

Главные этапы формирования скарновых месторождений Алтае-Саянской складчатой области: результаты U-Pb ID-TIMS исследований граната

Сальникова Е. Б.^{ID}, Стифеева М. В.^{ID}, Котов А. Б.^{ID}

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, katesalnikova@yandex.ru

Аннотация. Представлены результаты U–Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований Ca–Fe-гранатов из рудоносных скарнов Алтае-Саянской складчатой области. На основе геохронологических данных впервые получены «прямые» оценки возраста этапов скарнообразования и рудогенеза для Шалымского, Гранатового, Тарданского и Хову-Аксынского месторождений, а также рудопроявлений Карышской группы. Выделен средне-позднекембрийский (железородный), раннеордовикский (Cu–Mo–W), ордовикско-силурийский (Cu–Au) и раннедевонский (Ni–Co–As) этапы рудоносного скарнообразования в пределах складчатой области. Доказана эффективность использования Ca–Fe-гранатов в качестве надежных минералов-геохронометров для металлогенических реконструкций полихронных месторождений складчатых областей.

Ключевые слова: Алтае-Саянская складчатая область, скарновые месторождения, гранат, U–Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования.

The main stages of the formation of skarn deposits in the Altai-Sayan region: results of U-Pb ID-TIMS garnet studies

Salnikova E. B.^{ID}, Stifeeva M. V.^{ID}, Kotov A. B.^{ID}

Institute of Precambrian geology and geochronology, St. Petersburg, katesalnikova@yandex.ru

Abstract. Results of U–Pb (ID-TIMS) isotopic dating of Ca–Fe garnets from ore-bearing skarns of the Altai-Sayan Fold Belt have been presented. Based on the newly obtained high-precision geochronological data, the direct age constraints of the skarn formation and ore genesis stages were established for the Shalymskoe, Granatovoe, Tardanskoe, and Khovu-Aksynskoe deposits, as well as the objects of the Karyshskaya group. The revealed discrete character of the ore-metasomatic processes allowed to substantiate the Middle–Late Cambrian (iron-ore), Early Ordovician (Cu–Mo–W), Ordovician–Silurian (Cu–Au), and Early Devonian (Ni–Co–As) mineralisation stages in the region. The efficiency of using Ca–Fe garnets as reliable mineral geochronometers for metallogenic reconstructions of polychronous deposits in fold belts has been proven.

Keywords: Altai-Sayan region, skarn deposits, garnet, U–Pb (ID-TIMS) geochronological studies.

Введение

Алтае-Саянская складчатая область (АССО) – крупная структура Центрально-Азиатского складчатого пояса, включающая горные системы Алтая, Восточного и Западного Саяна, Кузнецкого Алатау, Горной Шории, Салаирского кряжа. На территории АССО широко проявлены железорудные, золоторудные, полиметаллические и другие месторождения скарнового типа (Гаськов и др., 2010). Характерной особенностью многих месторождений региона является комплексный характер оруденения. В истории геологического развития АССО можно выделить два главных этапа образования скарновых месторождений: раннепалеозойский этап (кембрий-ордовик) и позднепалеозойский этап (силур-девон). На раннем этапе происходило формирование преимущественно железорудных (кембрий) и полиметаллических (ордовик) месторождений, тогда как золоторудное оруденение формировалось в широком возрастном диапазоне.

Как правило, считается, что возраст оруденения месторождений контактово-реакционного генезиса соответствует возрасту материнских магматических комплексов. Однако в пределах АССО значительное распространение имеют месторождение полигенной и полихронной природы формирования, что требует отдельных детальных геохронологических исследований как руд, так и рудомещающих пород.

В течение последних десяти лет Са–Fe-гранаты успешно используются для U–Pb (ID-TIMS)-геохронологических исследований щелочно-ультраосновных пород и известковых скарнов и зарекомендовали себя как надежные минералы-геохронометры, позволяющие с высокой точностью и достоверностью оценить возраст проявления магматических и гидротермально-метасоматических процессов (Salnikova et al., 2019; Стифеева и др., 2020, 2024, 2025).

Методика исследований

Определение содержаний главных элементов в гранате выполнено в ресурсном центре СПбГУ «Геомодель» с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-3400N с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max20. U-Pb ID-TIMS геохронологические исследования граната выполнены в Лаборатории изотопной геологии ИГГД РАН. Предварительная подготовка проб, а также процедуры выделения свинца и урана проводились по методике, описанной в работе (Стифеева и др., 2020). Для изотопных исследований использован изотопный индикатор ^{202}Pb – ^{235}U . Определение изотопного состава Pb и U выполнено на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом или динамическом (с помощью счетчика ионов) режиме. Точность определения U/Pb отношений, а также содержаний урана и свинца составила 0.5 %. Верхняя граница холостого загрязнения составляла 1 пг для U и 15 пг для Pb. Обработка полученных экспериментальных данных проводилась в программах «PbDat» (Ludwig, 1991) и «ISOPLOT» (Ludwig, 2013). Расчет возраста осуществлялся с использованием общепринятых констант распада U (Steiger, Jäger, 1977). Поправки на обычный Pb вводились в соответствии с модельными величинами (Stacey, Kramers, 1975). Все ошибки приведены на уровне 2σ .

Скарновые месторождения раннепалеозойского возраста

В пределах Алтае-Саянской складчатой области железорудные скарново-магнетитовые месторождения, связанные с контактово-реакционными породами раннепалеозойского возраста, расположены в Горной Шории, Восточном и Западном Саянах, а также в Кузнецком Алатау. Наиболее известными здесь являются магнетитовые объекты Абаканской, Тейской, Ирбинской и Краснокаменской групп. Среди рудных полей Горной Шории выделяется Кондомское, в состав которого входят крупные эксплуатируемые месторождения железной руды – Таштагольское, Шалымское, Шерегешевское и Кочуринское (Вахрушев, 1959). На основании U-Pb геохронологических исследований андрадит-гроссуляра впервые получена прямая оценка возраста проявления контактово-реакционных процессов и сопутствующего железорудного оруденения Шалымского месторождения – 499 ± 1 млн лет (Стифеева и др., 2024). Эти данные свидетельствуют о связи оруденения с этапом субщелочного магматизма средне-позднекембрийского возраста, который ранее не выделялся в пределах западного сегмента АССО. Близкая оценка возраста (503 ± 6 млн лет) получена для андрадита из железорудных скарнов Гранатового месторождения в Ирбинском рудном поле Восточного Саяна (Калинин и др., 2026). Результаты U-Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований граната позволили установить, что формирование скарново-магнетитового оруденения в Восточном Саяне и Горной Шории происходило практически синхронно в кембрийский период. Полученные данные указывают на масштабный, единый этап рудогенеза в регионе. В пользу существования такого глобального события свидетельствует и согласующийся возраст габброидных вулканоплутонических комплексов из других районов АССО (Врублевский и др., 2018). В совокупности с новыми геохронологическими данными это дает веские основания для выделения крупной железорудной металлогенической эпохи, проявленной в рамках аккреционно-коллизийного этапа формирования региона.

С последующим позднекембрийско-раннеордовикским периодом (490–470 млн лет) развития АССО связано проявление интенсивных коллизийных процессов. Внедрение гранитоидных интрузий в это время привело к формированию крупнейших коренных золоторудных узлов, относящихся к золото-скарновому, золото-березитовому и золото-кварцевому типам. Золото-скарновые месторождения раннепалеозойского возраста широко развиты во многих рудных районах – Горном Алтае (Синюхинское, Мурзинское, Чойское), Кузнецком Алатау (Натальевское, Федоровское), Гор-

ной Шории (Майско-Лебедское) и Туве (Тарданское, Копто); большинство из них имеют промышленное значение. Золото-скарновое Тарданское месторождение (Республика Тыва), расположенное в восточной части АССО в пределах Каа-Хемской структурно-формационной зоны, является одним из наиболее известных золоторудных объектов региона. Возраст его оруденения оценивается в 481 ± 6 млн лет (Ar-Ag метод; Гаськов, 2008). Предварительная оценка U-Pb возраста граната из гранат-пироксеновых известковых скарнов составляет около 480 млн лет и отвечает раннему этапу образования минеральных ассоциаций золото-сульфидно-кварцевого месторождения.

Синхронно с этим в пределах восточного склона Кузнецкого Алатау широко проявились контактово-метасоматические процессы раннеордовикского возраста с иной рудной специализацией. К ним относятся Cu-Mo-W месторождения Карышской группы (Дарьинское, Алексеевское, Карышское, Самсон). Оценка возраста (U-Pb ID-TIMS) гранатов из рудоносных известковых скарнов, образованных на контакте Туим-Карышского массива с карбонат-содержащими породами, составляет 476 ± 3 млн лет (Стифеева, 2022) и близка к возраст самого массива (477 ± 5 млн лет, Де Грейв и др., 2011). Близкие оценки возраста получены для гранатов из рудоносных скарнов Дарьинского (471 ± 2 млн лет) и Алексеевского (472 ± 1 млн лет) месторождений.

Скарновые месторождения позднепалеозойского возраста

В пределах АССО известны многочисленные месторождения кобальта и сопутствующих стратегических металлов (Лебедев, 2021). Эталонным объектом этой провинции является Хову-Аксынское Ag-Bi-Cu-Ni-Co месторождение (Республика Тыва). В результате проведенных минералогических и U-Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований гранатов из скарновых ассоциаций Хову-Аксынского месторождения получена оценка возраста граната (404 ± 2 млн лет) (Стифеева и др., 2025). Установленный возраст близок к раннедевонскому этапу базитового и щелочно-базитового магматизма Тувинского прогиба, что подтверждает генетическую связь кобальтового оруденения с магматическими процессами этого возраста. Важно подчеркнуть, что для Хову-Аксынского месторождения впервые получена прямая оценка возраста ранней стадии формирования, что критически важно для понимания эволюции кобальтоносных гидротермальных систем.

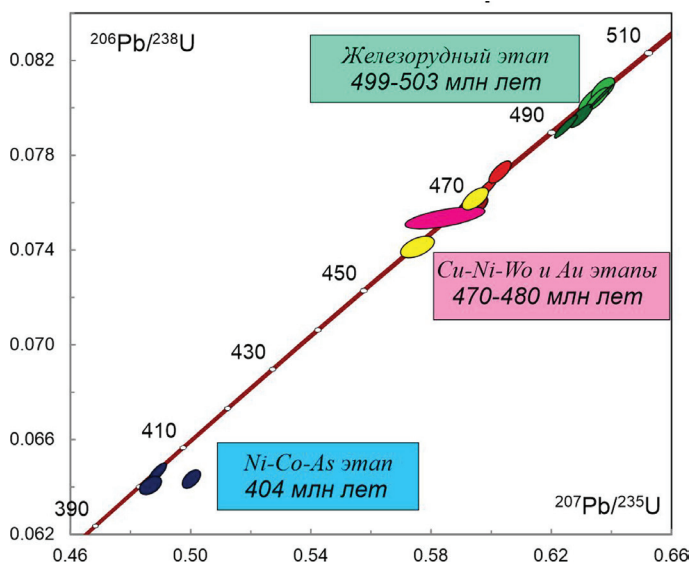


Рис. 1. Диаграмма с конкордией для гранатов из скарновых месторождений Алтае-Саянской складчатой области

Fig. 1. The Concordia diagram for garnet from skarn deposits of the Altai-Sayan Fold Belt

Заключение

U-Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования гранатов из скарнов Алтае-Саянской складчатой области позволили впервые получить прямые оценки возраста ряда рудных объектов (рис. 1). На этой основе выделены среднепозднекембрийский (железорудный), раннеордовикский (478–470 млн лет; Cu-Mo-W), ордовикско-силурийский (Cu-Au) и раннедевонский (Ni-Co-As) этапы рудогенеза. Полученные результаты свидетельствуют о том, что гранаты являются надежным минералом-геохронометром для «прямой» оценки возраста скарновых месторождений, а применение U-Pb ID-TIMS метода обеспечивает необходимую точность для построения корректных металлогенических моделей.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Проекта РНФ №22-17-00211П.

Литература

1. Вахрушев В. А. Генетические типы и минералогия железорудных месторождений Кондомского района (Горная Шория). Новосибирск. Изд-во: СО АН СССР, 1959. 192 с.
2. Врублевский В. В., Гертнер И. Ф., Краснова Т. С. и др. Раннепалеозойские габброидные комплексы Алтае-Саянской складчатой области: геохронология и петрогенезис // Геология и геофизика. 2018. Т. 59, № 5. С. 612–630. <https://doi.org/10.15372/GiG20180501>.
3. Гаськов И. В. Особенности геологического строения и возраст золото-скарнового месторождения Тардан (Республика Тыва) // Доклады АН. 2008. Т. 422, № 6. С. 789–793. <https://doi.org/10.1134/S1028334X0807020X>.
4. Гаськов И. В., Борисенко А. С., Бабич В. В., Наумов Е. А. Стадийность и длительность формирования золоторудной минерализации на медно-скарновых месторождениях (Алтае-Саянская складчатая область) // Геология и геофизика. Т. 51, № 10, С. 1399–1412. <https://doi.org/10.15372/GiG20101004>.
5. Калинин Ю. А., Мазуров М. П., Стифеева М. В., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Руднев С. Н., Плоткина Ю. В., Галанкина О. Л. Первые данные о возрасте месторождений Ирбинского железорудного поля (Восточный Саян): результаты U-Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований граната // Геодинамика и тектонофизика. 2026. Т. 17, № 2. <https://doi.org/10.5800/GT-2026-17-2-0885>.
6. Лебедев В. И. Кобальтовые и сопутствующие стратегические металлогенические провинции Алтае-Саянской складчатой области // Отечественная геология. 2021. № 3. С. 45–58. EDN: YLVTQZ.
7. 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.
8. Стифеева М. В. U-Pb изотопная систематика Ca-Fe гранатов как источник информации о возрасте щелочных, щелочно-ультраосновных комплексов и известковых скарнов: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. СПб., 2022. 19 с.
9. Стифеева М. В., Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Гриценко Ю. Д. Первые данные о возрасте месторождений Кондомского железорудного поля (Горная Шория): результаты U-Pb (ID-TIMS) датирования граната // Доклады РАН. Науки о Земле. 2024. Т. 514, № 2. С. 246–250. <https://doi.org/10.31857/S2686739724020073>.
10. Стифеева М. В., Сальникова Е. Б., Котов А. Б. и др. Возраст рудоносных скарнов Хову-Аксынского Ag–Bi–Cu–Ni–Co месторождения (Республика Тыва) по данным U-Pb датирования гранатов // Геология рудных месторождений. 2025. Т. 67, № 2. С. 134–142. <https://doi.org/10.1134/S107570152502008X>.
11. De Grave J., Buslov M. M., Van den haute P. et al. Early Palaeozoic (~477 Ma) tectonothermal overprint in the Altai-Sayan Foldbelt (Siberia): Evidence from Ar-Ar and U-Pb geochronology // Gondwana Research. 2011. V. 20, No. 2. P. 423–441. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.01.009>.
12. Ludwig K. R. PbDat for MS-DOS, version 1.21 // U.S. Geological Survey Open-File Report 88–542. 1991. 35 p. <https://doi.org/10.3133/ofr88542>.
13. Ludwig K. R. Isoplot 3.75. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel // Berkeley Geochronology Center Special Publications. 2012. V. 5. 75 p.
14. Salmnikova E. B., Chakmouradian A. R., Stifeeva M. V. et al. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // Lithos. 2019. V. 338–339. P. 141–154. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.03.032>.
15. 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. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6).
16. Steiger R. H., Jäger E. Subcommission on geochronology: Convention of the use of decay constants in geo- and cosmochronology // Earth and Planetary Science Letters. 1977. V. 36. P. 359–362. [doi.org](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90011-1).