

**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  $508 \pm 7$ , кварцевых порфиров  $507 \pm 2$ , гранодиорит-порфиров  $490 \pm 4$  млн лет. Продуктивные на золото-медное оруденение малые порфировые интрузии имеют геохимические характеристики пост-коллизии адakitо-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, адakitо-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  $508 \pm 7$  Ma, quartz porphyry of  $507 \pm 2$  Ma, granodiorite-porphyry of  $490 \pm 4$  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. Гаскова 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.

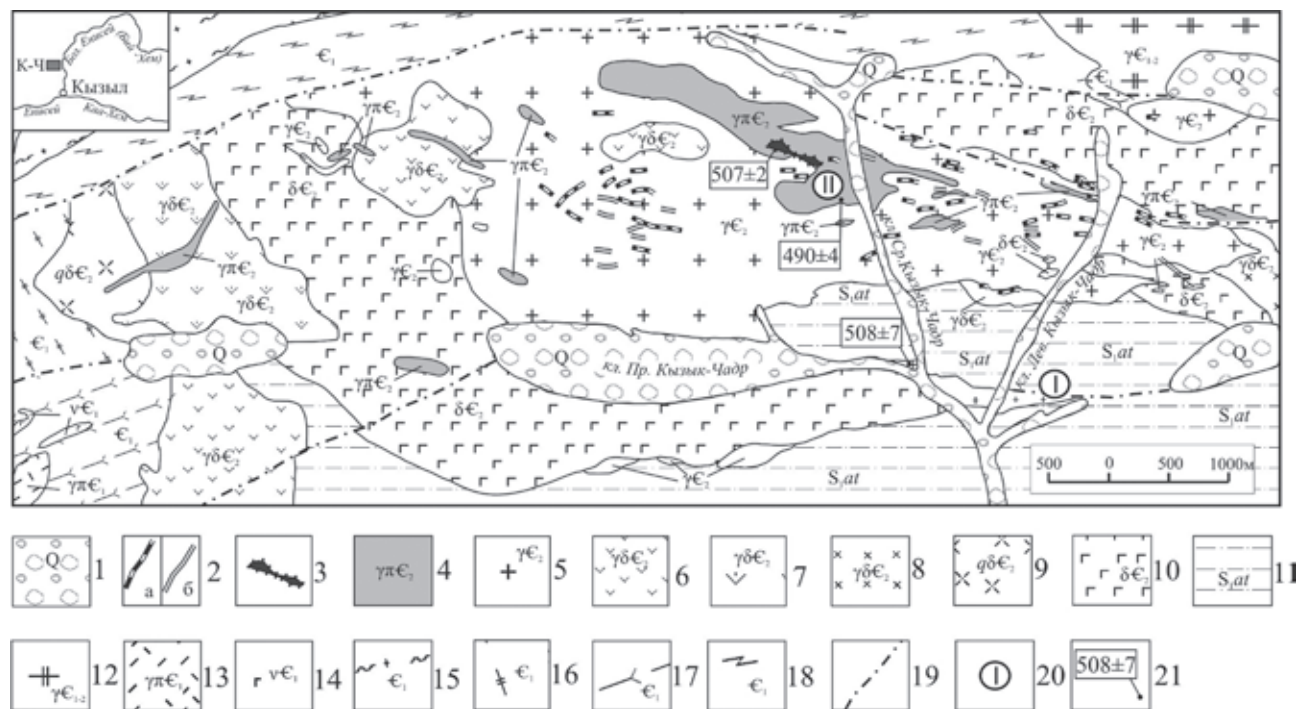
**Геологическая позиция.** Кызыкчадрский рудный узел расположен вблизи границы Хемчикско-Систигхемской зоны Восточно-Тувинской салаирской складчатой системы и Тоджинско-Уюкской наложенной палеозойской впадины. Месторождение размещается в южной части Ожинского плутона гранитоидов таннуольского комплекса, 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 апофизе 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. P<sub>2</sub>: 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 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> и P<sub>3</sub>: 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 среднеравномернотернистые, 7 – гранодиориты порфиоровидные, 8 – микрогранодиориты, 9 – диориты, габродиориты, 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)

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  $100 \times 300$  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

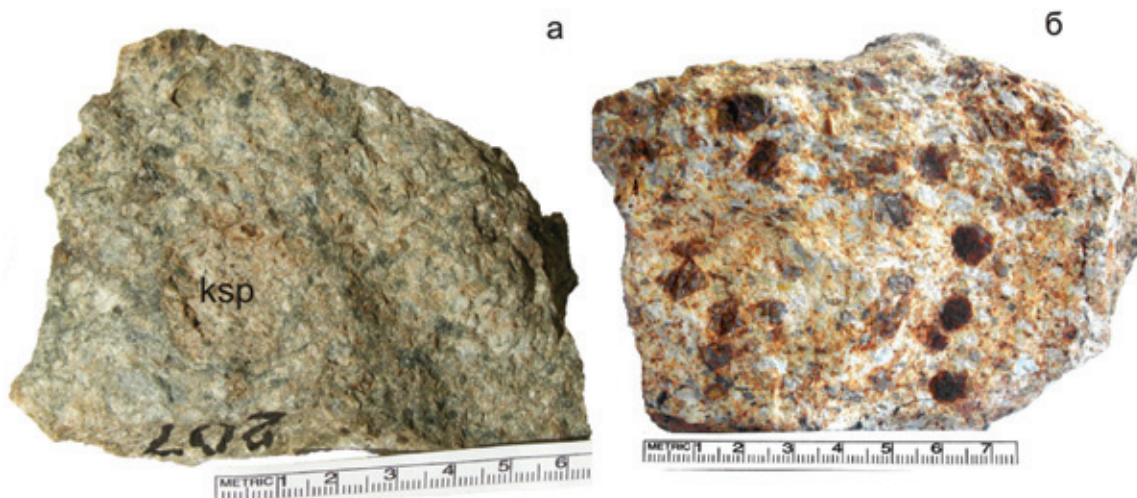


Рис. 2. Породы пятой фазы (малые тела и дайки порфировых пород)

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

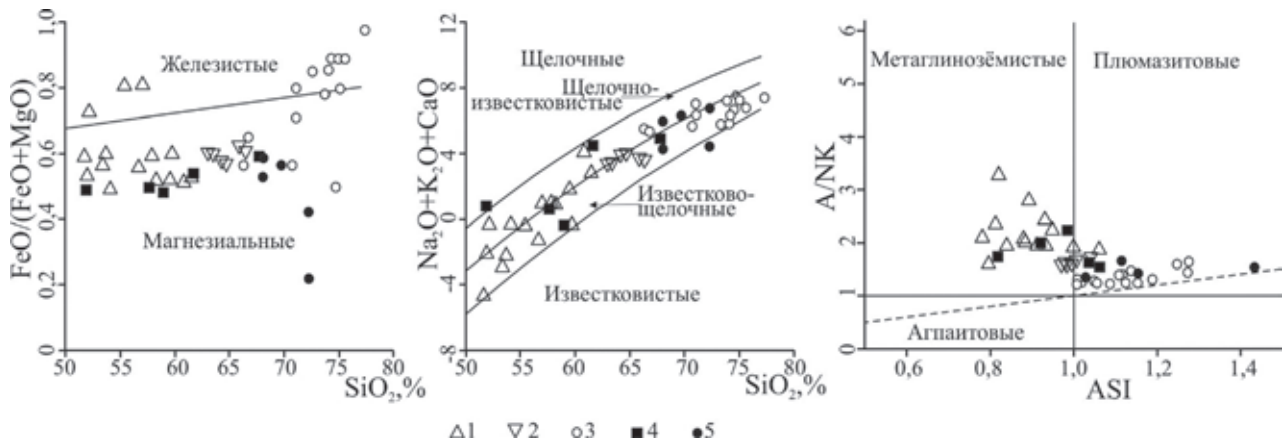


Рис. 3. Положение интрузивных образований Кызыкчадского рудного поля на классификационных диаграммах [21]

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 (плагиноклаз-роговообманковые диорит-порфири-ты, кварцевые диорит-порфири-ты и андезитовые порфири-ты) и 5 – кислого состава (кварцевые, кварц-плагиноклазовые и биотит-кварц-плагиноклазовые 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-

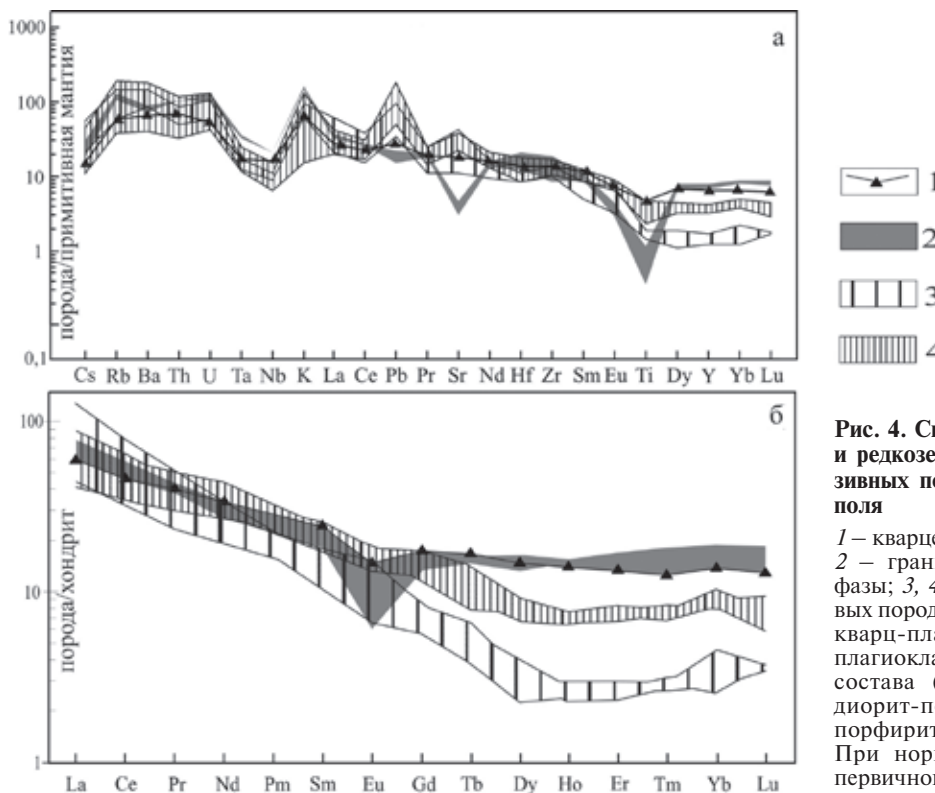


Рис. 4. Спектры распределения редких (а) и редкоземельных (б) элементов в интрузивных породах Кызыкчадского рудного поля

1 – кварцевые монцодиориты второй фазы; 2 – граниты и лейкограниты четвертой фазы; 3, 4 – малые тела и дайки порфировых пород: 3 – кислого состава (кварцевые, кварц-плагиноклазовые и биотит-кварц-плагиноклазовые порфиры), 4 – среднего состава (плагиноклаз-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 брекчий 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  $508 \pm 7$  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 брекчий 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  $507 \pm 2$  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

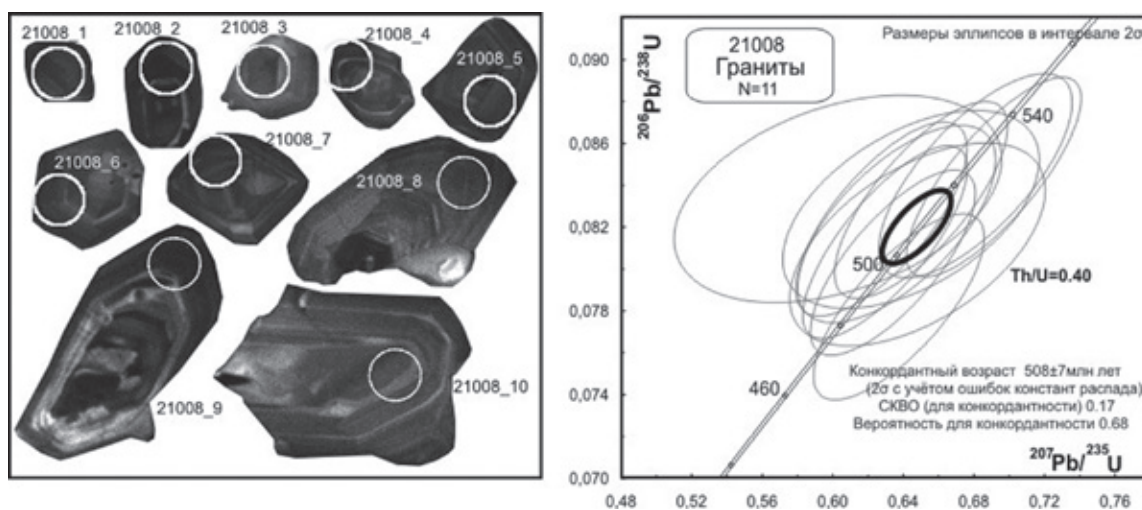


Рис. 5. Катодолуминесцентные (КЛ) изображения с точками измерений и возраст циркона из гранитов четвертой фазы кызыкчадрского комплекса (пр. 21008)

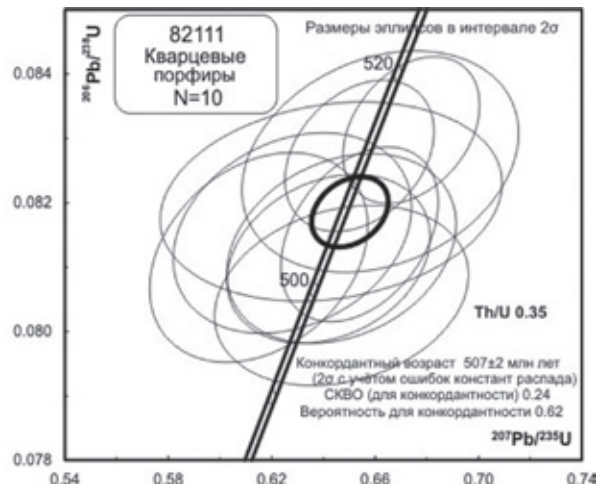


Рис. 6. КЛ изображения с точками измерений и возраст циркона из кварцевых порфиров пятой фазы кызыкчадрского комплекса (пр. 82111)

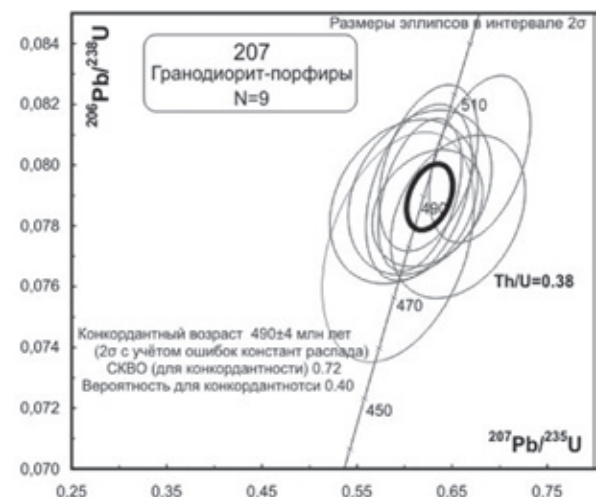
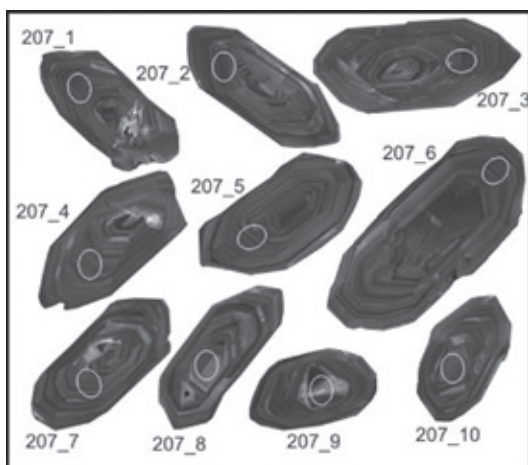


Рис. 7. КЛ изображения с точками измерений и возраст циркона из гранодиорит-порфиров пятой фазы кызыкчадрского комплекса (пр. 207)

тела гранит-порфиров в верхьях 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  $6 \times 3$  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, субидiomорфные 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 ( $490 \pm 4$  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-

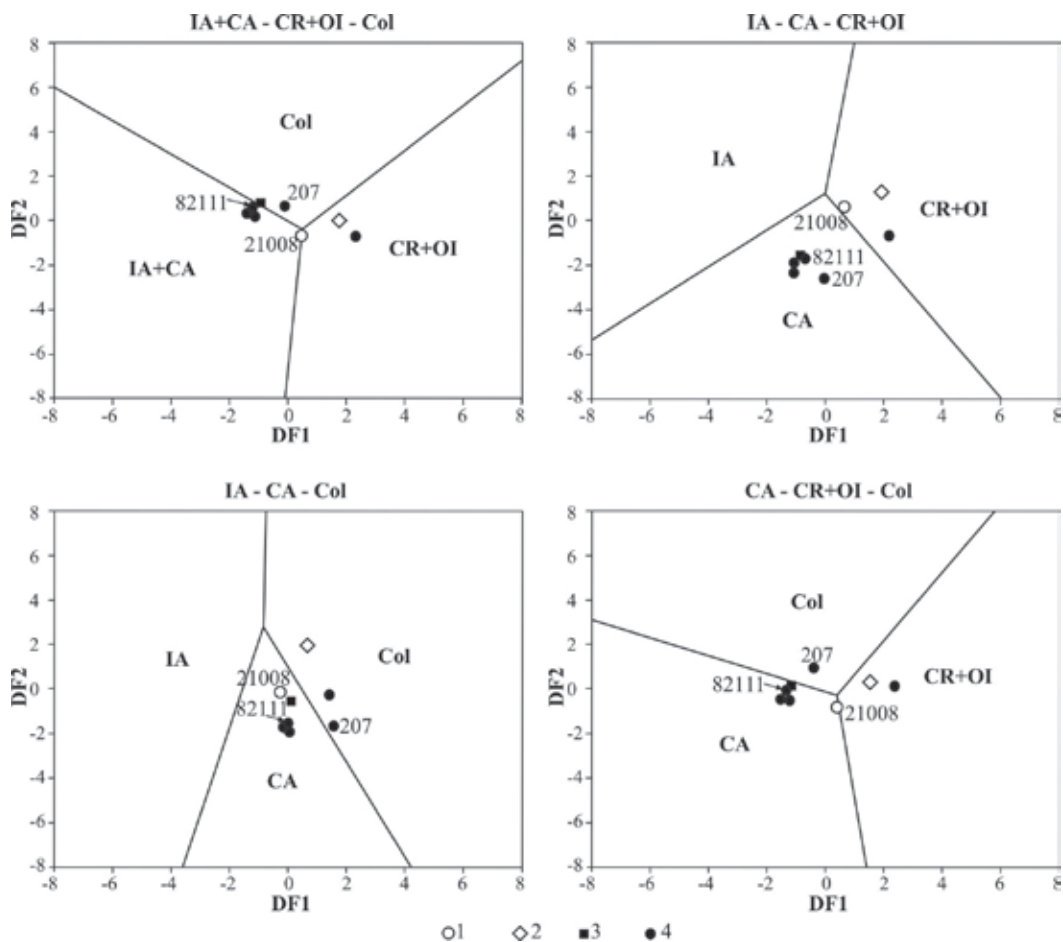
ное горно-складчатое сооружение Юго-Восточной Тувы сформировалось в результате косо́й коллизии островодужной системы с Тувино-Монгольским микроконтинентом [6]. На момент формирования Кызыкчадрского комплекса в тектонической эволюции региона происходила смена геодинамических обстановок – от коллизионной (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  $508 \pm 7$  млн лет. Для гранодиорит-порфиров (пр. 207) с возрастом  $490 \pm 4$  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,  $512 \pm 2$  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 фракционированности PЗЭ ((La/Yb)<sub>N</sub> 9,72–50,12), низкими содержаниями Y (6,38–7,35 мкг/г), MnO (0,019–0,07%), Th и тяжелых PЗЭ. Возраст гранодиорит-порфиров из этой серии 490 ± 4 млн лет. Низкие содержания Y и Mn в продуктивных порфировых интрузиях могут частично объясняться ранней кристаллизацией роговой обманки [18]. Эмпирически установленная связь медно-порфировой 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-

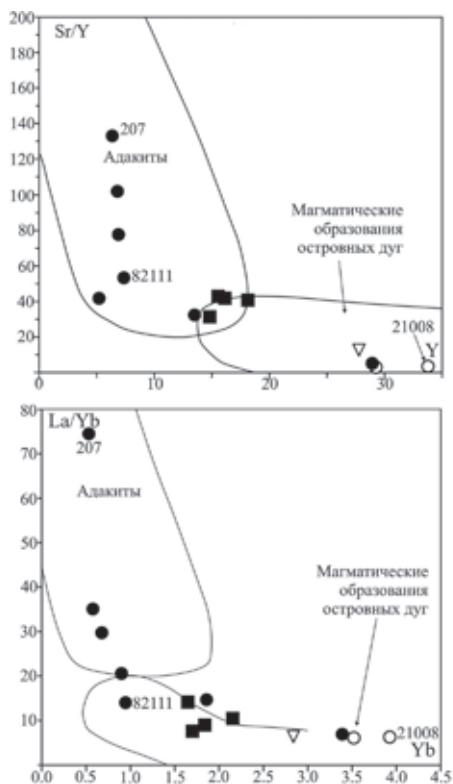


Рис. 9. Диаграммы Sr/Y – Y и La/Yb – Yb для разделения адакитов и обычных известково-щелочных магматических образований островных дуг по [20]

1 – кварцевые монцодиориты второй фазы; 2 – гранитоиды четвертой фазы; 3, 4 – малые тела и дайки порфировых 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-порфировое, 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 (RF<sub>3</sub>) 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 (RF<sub>1</sub>) 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
<b>Большеобъемные золоторудные месторождения в углеродисто-терригенных комплексах</b>					
Сухой Лог	Хомолхинская свита (RF <sub>3</sub> ) Метаморфизм		516 ± 22	~ 600 [22] 516 ± 10 [22] по монациту	508–470 [29]
	Золото-сульфидные руды				
Олимпиада	Кординская свита (RF <sub>1</sub> ) Гранитоиды	485,6 ± 4,6 445,7 ± 3,4	511 ± 9–455 ± 5		513 ± 40–511 ± 24 [29]
	Золото-сульфидные руды				
<b>Меднопорфировые системы</b>					
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  $511 \pm 4$  млн лет также имеют низкие содержания Y, Mn, Th, тяжелых РЗЭ и рассматриваются как рудопродуктивные. Медно-порфировое орудование было регенерировано в девоне вблизи субвулканических интрузивов с возрастом  $396 \pm 3$  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 Кызыкчадрского 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 кызыкчадрских 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 metallogenic 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>.