

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

УДК 551.72:549.02:550.4.08

**ВОЗРАСТ РАННЕГО ЭТАПА ФОРМИРОВАНИЯ
Ag–Bi–Cu–Ni–Co ХОВУ-АКСЫНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ
(РЕСПУБЛИКА ТЫВА): РЕЗУЛЬТАТЫ U–Pb
(ID-TIMS)-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРАНАТА**

© 2024 г. М. В. Стифеева^{1,*}, Е. Б. Сальникова¹, член-корреспондент РАН А. Б. Котов¹,
А. В. Никифоров², Ю. В. Плоткина¹, Е. В. Толмачева¹

Поступило 20.11.2023 г.

После доработки 17.12.2023 г.

Принято к публикации 18.12.2023 г.

Проведены минералогические и U–Pb (ID-TIMS)-геохронологические исследования гранатов из трех типов скарновых ассоциаций Хову-Аксынское Ag–Bi–Cu–Ni–Co-месторождения (республика Тыва). Полученная U–Pb-оценка возраста граната (404 ± 2 млн лет) близка к выделенному в пределах Тувинского прогиба Алтае-Саянской складчатой области раннедевонскому этапу базитового и щелочно-базитового магматизма. Впервые установлен возраст скарнообразования и связанного с ним раннего этапа оруденения Хову-Аксынское Ag–Bi–Cu–Ni–Co-месторождения.

Ключевые слова: скарны, Хову-Аксынское месторождение, Алтае-Саянская складчатая область, U–Pb (ID-TIMS)

DOI: 10.31857/S2686739724040039

Алтае-Саянская складчатая область является одной из наиболее крупных металлогенических провинций мира, в пределах которых обнаружены многочисленные месторождения кобальта и сопутствующих стратегических металлов [1, 2]. Эталонным месторождением этой провинции является Хову-Аксынское Ag–Bi–Cu–Ni–Co-месторождение, которое детально описано в работах ([2] и ссылки в этой работе), [3–9].

Образование кобальтовых месторождений многими исследователями связывается с эндогенной магматической активностью [1]. В то же время прямые доказательства, указывающие на связь оруденения с тем или иным этапом магматизма, ограничены и базируются главным образом на пространственной близости оруденения и магматических тел. Одним из главных условий, способствующих разработке интегрированных и непротиворечивых моделей формирования рудных месторождений, является

прямое определение возраста рудообразования. Зачастую это является очень сложной задачей для месторождений, связанных с контактово-реакционными породами, в связи с отсутствием в их ассоциации традиционных минералов-геохронометров или их интенсивными поздними изменениями, затрудняющими получение достоверной геохронологической информации. В связи с этим возникает необходимость проведения исследований, направленных на поиски и изучение других минералов, которые могут использоваться для геохронологических исследований.

Месторождение расположено на северной границе Восточно-Таннуольского антиклинория и Тувинского межгорного прогиба. Оруденение контролируется системой разрывных нарушений в зоне пересечения Улатай-Убсунур-Баянкольской и Унгеш-Барынской систем разломов [2]. Месторождение локализовано в горст-антиклинали, ядро которой сложено осадочно-вулканогенными образованиями серлигской свиты нижнего кембрия, а крылья – силурийскими терригенно-карбонатными отложениями верхней подсвиты чергакской свиты и терригенными ондергейской свиты, туфогенно-вулканогенными образованиями кендейской свиты нижнего девона и песчано-мергелисто-алевролитовыми осадками

¹Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия

*E-mail: stifeeva.maria@yandex.ru

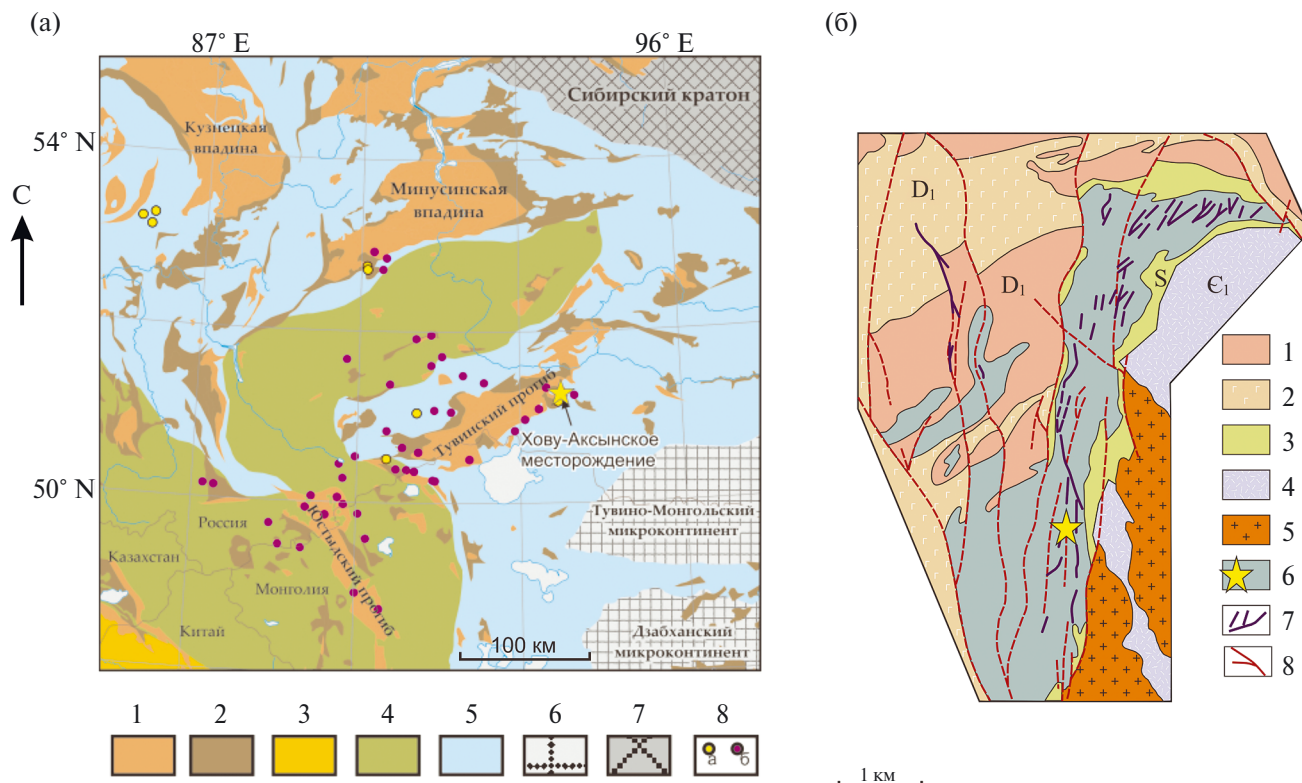


Рис. 1. (а) Распространение эндогенных кобальтсодержащих руд в Алтае-Саянской складчатой области. Составлена с использованием [10]. 1 – Терригенно-карбонатные отложения девона и карбона, 2 – Вулканогенные отложения раннего девона, 3 – Герциниды, 4 – Поздние каледониды, 5 – Ранние каледониды, 6 – Микроконтиненты с докембрийским фундаментом, 7 – Сибирский кратон, 8 – Месторождения и рудопроявления эндогенных кобальтсодержащих руд по базе данных (а) [11] и (б) [1]. (б) Геологическая схема месторождения Хову-Аксынское. 1 – Осадочно-вулканогенные отложения. 2 – Силлы диабазов (D₁). 3 – Терригенные породы, часто с карбонатным цементом, известняки, мергели (S). 4 – Вулканогенные толщи порфировых андезитов-базальтов и их туфов (E₁). 5 – Гранитоиды (E₁₋₂). 6 – Известковые скарны и апоскарновые метасоматиты. Звездочкой отмечен участок отбора проб изученных гранатов из скарнов. 7 – Рудоносные карбонатно-арсенидные жилы. 8 – Крупные разрывные нарушения.

илеморовской свиты живецкого яруса. Указанные стратифицированные толщи прорваны массивами субщелочных гранитов, в экзоконтакте которых силурийские терригенно-карбонатные и нижнедевонские базальные конгломераты “замещены” известковыми гроссуляр-амфибол-пироксен-скаполитовыми скарнами с магнетитом, сульфидами меди, свинца и цинка. С этими породами связано наиболее раннее пирротин-халькопирит-кобальтовое оруденение месторождения. Субщелочные граниты, окружающие их породы и скарны секутся дайками диабазов, плагиоклазовых порфиров, долеритов, сиенит-порфиров и карбонатными жилами с арсенидами кобальта, никеля и железа, сульфидами меди и железа, сульфосолями и самородными серебром и висмутом. После этого происходило формирование безрудной низкотемпературной ассоциации, представленной халцедоном, кварцем, карбонатом, шабазитом, целестином

и, далее, “замещение” гранат-пироксеновых скарнов пренит-полевошпатовыми и кварц-полевошпатовыми породами. С заключительной стадией этих процессов связано образование гнездово-вкрапленной и прожилковой минерализации сульфидов и сульфоарсенидов ([2] и ссылки в этой работе).

Опубликованные данные свидетельствуют о том, что формирование Хову-Аксынское месторождения имеет полихронный характер [2]. К сожалению, данные о возрасте разных этапов формирования Хову-Аксынское Ag–Bi–Cu–Ni–Co-месторождения ограничены, что не позволяет полностью реконструировать историю его образования. По данным [1], возраст серицита (Ar–Ar-метод) из зальбандов карбонатно-арсенидных жил в скарнах (второй этап формирования Хову-Аксынское месторождения) составляет 384 ± 5 млн лет, тогда как возраст

первого этапа его образования пока еще остается загадкой.

Для решения этой задачи выполнены U–Pb (ID-TIMS)-геохронологические исследования граната из скарнов первого этапа рудообразования, с которыми связано наиболее раннее Co–S–As-оруденение Хову-Аксынского месторождения.

U–Pb-геохронологические исследования проведены для гранатов, отобранных из образцов скарнов южного участка Хову-Аксынского месторождения (рис. 1 б). Изучен гранат из трех типов скарнов: 1) скарнированные карбонатно-алевролитовые породы, в которых формируются гранат-кальцитовые гнезда (ХВА-3); 2) линзы гранатосодержащих пород из аргиллитов (ХВА-1 и ХВА-2)); 3) “пятнистые” скарны из девонских конгломератов (ХВА-4).

Состав граната из этих образцов отвечает ряду андрадит-гроссуляр с минимальным содержанием других компонентов (рис. 2). Среди всех изученных проб граната выделяется гранат из “пятнистых” скарнов (пр. ХВА-4), который характеризуется отсутствием зональности и постоянным составом (Andr 97–99%). Тогда как гранат из скарнов в карбонатно-алевролитовых породах (пр. ХВА-3) и линз скарнов в аргиллитах (пр. ХВА-1, ХВА-2) имеет ярко выраженное зональное строение (рис. 2). По вариациям содержаний главных миналов, а также локализации твердофазных и флюидных включений в кристаллах граната из этих проб отчетливо выделяются три зоны: центральная зона с повышенным содержанием андрадитового компонента и подчиненным количеством гроссулярового, которая также характеризуется наличием минеральных включений (пироксен, алланит, кальцит, окислы железа с Zn, Cu и As). Средняя зона, характеризующаяся максимальной площадью в пределах зерен граната, не осложнена “тонкой” ростовой зональностью. В ее пределах сохраняется взаимораспределение основных компонентов (рис. 2), вариации которых проявлены не так резко, в сравнении с центральной зоной кристаллов граната. Внешняя зона с четкой осцилляторной зональностью наиболее характерна для граната из пр. ХВА-3. В этой зоне содержание гроссулярового компонента преобладает над андрадитовым (рис. 2). Наряду с минеральными включениями в центральных зонах присутствуют многочисленные флюидные включения. Границы перехода от центральных зон к средним неровные, отмечаются флюидные включения игольчатой формы, свидетельствующие

о процессе миграции флюида по зонам в пределах зерен. Средняя зона не содержит твердофазных включений и характеризуется редкими флюидными включениями, однако в составе флюида отмечается присутствие карбонатной составляющей. Внешняя зона содержит небольшое количество однородных мелких флюидных включений овальной формы. Кристаллы граната из линз скарнов в аргиллитах (пр. ХВА-1, ХВА-2) и карбонатно-алевролитовых пород (пр. ХВА-3) трещиноваты, причем система трещин затрагивает все три выделенные зоны. Отдельные трещины выполнены карбонатами и окислами железа (с Zn, Cu и As).

Для проведения U–Pb (ID-TIMS)-геохронологических исследований был отобран гранат из трех типов скарнов Хову-Аксынского месторождения (ХВА-2, ХВА-3, ХВА-4). Гранат из пробы ХВА-1 не использовался в дальнейших исследованиях, так как в нем были обнаружены включения алланита, которые способны значительно повлиять на получение корректных U–Pb-геохронологических данных. Процедура предварительной подготовки проб, а также выделение свинца и урана проводились в соответствии с методикой, описанной в [12]. Определение изотопного состава Pb и U выполнены на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом или динамическом (с помощью счетчика ионов) режимах. Точность определения U/Pb-отношений, а также содержаний урана и свинца составила 0.5%. Верхняя граница холостого загрязнения составляла 1 пг U и 15 пг Pb. Последующая обработка полученных экспериментальных данных проводилась в программах “PbDat” [13] и “ISOPLOT” [14]. Расчет возрастов осуществлялся с использованием общепринятых констант распада U [15]. Поправки на обычный Pb вводились в соответствии с модельными величинами [16]. Все ошибки приведены на уровне 2σ .

Результаты первых U–Pb (ID-TIMS)-геохронологических исследований показали, что гранаты из образцов ХВА-2 и ХВА-4 характеризуются крайне низким содержанием урана (<1 мкг/г) и значительной долей обыкновенного свинца (> 80%). Тогда как гранат из пробы ХВА-3 демонстрировал высокий уровень содержания U и низкую долю обыкновенного свинца. Эти характеристики в совокупности с результатами предварительных минералогических исследований, свидетельствующих об отсутствии ураносодержащих включений в гранате из пробы ХВА-3, позволили использовать его для проведения

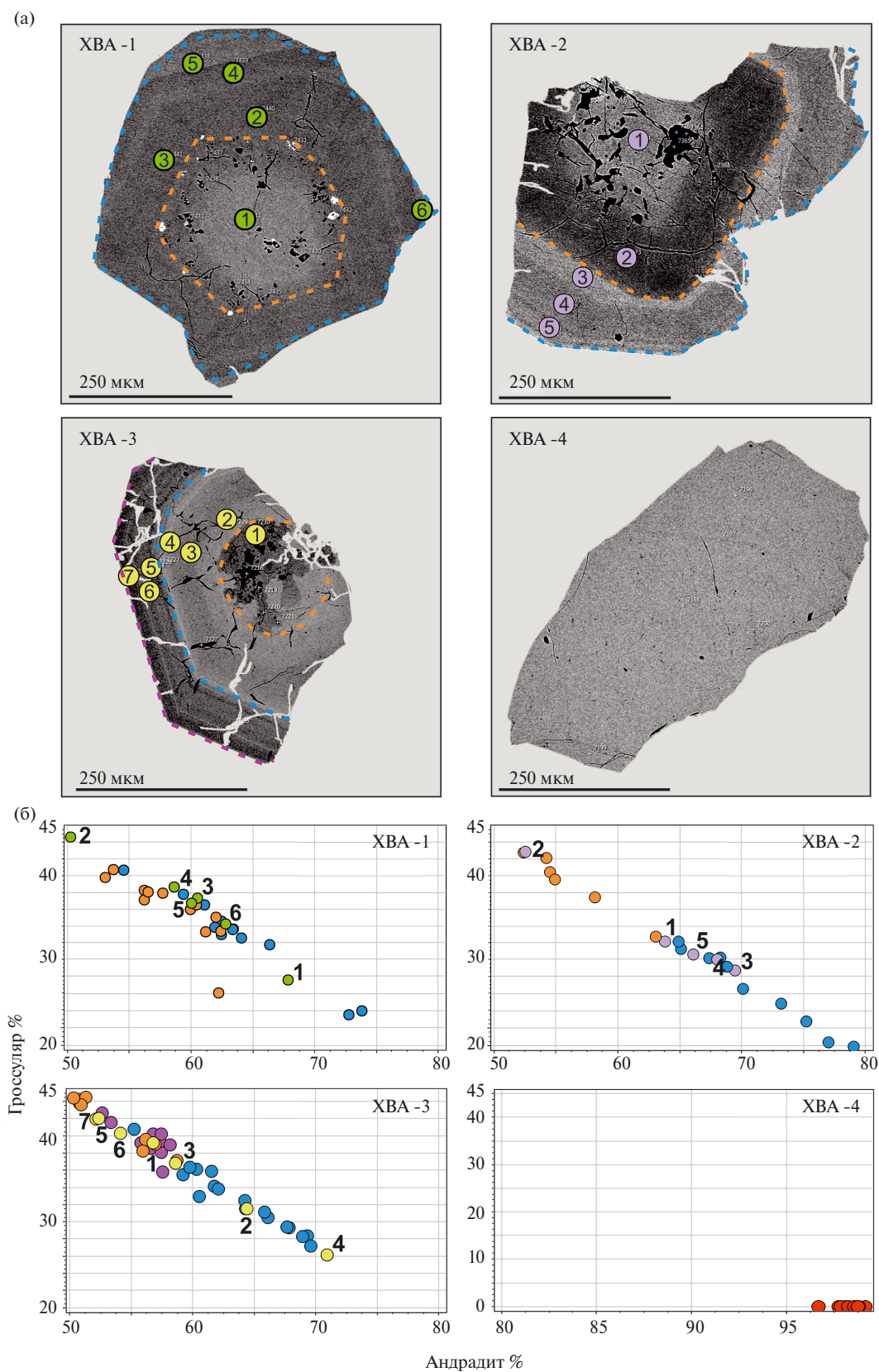


Рис. 2. Электронно-микроскопическое изображение гранатов в режиме вторичных отраженных электронов (а) и диаграммы распределения миналов (андрадит-гроссулярь) в пределах зерен (б).

Таблица 1. Результаты изотопных U–Pb-исследований гранатов из гранат-кальцитовых скарнов в карбонатно-алевролитовых породах Хову-Аксынского месторождения (пр. ХВА-3)

Номер п/п	Навеска, мг	Pb, мкг/г	U, мкг/г	Pbc/Pbt	Изотопные отношения					Rho	Возраст, млн лет		
					$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^a$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}^a$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
1	0.62	0.87	10.76	0.27	126	0.0551±4	0.0231±1	0.4865±30	0.0641±1	0.43	403±2	400±1	415±13
2	0.46	1.88	29.48	0.07	347	0.0564±1	0.0097±1	0.5000±16	0.0643±1	0.51	412±1	402±1	467±7
3	1.69	1.37	12.97	0.42	101	0.0588±3	0.0248±1	0.5279±33	0.0651±1	0.48	430±2	407±1	559±12
4	0.81	1.23	18.46	0.12	379	0.0549±1	0.0073±1	0.4888±14	0.0646±1	0.76	404±1	404±1	407±4

Примечания: ^a изотопные отношения, скорректированные на бланк и обычный Pb; Rho – коэффициент корреляции ошибок. $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$. Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам. Pbc – обычный Pb, Pbt – общий Pb.

дальнейших U–Pb (ID-TIMS)-геохронологических исследований.

В конечном итоге были проанализированы четыре микронавески граната из гранат-кальцитовых скарнов в карбонатно-алевролитовых породах (пр. ХВА-3) Хову-Аксынского месторождения. Этот гранат характеризуется высоким содержанием U (10.76–29.48 мкг/г) и низким уровнем обыкновенного свинца (Pbc/Pbt = 0.07–0.42) (табл. 1). Одна из точек изотопного состава (№ 4, табл. 1) располагается на конкордии (конкордантный возраст составляет 404±2 млн лет, СКВО = 0.35, вероятность

конкордантности 0.55) (рис. 3). Точки состава других навесок граната (№ 1–3, табл. 1) располагаются на дискордии, нижнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 401±8 млн лет (верхнее пересечение составляет 3290±2800 млн лет, СКВО = 4) (рис. 3).

Полученные данные могут свидетельствовать о полихронности формирования Хову-Аксынского месторождения. Первый этап его формирования имеет возраст 404±2 млн лет. Эта оценка возраста сопоставима с имеющимися геохронологическими данными для базитовых и щелочно-базитовых пород раннедевонского

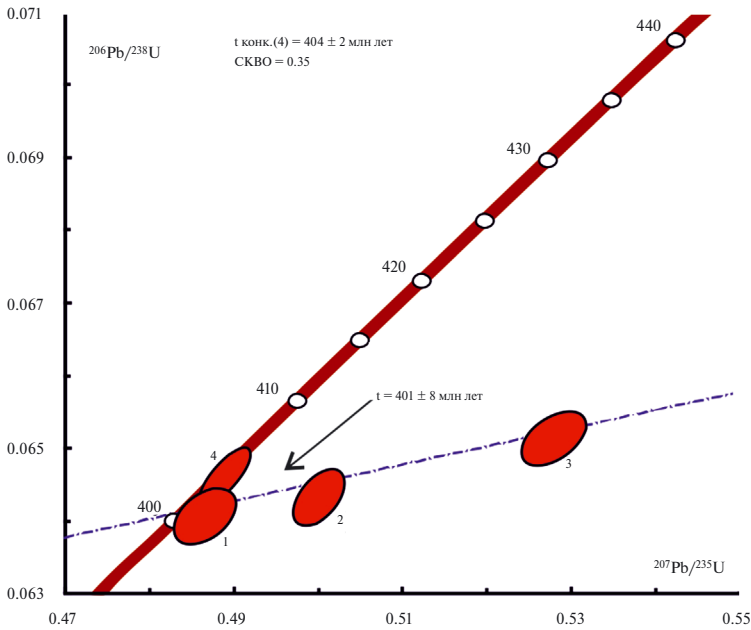


Рис. 3. Диаграмма с конкордией для граната из гранат-кальцитовых скарнов в карбонатно-алевролитовых породах (пр. ХВА-3). Номера точек на диаграмме соответствуют порядковым номерам в табл. 1.

этапа магматизма, проявленного в пределах Тувинского прогиба Алтае-Саянской складчатой области [17, 18]. Второй этап формирования – 384 ± 5 млн лет [1] пока еще не находит объяснения в общей схеме эволюции рудообразующих систем Алтае-Саянской складчатой области. В то же время необходимо учитывать, что оценка Ag–Ag-возраста серицита (384 ± 5 млн лет [1]) получена для двух температурных ступеней выделенного аргона, не составляющих единого возрастного плато, и, соответственно, может рассматриваться в качестве верхнего возрастного ограничения этапа образования рудной минерализации Хову-Аксынского месторождения.

Следует отметить, что на раннедевонском этапе развития Алтае-Саянской складчатой области происходило заложение крупной рифтовой структуры [19], формирование которой сопровождалось проявлением масштабного вулканизма, который многими исследователями рассматривается как результат воздействия мантийного плюма. В целом в пределах Алтае-Саянской складчатой области с раннедевонским этапом связано крупное металлогеническое событие, проявившее себя в формировании огромных по запасам колчеданно-полиметаллических провинций Рудного Алтая, а также, очевидно, и Хову-Аксынского Ag–Bi–Cu–Ni–Co-месторождения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Геохронологические исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ № 22-17-00211, минералогические исследования в рамках плановой темы ИГГД РАН (№ FMUW-2022-0003), а геологические исследования – в рамках плановой темы ИГЕМ РАН (№ FMMN-2021-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Третьякова И.Г., Борисенко А.С., Лебедев В.И. и др. Возрастные рубежи формирования кобальтового оруденения Алтае-Саянской складчатой области и его корреляция с магматизмом // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1379–1395.
2. Лебедев В.И. Хову-Аксынское месторождение арсенидных кобальтовых руд (Республика Тыва, Россия): новые взгляды на проблему возобновления добычи и переработки // Геология рудных месторождений, 2021, Т. 63. № 3. С. 236–264.
3. Богомол Л.Л. Особенности геологического строения и локализации оруденения Ховуаксинского кобальтового месторождения // Геология рудных месторождений. 1970. Т. 12. № 6. С. 30–45.
4. Крутов Г.А. Месторождения кобальта. М.: Госгеол Техиздат, 1959. 232 с.
5. Рудные формации Тувы / В.В. Зайков, В.И. Лебедев, В.Г. Тюлькин и др. Отв. ред. В.А. Кузнецов. Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1981. 201 с.
6. Борисенко А.С., Сотников В.И., Изох А.Э., Поляков Г.В., Оболенский А.А. Пермотриасовое оруденение Азии и его связи с проявлением плюмового магматизма // Геология и геофизика. 2006. Т. 47 (1). С. 166–182.
7. Лебедев В.И., Боровиков А.А., Гущина Л.В., Шабалин С.И. Физико-химическое моделирование гидротермальных процессов рудообразования Ni-Co-As ($\pm$ U-Ag), Co-S-As ($\pm$ Au-W), Cu-Co-As ($\pm$ Sb-Ag) месторождений // Геология рудных месторождений. 2019. Т. 61. № 3. С. 31–63.
8. Кабо А.Е., Коваленкер В.А., Изох А.Э., Жмодик С.М. Термохимическая модель пермотриасовых мантийных плюмов Евразии как основа для обоснования закономерностей формирования и прогноза медно-никелевых, благородно- и редкометалльных месторождений // Геология и геофизика. 2010. Т. 51(9).
9. Коваленкер В.А. Минералого-геохимические закономерности формирования эпitherмальных руд золота и серебра: Автореф. дис. ... д.г.-м.н. М., ИГЕМ РАН. 1995. 102 с.
10. Atlas of geological maps of Central Asia and adjacent areas. Tectonic. Eds: Hwang Jae Ha, Leonov Yu., Li Tingdong, Petrov O.V., Tomurtogoo O. Geological Publishing House, 2008.
11. Atlas of geological maps of Asia and adjacent areas. International project. Eds. O.V. Petrov (VSEGEI), Dong Shuwen (CAGS), E.A. Kiselev, A.F. Morosov (Rosnedra). SPb.: VSEGEI Publishing House, 2016. 48 p.
12. Стифеева М.В., Сальникова Е.Б., Арзамасцев А.А., Котов А.Б., Гроздев В.Ю. Кальциевые гранаты как источник информации о возрасте щелочно-ультраосновных интрузий Кольской магматической провинции // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 72–84.
13. Ludwig K.R. PbDat for MS-DOS, version 1.21 U.S. Geological Survey Open-File Report 88–542. 1991. 35 p.
14. Ludwig K.R. Isoplot 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center Special Publications. 2003. V. 4. 70 p.
15. Steiger R.H., Jäger E., Subcommittee on geochronology: 865 convention of the use of decay constants in geo- and cosmochemistry // Earth and Planetary Science Letters. 1977. V. 36. P. 359–362.

16. *Stacey J.S., Kramers J.D.* Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. V. 26. P. 207–221.
17. *Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Руднев С.Н., Борисов С.М., Войтенко Д.Н.* U-Pb-изохронный возраст финальной стадии проявления щелочно-базитового магматизма в Кузнецком Алатау // *Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудообразования: Материалы II Российской конференции по изотопной геохронологии, Санкт-Петербург, 25–27 ноября 2003 г.* СПб., Центр информационной культуры. 2003. С. 121–124.
18. *Ветров Е.В.* Региональные данные высоко- и низкотемпературной геохронологии магматических комплексов Таннуольского террейна Тувы // *Возраст и корреляция магматических, метаморфических, осадочных и рудообразующих процессов: Материалы VIII Российской конференции по изотопной геохронологии, Санкт-Петербург, 7–10 июня 2022 г.* СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ. 2022. 188 с.
19. *Воронцов А.А., Ярмолюк В.В., Федосеев Г.С., Никифоров А.В., Сандимирова Г.П.* Изотопно-геохимическая зональность девонского магматизма Алтае-Саянской рифтовой области: к оценке состава и геодинамической природы мантийных магматических источников // *Петрология*. 2010. Т. 18. № 6. С. 621–634.

THE AGE OF THE EARLY STAGE FORMATION OF Ag-Bi-Cu-Ni-Co THE KHOVU-AKSYN DEPOSIT (REPUBLIC OF TYVA): U-Pb (ID-TIMS) GEOCHRONOLOGICAL STUDIES OF GARNET

**M. V. Stifeeva^{1, #}, E. B. Salnikova¹, Corresponding Member of the RAS A. B. Kotov¹,
A. V. Nikiforov², Yu. V. Plotkina¹, E. V. Tolmacheva¹**

¹*Institute of Precambrian Geology and Geochronology Russian Academy of Sciences,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

²*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: stifeeva.maria@yandex.ru*

Received November 20, 2023

After revision December 17, 2023

Accepted December 18, 2023

Mineralogical and U-Pb (ID-TIMS) geochronological studies of garnets from three types of scarn associations of the Khovu-Aksyn Ag–Bi–Cu–Ni–Co deposit (Republic of Tyva) were carried out. The U-Pb garnet age estimate (404 ± 2 million years) is close to the Early Devonian stage of basitic and alkaline-basitic magmatism identified within the Tuva trough of the Altay-Sayan folded region. The age of the scarn formation and the associated with it early stage of mineralization of the Khovu-Aksynskoye Ag–Bi–Cu–Ni–Co deposit has been established for the first time.

Keywords: skarn, Khovu-Aksynskoye deposit, Altay-Sayan folded region, U-Pb (ID-TIMS)