие гранитоиды, согласно модельным расчетам, формируются либо в результате плавления в зоне субдукции погружающейся океанической плиты (слэба), либо за счет плавления метабазитов в постколлизивной обстановке в основании утолщенной коры при $P \geq 15$ кбар в равновесии с гранатсодержащим амфиболовым, гранулитовым и эклогитовым реститом. В отличие от классических адакитов, образующихся в субдукционной обстановке, постколлизивные адакито-подобные породы имеют более низкие содержания MgO (< 3%), mg# < 45, Cr, Ni, но выше содержания K_2O , Al_2O_3 и несовместимых элементов, таких как Rb, Ba, Th, U, высокие величины отношений Th/Yb и Th/Sm. Большинство этих особенностей наблюдается в изученных адакито-подобных породах Кызыкчадрского рудного поля.

Постсубдукционный магматизм на рубеже кембрия и ордовика в Алтае-Саянском регионе весьма продуктивен на полезные ископаемые. Кроме ранее отмеченной специализации позднекембрийско-раннеордовикских структурно-вещественных комплексов на Fe-Mn, Sn-W-Mo, Li-Rb-Cs-Ta-Nb руды [6], с ними связаны промышленное медно-порфириновое, кобальтовое и колчеданно-полиметаллическое оруденение.

Так, близкий к гранитам Кызыкчадрского массива U-Pb возраст по циркону (SHRIMP II), по нашим неопубликованным данным, имеет массив гранофировых гранитов в Ховуаксинском рудном поле (510 ± 6 млн лет, СКВО 0,16). Скарны в экзоконтакте этого массива вмещают кобальтовую рудную минерализацию начальной стадии формирования Ховуаксинского месторождения [3].

К востоку от Кызыкчадрского месторождения «внутрирудные» экструзивные лавобрекчии Кызыл-Таштыгского колчеданно-полиметаллического месторождения имеют раннеордовикский возраст (478 ± 12 млн лет, СКВО 0,00104, U-Pb, SHRIMP II). Месторождение формировалось в трансенсивной обстановке предположительно в сдвиго-раздвиговом (pull-apart) бассейне, наложенном на аккрегированную венд-раннекембрийскую островную дугу [10].

Высокая продуктивность позднекембрийско-раннеордовикской эпохи подтверждается Re-Os датированием золотоносных сульфидов месторождений Сухой Лог и Олимпиада (таблица), свидетельствующим об эпигенетическом характере золоторудной минерализации относительно вмещающих рифейских черносланцевых образований [29]. На месторождении Сухой Лог возраст рудовмещающей хомолхинской свиты (RF₃) не древнее 600 млн лет на основании U-Pb возраста (LA-ICPMS) детритового циркона из сульфидно-минерализованных алевролитов и песчаников [22]. Возраст главной фазы метаморфизма 516 ± 10 млн лет по метаморфическому монациту (U-Th-Pb возраст (LA-ICPMS) [22]). Re-Os возраст золотоносной сульфидной минерализации ($513-470$ млн лет) оказался значительно моложе вмещающих рифейских пород, но близок к возрасту главной складчатости метаморфизма [29].

На Олимпиадинском месторождении возраст золото-сульфидного оруденения в метасоматически измененных слюдисто-кварцевых и углеродсодержащих сланцах кординской свиты (RF₁) 511 ± 24 и 513 ± 40 млн лет, ближе всего к U-Pb и Ag-Ag датировкам коллизивных гранитоидов Посоль-

Изотопные характеристики черносланцевых золоторудных и меднопорфировых систем

Месторождения	Геологические комплексы	Результаты изотопного датирования (млн лет)			
		Ar-Ar	U-Pb	U-Pb SHRIMP, LA-ICPMS	Re-Os
Большееобъемные золоторудные месторождения в углеродисто-терригенных комплексах					
Сухой Лог	Хомолхинская свита (RF ₃) Метаморфизм		516 ± 22	~ 600 [22] 516 ± 10 [22] по монациту	508–470 [29]
	Золото-сульфидные руды				
Олимпиада	Кординская свита (RF ₁) Гранитоиды	485,6 ± 4,6 445,7 ± 3,4	511 ± 9–455 ± 5		513 ± 40–511 ± 24 [29]
	Золото-сульфидные руды				
Меднопорфировые системы					
Аксуг	Кварцевые диориты Гранодиорит-порфиры Плагииграниты и аплиты Медно-сульфидные руды	497–462 404–401 336–324			518 ± 2–511 ± 2 по молибдениту [19]
	Сора	Монзониты Лейкограниты Дайки габброидов и сиенитов Гранит-порфиры Молибденовые руды	480–460 440–420 405–402 389–388		
Кызыкчадр-ское	Граниты Кварцевые порфиры Гранодиорит-порфиры			508 ± 7 507 ± 2 490 ± 4	
Кульбич	Плагииграниты Риодацит-порфиры Дацит-порфиры			512 ± 6 [11] 511 ± 4 [11] 396 ± 3 [11]	

ненского и Нижнеканского массивов ($511 \pm 9 - 455 \pm 5$ млн лет), расположенных в 300 км к югу от Олимпиады [5]. Близкий Re-Os возраст имеет сульфидная молибден-меднопорфировая минерализация Аксугского и Сорского порфировых месторождений [19], а также продуктивные порфировые комплексы меднопорфировых месторождений Кызыкчадрское [12] и Кульбич [11].

Многочисленные определения возраста магматических образований выполнены в Аксугском плутоне (таблица, все данные $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ датирования). Преобладающие натриевые известково-щелочные кварцевые диориты и тоналиты с подчиненными диоритами и габбро показали возраст 497–462 млн лет [17]. Порфировая серия на Аксугском месторождении представлена диорит-, тоналит- и гранодиорит-порфирами с возрастом 404–401 млн лет. Пострудные плагииграниты и аплиты имеют возраст 336–324 млн лет. При этом Re-Os возраст молибденита из Аксугского месторождения по трем пробам $518 \pm 2 - 511 \pm 2$ млн лет [19] противоречит возрасту магматических образований на месторождении, в том числе возрасту предполагаемой продуктивной порфировой серии. Однако приведенный Re-Os возраст молибденита хорошо совпадает с нашими датировками возраста магматических образований по циркону на Кызыкчадрском месторождении. Есть основания полагать, что и на Аксугском месторождении $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ возраст пород значительно «омолаживает» время реальных магматических событий и требует заверки U-Pb датировками по циркону.

Возраст магматических пород плутонической серии Сорского месторождения (все датировки по отношению $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$): монзонитоидов 480–460, лейкогранитов 440–420 млн лет. Порфировая серия представлена дайками габбро, монцодиоритов, монзонитов и сиенитов (405–402 млн лет) и штоко-дайкообразными телами рудоносных гранит-порфиров (389–388 млн лет) [1]. Re-Os возраст молибденита из Сорского месторождения по четырем пробам показал два дискретных этапа формирования рудной минерализации: первый $506 \pm 2 - 502 \pm 2$, второй $470 \pm 2 - 468 \pm 2$ млн лет [19]. Как видно, Re-Os возраст молибденита первого этапа древнее наиболее ранних монзонитоидов, установленных на месторождении. Молибденит второго этапа близок по Re-Os возрасту к монзонитоидам, но значительно древнее среднедевонских рудоносных гранит-порфиров.

По нашему мнению, в девоне происходила регенерация молибден-меднопорфировой минерализации там, где она была первоначально создана в среднем-позднем кембрии и на рубеже с ордовиком. К аналогичным выводам мы пришли при датировании магматизма на месторождении Кульбич в Горном Алтае [11]. Риодацит-порфиры месторождения Кульбич с возрастом 511 ± 4 млн лет также имеют низкие содержания Y, Mn, Th, тяжелых РЗЭ и рассматриваются как рудопродуктивные. Медно-порфировое оруденение было регенерировано в девоне вблизи субвулканических интрузивов с возрастом 396 ± 3 млн лет.

Синхронность проявления в среднем-позднем кембрии складчатости, метаморфизма, гранитоидного магматизма и золотого оруденения в черносланцевых и меднопорфировых системах объясняется их формированием в сходных условиях коллизии и приращения венд-раннекембрийских островных дуг Палеоазиатского океана к Сибирскому кратону.

Авторы благодарят Е. Н. Лепехину (ЦИИ ВСЕГЕИ), выполнившую определения возраста пород.

1. Берзина А.П. и др. Сорский Cu-Mo-порфировый магматический центр (Кузнецкий Алатау): о связи базитов и гранитоидов по Sm-Nd изотопным и геохимическим данным / А.П. Берзина, А.Н. Берзина, П.А. Серов, В.О. Гимон // ДАН СССР. 2010. Т. 430. № 1. — С. 78–84.

2. Блюман Б.А., Шапошников Г.Н. Медно-порфировые месторождения Алтае-Саянской складчатой области: возраст, тектонический режим формирования, перспективы // Руды и металлы. 1998. № 6. — С. 49–58.

3. Борисенко А.С., Лебедев В.И., Тюлькин В.Г. Условия образования гидротермальных кобальтовых месторождений. — Новосибирск: Наука, СО, 1984. — 172 с.

4. Бурдин Н.В., Лебедев В.И., Лебедев Н.И. Золото-медь-молибден-порфировые руды // Успехи современного естествознания. 2009. № 5. — С. 15–23.

5. Верниковская А.Е., Верниковский В.А., Даценко В.М. и др. О проявлении раннепалеозойского магматизма в Южно-Енисейском кряже // Докл. РАН. 2004. Т. 397. № 3. — С. 374–379.

6. Владимиров А.Г., Бабин Г.А., Постников А.А. и др. Позднекембрийско-ордовикский рубеж в истории геологического развития Алтае-Саянской складчатой области // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещ. Вып. 10. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. Т. 1. — С. 37–40.

7. Владимиров А.Г., Изох А.Э., Поляков Г.В. и др. Габбро-гранитные интрузивные серии и их индикаторное значение для геодинамических реконструкций // Петрология. 2013. Т. 21. № 2. — С. 177–201.

8. Гасков И.В., Акимцев В.А., Ковалев К.Р., Сотников В.И. Золотосодержащие минеральные ассоциации месторождений медно-рудного профиля Алтае-Саянской складчатой области // Геол. и геофизика. 2006. 47. № 9. — С. 996–1004.

9. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-46 — Абакан. Объясн. зап. — Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. — 391 с.

10. Гусев Н.И. Петрологические особенности и геодинамическая обстановка вулканизма, контролирующего колчеданно-полиметаллическое оруденение в Восточной Туве // Вулканизм и геодинамика: Материалы V Всерос. симпозиума по вулканологии и палеовулканологии. — Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2011. — С. 507–510.

11. Гусев Н.И., Шокальский С.П., Гусев А.И. Магматизм и меднопорфировое оруденение месторождения Кульбич, Горный Алтай // Регион. геология и металлогения. 2011. № 46. — С. 85–97.

12. Гусев Н.И., Семенов М.И., Берзон Е.И. Возраст и геодинамические особенности магматизма Кызыкчадского меднопорфирового месторождения (Тува) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-

Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещ. Вып. 11. — Иркутск: ИЗК СО РАН, 2013. — С. 84–86.

13. Козлов А.М., Амшинский Н.Н. О возрасте Ожинского массива (Тува) // Новые данные к обоснованию региональных магматических схем Алтае-Саянской складчатой области. — Новосибирск, 1972. — С. 63–66.

14. Лебедев Н.И. Минеральные ресурсы Тувы: обзор и анализ полезных ископаемых. Кызыл: ТувИКОПР СО РАН. 2012. — 284 с.

15. Рафиенко Н.И. Возраст и положение кызыкчадских гранитов среди гранитоидов таннуольского интрузивного комплекса (Тува) // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1982. № 11. — С. 21–28.

16. Руднев С.Н., Владимиров А.Г., Пономарчук В.А. и др. Каахемский полихронный батолит (Восточная Тува): состав, возраст, источники и геодинамическая позиция // Литосфера. 2006. № 2. — С. 3–33.

17. Сотников В.И., Пономарчук В.А., Шевченко Д.О., Берзина А.Н. Аксугское Cu-Mo-порфировое месторождение в Северо-Восточной Туве: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронология, источники вещества // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 11. — С. 1119–1132.

18. Baldwin J.A., Pearce J.A. Discrimination of productive and nonproductive porphyritic intrusions in the Chilean Andes // Econ. geology. 1982. Vol. 77. — P. 664–674.

19. Berzina A.N., Stein H.I., Zimmerman A., Sotnikov V.I. Re-Os ages for molybdenite from porphyry Cu-Mo and greisen Mo-W deposits of Southern Siberia (Russia): preserve metallogenetic record // Mineral Exploration and Sustainable Development, Eliopoulos et al. (eds.). Rotterdam: Millpress, 2003. — P. 231–234.

20. Defant M.J., Drummond M.S. Derivation of modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // Nature. 1990. Vol. 347. — P. 662–665.

21. Frost B.R. A geochemical classification for granitic rocks // J. of Petrology. 2001. Vol. 42. N 11. — P. 2033–2048.

22. Meffre S., Large R., Scott R. et al. Age and pyrite Pb isotopic composition of the giant Sukhoi Log sediment-hosted gold deposit, Russia // Geochim. Cosmochim. Acta. 2008. Vol. 72. — P. 2377–2391

23. Pearce J.A., Peate D.W. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas // Annual Review Earth Planet. Sci. 1995. 23. — P. 251–285.

24. Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // Econ. Geol. 2010. 105. N 1-2. — P. 3–41.

25. Sun S.S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins / eds. A.D. Saunders, M.J. Norry. — Geol. Soc. in London. Special Publ. 1989. N 42. — P. 313–345.

26. Richards J.P. Postsubduction porphyry Cu-Au and epithermal Au deposits: Products of remelting of subduction-modified lithosphere // Geology. 2009. Vol. 37. N 3. — P. 247–250.

27. Richards J.P., Spell T., Rameh E. et al. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu ± Mo ± Au potential: examples from the Tethyan arcs of Central and Eastern Iran and Western Pakistan // Econ. geol. 2012. Vol. 107. N 2. — P. 295–332.

28. Verma S.P., Pandarinath K., Verma S.K., Agrawal S. Fifteen new discriminant-function-based multi-dimensional robust diagrams for acid rocks and their application to Precambrian rocks // Lithos. 2013. Vol. 168–169. — P. 113–123.

29. Yakubchuk A., Stein H., Wilde A. Results of pilot Re-Os dating of sulphides from the Sukhoi Log and Olympiada orogenic gold deposits, Russia // Ore Geology Rev. 2014. Vol. 59. — P. 21–28.

Гусев Николай Иванович — зав. отделом, ВСЕГЕИ. <nikolay_gusev@vsegei.ru>.

Берзон Евгений Иосифович — канд. геол.-минер. наук, гл. геолог, ОАО «Красноярскгеолсъемка». <geolotdel@krasgeolsjemka.ru>.

Семенов Михаил Иванович — начальник партии, ОАО «Красноярскгеолсъемка». <geolotdel@krasgeolsjemka.ru>.