

**FIRST DATA ON THE AGE OF THE IRBA IRON ORE FIELD (EASTERN SAYAN):
U-Pb (ID-TIMS) GEOCHRONOLOGICAL STUDIES OF GARNET****Yu.A. Kalinin** ¹, **M.P. Mazurov** ¹, **M.V. Stifeeva** ^{2✉}, **A.B. Kotov** ², **E.B. Salnikova** ²,
S.N. Rudnev ¹, **Yu.V. Plotkina** ², **O.L. Galankina** ²

¹ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptuyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, 2 Makarova Emb, Saint Petersburg, 199034, Russia

ABSTRACT. The results presented here concern the U-Pb (ID-TIMS) geochronological studies of garnet from ore-bearing skarns of the Granatovoe deposit (Irba ore field, Eastern Sayan). The studied garnet is represented by polychrome grains. It has been found that the studied garnet is similar in composition to andradite (98–100 %), though some of the parts of the marginal zones show the presence of a grossular component (no more than 5 %). On the boundary of the central zone composed of brown garnet and the periphery of the crystals, there is a zone made up of andradite-grossular garnet, where the aluminum content often exceeds the iron content. Polychrome zonation in garnets from magnetite skarns of the Granatovoe deposit reflects a complex combination of diffusion and infiltration metasomatism. High mobility of iron away from the contact in the early stages of skarn formation gave rise to primary brown andradite in the exoskarn zone. A subsequent increase in metasomatism intensity provided formation of high-aluminous garnet and its growth on early andradite. The granite-hosted molybdenite inclusions are a characteristic feature of the ore association and other iron ore deposits of the Eastern Sayan. Studies have been made of garnet fragments from concentrically zoned polychrome grains. It has been found that the central dark-colored zones of andradite composition are more enriched in uranium (25–29 ppm) than the outer light-colored zones which demonstrate a much lower uranium content (3.5 ppm) and a significant loss of radiogenic lead ($Pb_c/Pb_i=0.67$). A thermal effect on garnet during the late metasomatic processes caused diffusion of lead in the outer zones, while the U/Pb system remained almost unchanged in the central parts. The data obtained are the first "direct" age estimate of magnetite mineralization of the Irba ore field (503 ± 6 Ma; MSWD=1.3). Age consistency between gabbroid volcanoplutonic complexes in other areas of the Altai-Sayan region suggests a simultaneous occurrence of the Early Paleozoic iron ore mineralization within the eastern segment of the Altai-Sayan folded region and gives grounds to recognize the iron-ore metallogenic epoch at the accretion-collision stage of the Altai-Sayan folded region development.

KEYWORDS: U-Pb garnet (ID-TIMS); ore-bearing skarns; Eastern Sayan; Irba ore field; Altai-Sayan folded region; magnetite mineralization; Early Paleozoic complexes

FUNDING: The geological study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (research topic No. FMUW- 2025-0002) and on the state assignment of IGM SB RAS (projects No. 122041400237-8 and No. 122041400044-2). The geochronological study was supported by the RSF (project No. 22-17-00211П). The work was conducted using equipment of the Shared Equipment Center AIRES (IPGG RAS, Saint Petersburg).



EDN: WTNMIL

RESEARCH ARTICLE**Correspondence:** Maria V. Stifeeva, stifeeva.maria@yandex.ru

Received: November 3, 2025

Revised: December 9, 2025

Accepted: December 12, 2025

FOR CITATION: Kalinin Yu.A., Mazurov M.P., Stifeeva M.V., Kotov A.B., Salnikova E.B., Rudnev S.N., Plotkina Yu.V., Galankina O.L., 2026. First Data on the Age of the Irba Iron Ore Field (Eastern Sayan): U-Pb (ID-TIMS) Geochronological Studies of Garnet. *Geodynamics & Tectonophysics* 17 (2), 0885. doi:10.5800/GT-2026-17-2-0885

ПЕРВЫЕ ДАННЫЕ О ВОЗРАСТЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ИРБИНСКОГО ЖЕЛЕЗОРУДНОГО ПОЛЯ (ВОСТОЧНЫЙ САЯН): РЕЗУЛЬТАТЫ U-Pb (ID-TIMS) ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ГРАНАТА

Ю.А. Калинин¹, М.П. Мазуров¹, М.В. Стифеева², А.Б. Котов², Е.Б. Сальникова²,
С.Н. Руднев¹, Ю.В. Плоткина², О.Л. Галанкина²

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

АННОТАЦИЯ. Приведены результаты U-Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований граната из железорудных скарнов Гранатового месторождения (Ирбинское рудное поле, Восточный Саян). Изученный гранат представлен полихромными зернами. Установлено, что состав изученного граната отвечает андрадиту (98–100 %), однако в пределах отдельных участков краевых зон отмечается появление гроссулярового компонента (не более 5 %). На границе центральной зоны, сложенной гранатом коричневого цвета, и периферии кристаллов наблюдается зона, выполненная гранатом андрадит-гроссулярового состава, где нередко содержание алюминия превышает содержание железа. Проявление полихромной зональности в гранатах из магнетитовых скарнов месторождения Гранатового указывает на сложное сочетание диффузионного и инфильтрационного метасоматоза. На ранних этапах скарнообразования в связи с высокой подвижностью железа в удалении от контакта в экзоскарновой зоне образовался первичный андрадит коричневого цвета. С последующим усилением интенсивности метасоматоза происходило формирование более глиноземистого граната, нарастающего на ранний андрадит. Установленные включения молибденита в гранате являются характерной чертой рудной ассоциации и других железорудных месторождений Восточного Саяна. Проведены исследования фрагментов граната из центральных и внешних зон полихромных зерен. Установлено, что центральные темноокрашенные зоны андрадитового состава более обогащены ураном (25–29 мкг/г) в сравнении с внешними светлоокрашенными зонами, которые демонстрируют гораздо более низкое содержание урана (3.5 мкг/г) и значительную потерю радиогенного свинца ($Pb_c/Pb_t=0.67$). В ходе поздних метасоматических процессов гранат испытал температурное воздействие, инициировавшее диффузию свинца во внешних зонах, тогда как в центральных частях U/Pb система осталась практически ненарушенной. Полученные данные являются первой «прямой» оценкой возраста формирования магнетитового оруденения Ирбинского рудного поля (503 ± 6 млн лет; СКВО=1.3). Согласующийся возраст габброидных вулканоплутонических комплексов других областей Алтае-Саянского региона указывает на синхронность проявления раннепалеозойского этапа железорудного рудогенеза в пределах восточного сегмента Алтае-Саянской складчатой области и дает основания выделять железорудную металлогеническую эпоху аккреционно-коллизийного этапа развития Алтае-Саянской складчатой области.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гранат U-Pb (ID-TIMS); железорудные скарны; Восточный Саян; Ирбинское рудное поле; Алтае-Саянская складчатая область; магнетитовое оруденение; раннепалеозойские комплексы

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Геологические исследования проведены при поддержке Минобрнауки РФ (тема НИР № FMUW-2025-0002) и в рамках госзадания ИГМ СО РАН (проекты № 122041400237-8 и 122041400044-2). Геохронологические исследования проведены при поддержке РФФИ (грант № 22-17-00211П). Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП АИРИЗ (ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург).

1. ВВЕДЕНИЕ

Железорудные месторождения, связанные с контактово-реакционными породами, составляют значительную долю среди наиболее богатых месторождений железных руд. В пределах Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) скарново-магнетитовые месторождения локализованы в раннепалеозойских структурах. При этом большая часть известных металлогенических событий в пределах этого региона связана с позднепалеозойским этапом его развития, когда были сформированы многочисленные порфиновые и Cu-Au-скарновые месторождения [Seltmann et al., 2011, 2014; Yakubchuk et al., 2012; Mao et al., 2014; Porter, 2016]. В то же время о раннепалеозойском эта-

пе рудогенеза, проявленном в различных террейнах ЦАСП, известно гораздо меньше [Mihalasky et al., 2015; Berzina et al., 2016, 2019, 2021; Stifeeva et al., 2024].

В пределах западного склона Восточного Саяна на границе с Минусинской впадиной широко развиты контактово-реакционные месторождения железорудной специализации, генетически связанные с интрузиями габброидов и щелочных граносиенитов и гранитов. В Восточном и Западном Саяне и Кузнецком Алатау наиболее известными являются магнетитовые месторождения Абаканской, Тейской, Ирбинской и Краснокаменской групп. Общим для них является не только формационный тип, но и их связь с многофазными дифференцированными габбро-плагиогранитными и

габбро-монциодоритовыми комплексами Алтае-Саянской складчатой области (АССО) [Polyakov, 1971]. Возраст этих комплексов определяли исключительно на основании геологических данных (поздний ордовик) [Kalugin et al., 1981].

В раннепалеозойской истории геологического развития АССО выделяется два главных этапа (островодужный – 545–520 млн лет и аккреционно-коллизионный – 515–435 млн лет), которые определили специфику, характер и состав крупных железорудных, медно-молибден-порфировых, золоторудных и других типов месторождений. Как показали результаты геохронологических исследований, основной объем месторождений связан с аккреционно-коллизионными событиями, проявившимися в раннекаледонских структурах АССО на рубеже от позднего кембрия до позднего ордовика и силура. Этот этап геодинамического развития АССО связан с процессами сочленения островных дуг, задуговых бассейнов и микроконтинентов [Berzin et al., 1994; Berzin, Kungurtsev, 1996] и формированием габброидных и гранитоидных комплексов различного возраста, состава и формационной принадлежности [Vladimirov et al., 1999; Rudnev et al., 2004]. Современные геохронологические исследования базитовых и гранитоидных комплексов Кузнецкого Алатау, Восточного и Западного Саяна, Тувы и других сопредельных регионов показали, что их становление происходило в интервалах 515–495, 480–475 и 460–435 млн лет [Vladimirov et al., 1999, 2001; Shokalskii et al., 2000; Rudnev et al., 2004, 2008, 2024]. На каждом из этих этапов про-

явлены различные по рудной специализации и масштабам типы месторождений. В качестве примера можно привести Ак-Сугское Cu-Mo месторождение в Туве [Sotnikov et al., 2001, 2003; Berzina et al., 2019, 2021] и железорудное месторождение Самсон в Кузнецком Алатау [Rudnev, 2013] позднекембрийского возраста, Сорское Cu-Mo порфировое месторождение позднеордовикского возраста [Sotnikov et al., 2001], Абаканское железорудное месторождение ордовик-силурийского возраста в Западном Саяне [Rudnev et al., 2024], а также ряд крупных и мелких золоторудных месторождений кембро-ордовикского возраста в Горной Шории, Кузнецком Алатау, Восточном Саяне и Туве. В то же время вопрос о возрасте железорудных месторождений АССО остается во многом открытым.

Целью данной работы является оценка возраста образования гранат-магнетитовых скарнов одного из крупнейших в пределах Восточного Саяна Ирбинского скарнового железорудного месторождения. Полученные данные позволят полнее реконструировать историю рудообразования в этом сегменте ЦАСП в раннепалеозойское время.

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИРБИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

Ирбинская группа магнетитовых месторождений расположена в юго-западных отрогах Восточного Саяна, примерно в 100 км к северо-востоку от г. Минусинска (рис. 1). Месторождения железа в данном регионе известны еще с XVII в.

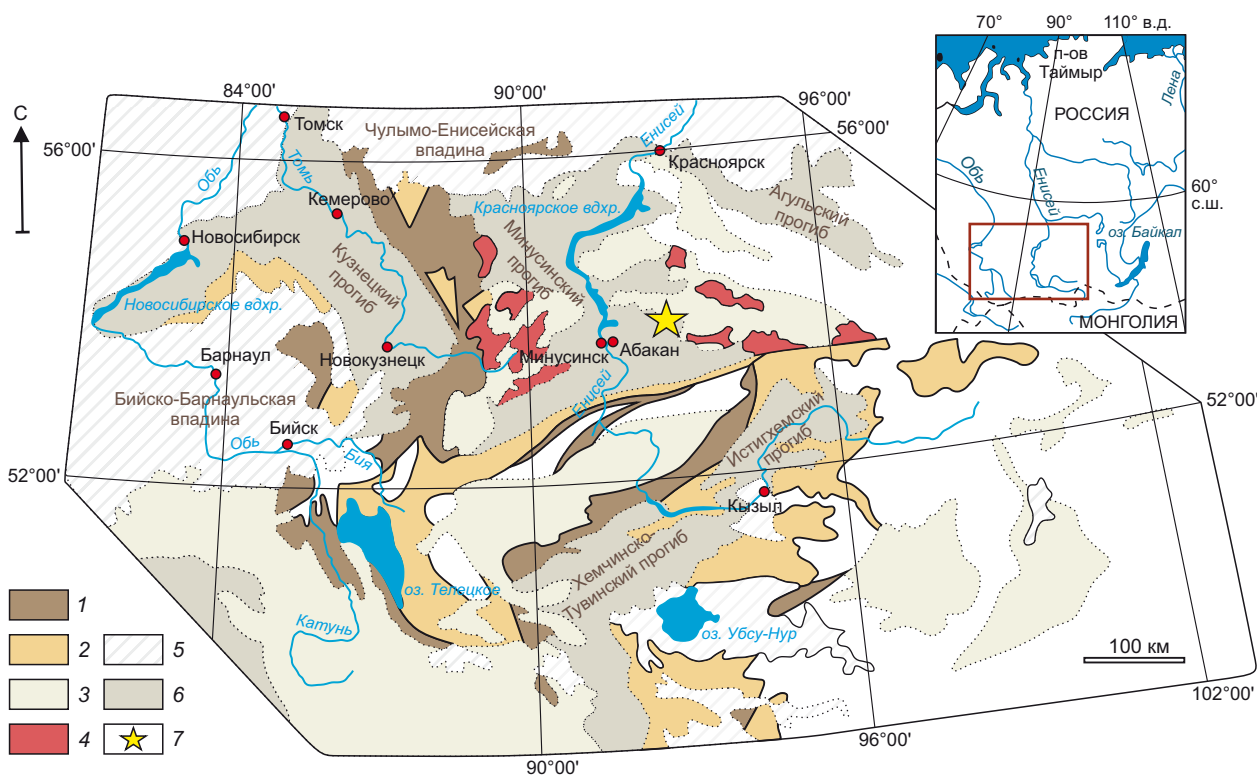


Рис. 1. Схематическая карта вулканических поясов и палеобассейнов Алтае-Саянской складчатой области (по [Rudnev et al., 2013]). 1 – вулканические пояса с окраинноморскими и (или) океанскими ассоциациями; 2 – вулканические пояса с островодужными

ассоциациями; 3 – венд-кембрийские палеобассейны; 4 – раннепалеозойские гранитоидные батолиты; 5 – мезозойско-кайнозойские отложения; 6 – нерасчлененные перекрывающие образования; 7 – Ирбинское рудное поле.

Fig. 1. Schematic map of the volcanic belts and paleobasins of the Altai-Sayan folded region (after [Rudnev et al., 2013]). 1 – volcanic belts with marginal marine and/or oceanic associations; 2 – volcanic belts with island-arc associations; 3 – Vendian-Cambrian paleobasins; 4 – Early Paleozoic granitoid batholiths; 5 – Mesozoic-Cenozoic rocks; 6 – undissected overlying formations; 7 – Irba ore field.

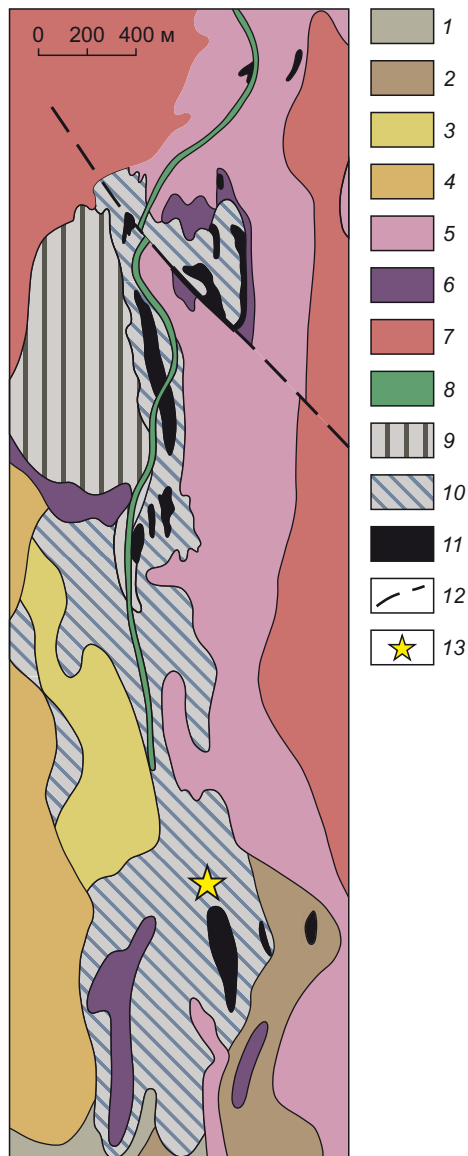


Рис. 2. Геологическая карта Ирбинского рудного поля (по [Kalugin et al., 1981]).

Є₁: 1 – спилиты, диабазовые порфириты, диабазы; 2 – альбитофиры, фельзиты, ортофиры, их кластолавы и туфы; 3 – туфы и эффузивы альбитофиров, ортофиров, андезитовых порфиритов, туфоагломераты с обломками известняков; Є₂: 4 – известняки, туфопесчаники; 5–7 – интрузивные породы: PZ₁ – дорудные: 5 – габбро, диориты, сиенито-диориты, монзониты, 6 – гранодиориты, адамеллиты, граносиениты, гранофиры, плагиограниты; послерудные: 7 – граниты, сиениты, аляскиты, граносиениты; 8 – дайки сиенит-порфиры, ортофиры; 9 – роговики; 10 – известковые скарны; 11 – магнетитовые руды; 12 – дизъюнктивные нарушения; 13 – место отбора проб, месторождение Гранатовое.

Fig. 2. Geological map of the Irba ore field (after [Kalugin et al., 1981]).

Є₁: 1 – spilites, diabase porphyrites, diabase; 2 – albitophyres, felsites, orthophyres, their clastolaves and tuffs; 3 – tuffs and effusives of albitophyres, orthophyres and andesitic porphyrites, tuff agglomerates containing limestone fragments; Є₂: 4 – limestones, tuffaceous sandstones; 5–7 – intrusive rocks: PZ₁: pre-ore: 5 – gabbros, diorites, syenite-diorites, monzonites, 6 – granodiorites, adamellites, granosyenites, granophyres, plagiogranites; post-ore: 7 – granites, syenites, alaskites, granosyenites; 8 – dykes of syenite-porphyr and orthophyre dikes; 9 – hornfelses; 10 – calcareous skarns; 11 – magnetite ores; 12 – disjunctive faults; 13 – sampling site, Granatovoye deposit.

В состав рудного поля входят несколько скарно-магнетитовых месторождений: Безымянное, Центральное, Гранатовое, Таловское и Курское. Они расположены вдоль глубинного разлома (рис. 2), который прослеживается в меридиональном направлении на расстояние около 15 км. Все известные в пределах Ирбинского рудного поля магнетитовые залежи локализованы среди метасоматически измененных пород нижнего кембрия и частично верхнего кембрия. Основу рудного поля составляет крупный меридионально вытянутый останец вулканогенно-осадочных пород кембрия (рис. 2), ограниченный с запада интрузией сиенитов, а с востока – массивом габбро-диорит-гранодиоритов.

Контактово-реакционные образования представлены скарнами, пироксен-плагиоклазовыми и амфибол-эпидот-альбитовыми метасоматитами.

Ранними исследованиями [Dymkin et al., 1975] было установлено, что все магматические породы Ирбинского рудного поля посткембрийские, образованы после главной фазы складчатости. К наиболее древним магматическим образованиям относят рудоносный габбро-диорит-гранодиоритовый массив, прорывающий эффузивные породы андезидацитового комплекса. Согласно имеющимся оценкам K-Ar возраста [Polyakov, 1971; Kryukov et al., 1982; и др.] образование габбро-диорит-гранодиоритов относится к ордовику.

Предполагалось [Bogatsky, 1969; Mazurov, 1970], что формирование магнетитовых месторождений Ирбинского рудного поля происходило в несколько этапов разного возраста. Известковые скарны являются самыми распространенными метасоматическими породами, в которых заключено промышленное магнетитовое оруденение. Главная масса скарновых пород образована в позднемагматический этап становления габбро-диорит-гранодиоритового массива и выделяется под названием «скарны первого этапа». Наиболее полно они представлены на Гранатовом и Центральном месторождениях. Они представляют собой пластовые и линзовидные тела, достигающие 1.5–2.0 км в длину, 0.3–0.7 км в ширину, мощностью 0.1–0.2 км, локализованные в обрамлении габбро-диорит-гранодиоритового массива. Контактново-реакционные процессы затронули ороговикованные порфириты, известняки, туфы, известковистые туфопесчаники, диориты и другие вмещающие породы, что обусловило значительные вариации их текстурно-структурных особенностей и минерального состава. Породообразующими минералами скарнов являются пироксен диопсид-геденбергитового ряда, гранат-гроссуляр-андрадитового состава и волластонит. Из апоскарновых нерудных минералов присутствуют амфиболы, эпидот, хлорит и кварц. Рудные минералы, помимо магнетита и мушкетовита, в основном представлены пиритом, халькопиритом и пирротинном, а из редко встречающихся – сфалеритом, галенитом, пентландитом, арсенопиритом и валлериитом.

3. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

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. Обработка спектров производилась в программном пакете AzTec Energy с применением методики TrueQ. Параметры съемки: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1.7 нА, рабочее расстояние 10 мм, время накопления спектра в точке (в точечном режиме) – 30 с. Количественный расчет спектров проведен с использованием стандартных образцов природных и синтетических соединений.

U-Pb ID-TIMS геохронологические исследования проведены для пяти микронавесок граната из гранат-магнетитовых скарнов Гранатового месторождения (Ирбинское рудное поле). Отбор осуществлялся вручную под биноклем с визуальным контролем внутреннего строения. Предварительная подготовка проб, а также процедуры выделения свинца и урана проводились по методике, описанной в работе [Stifeeva et al., 2020]. 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 состав-

ляла 1 пг для U и 15 пг для Pb. Обработка полученных экспериментальных данных проводилась в программах «PbDat» [Ludwig, 1991] и «ISOPLOT» [Ludwig, 2008]. 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.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Гранат из магнетитовых скарнов представлен полихромными идиоморфными кристаллами, достигающими 3–5 см в диаметре (рис. 3, а, 4, а). Центральные части зерен (>1 мм) темно-коричневого цвета, на тонких сколах появляется зеленоватый оттенок. По периферии зерен происходит резкое изменение окраски в сторону лимонно-желтого цвета. Внешняя тонкая (до 500 мкм) зона отличается красновато-коричневым цветом.

По результатам SEM-EDS исследований установлено, что состав изученного граната отвечает андрадиту (98–100 %), однако в пределах отдельных участков краевых зон отмечается появление гроссулярового компонента (не более 5 %). Кроме того, на границе центральной зоны, сложенной гранатом коричневого

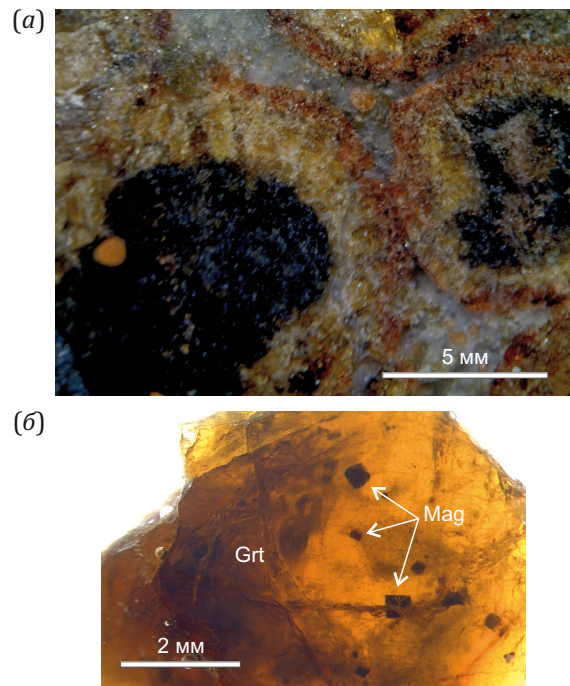


Рис. 3. Микрофотографии граната из гранат-магнетитовых скарнов Гранатового месторождения (в проходящем свете). (а) – полихромный кристалл; (б) – фрагмент внешней зоны кристалла граната с включениями магнетита. Grt – гранат, Mag – магнетит.

Fig. 3. Transmitted-light micrographs of garnet from garnet-magnetite skarns of the Granatovoe deposit. (a) – polychrome crystal; (b) – a fragment from the outer zone of a garnet crystal containing magnetite inclusions. Grt – garnet; Mag – magnetite.

цвета, и на периферии кристаллов наблюдается зона, выполненная гранатом андрадит-гроссулярового состава, где нередко содержание алюминия превышает содержание железа (Al_2O_3 до 13.35 вес. %) (рис. 4, в). Наименее железистой среди полихромных зон является внешняя зона граната, состав которого также отвечает ряду андрадит-гроссуляр. В пределах зоны граната лимонно-желтого цвета установлено присутствие включений рудных минералов – молибденита и магнетита (размер <50 мкм) (см. рис. 3, б).

Для проведения U-Pb геохронологических исследований было использовано пять микронавесок граната: четыре микронавески фрагментов темно-коричневого цвета из центральных частей кристаллов и одна микронавеска фрагментов граната желтого цвета из внешних зон. Гранат темно-коричневого цвета характеризуется высоким содержанием урана (25–

29 мкг/г) (табл. 1, № 1–4), тогда как в гранате желтого цвета содержание урана не превышает 3.5 мкг/г (табл. 1, № 5). Доля обыкновенного свинца (Pb_c/Pb_t) также различна для разных зон: гранат коричневого цвета характеризуется низким содержанием обыкновенного свинца ($Pb_c/Pb_t=0.09-0.19$), для граната лимонно-желтого цвета характерно повышенное содержание Pb_c ($Pb_c/Pb_t=0.67$). Для оценки возраста использовались только результаты, полученные для фрагментов граната коричневого цвета из центральных частей зерен (табл. 1, № 1–4). Как видно из табл. 1 и на рис. 5, для этого граната преимущественно характерна незначительная возрастная дискордантность (0.8–1.3 %). Точки изотопного состава граната образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией отвечает возрасту 502 ± 9 млн лет (нижнее пересечение -55 ± 130 млн лет, СКВО=3.9). При этом средняя

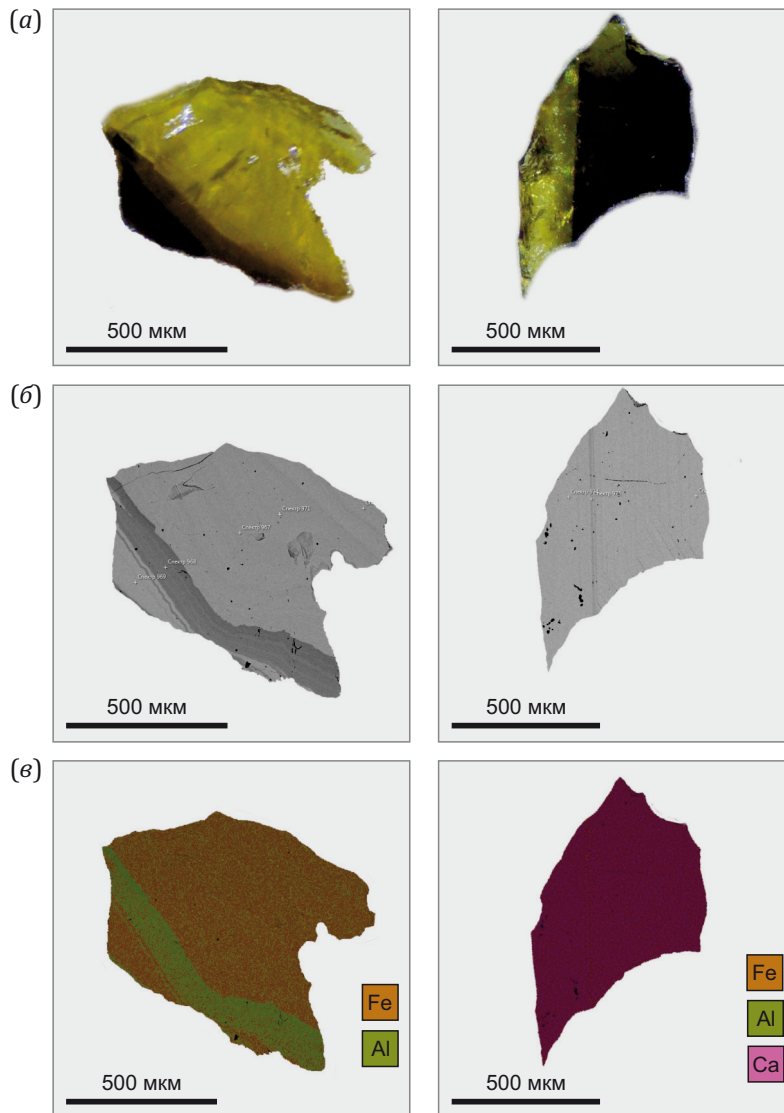


Рис. 4. Микрофотографии полихромных кристаллов граната из гранат-магнетитовых скарнов Гранатового месторождения: (а) – в проходящем свете; (б) – BSE изображения; (в) – SEM-EDS карта распределения основных элементов.

Fig. 4. Micrographs of polychrome garnet crystals from garnet-magnetite skarns of the Granatovoe deposit: (a) – transmitted-light; (b) – BSE images; (c) – SEM-EDS map showing the distribution of major elements.

Таблица 1. Результаты U-Pb геохронологических исследований граната из рудоносных скарнов месторождения Гранатового (Ирбинское рудное поле)

Table 1. Results of U-Pb geochronological studies of garnet from ore-bearing skarns of the Granatovoe deposit (Irba ore field)

№ п/п	Навеска, мг	Pb, мкг/г	U, мкг/г	Pb _c /Pb _t	Изотопные отношения					Rho	Возраст, млн лет		
					²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb
1	1.03	2.28	25.5	0.19	283	0.0573±1	0.0017±1	0.6296±11	0.0797±1	0.79	496±1	494±1	503±2
2	1.54	2.33	28.8	0.10	572	0.0573±1	0.0001±1	0.6365±27	0.0805±3	0.99	500±2	499±2	504±1
3	1.26	1.68	25.0	0.09	541	0.0575±1	0.0016±1	0.5333±16	0.0672±2	0.97	434±1	420±1	511±2
4	2.43	2.07	24.7	0.14	405	0.0572±1	0.0003±1	0.6246±12	0.0792±1	0.92	493±1	491±1	498±2
5*	2.08	0.12	0.53	0.69	41	0.0568±15	0.0105±1	0.5583±90	0.0712±4	0.39	450±12	444±2	485±56

Примечание. Изотопные отношения, скорректированные на бланк и обычный Pb; Rho – коэффициент корреляции ошибок ²⁰⁷Pb/²³⁵U – ²⁰⁶Pb/²³⁸U; Pb_c – обычный Pb; Pb_t – общий Pb. Величины ошибок (2σ) соответствуют последним значащим цифрам после запятой. * – не изображена на диаграмме.

Note. Isotopic ratios corrected for blank and common Pb. Rho – ²⁰⁷Pb/²³⁵U – ²⁰⁶Pb/²³⁸U error correlation coefficient. Pb_c – common Pb. Pb_t – total Pb. The error bars (2σ) correspond to the last significant digits after the decimal point. * – not shown in the diagram.

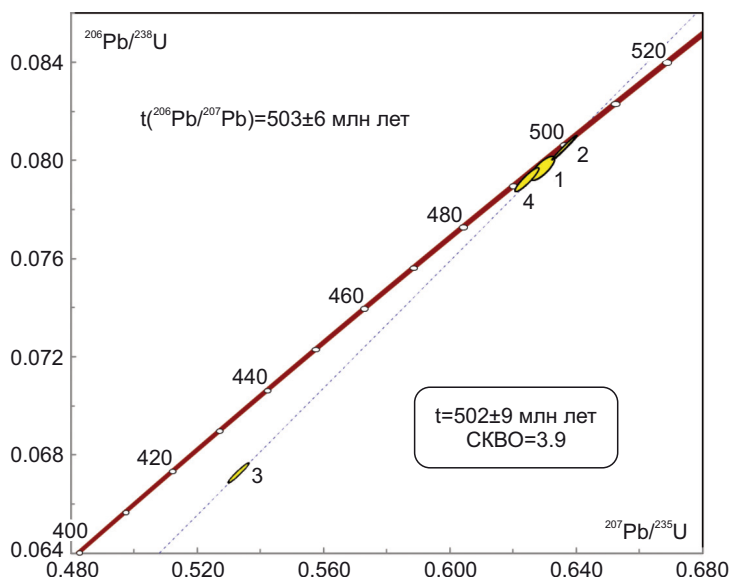


Рис. 5. Диаграмма с конкордией для граната из гранат-магнетитовых скарнов Гранатового месторождения. Номера точек на диаграмме соответствуют порядковым номерам в табл. 1.

Fig. 5. Concordia diagram for garnet from garnet-magnetite skarns of the Granatovoe deposit. Point numbers on the diagram correspond to ordinal numbers in Table 1.

величина возраста, рассчитанная по отношению ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb, для этого граната (табл. 1, № 1, 2, 4) составляет 503±6 млн лет (СКВО=1.3).

5. ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проявление полихромной зональности в гранатах из магнетитовых скарнов месторождения Гранатового указывает на сложное сочетание диффузионного и инфльтрационного метасоматоза [Dymkin et al., 1975]. На ранних этапах скарнообразования в связи с высокой подвижностью железа в удалении от контакта в экзоскарновой зоне образовался первичный андрадит коричневого цвета. С последующим усилением интенсивности метасоматоза происходило формирование более глиноземистого граната, нарастающего на ран-

ний андрадит. Активность компонентов изменялась, по-видимому, постепенно, поскольку ранее образованный андрадит полностью сохраняется. Включения молибденита в скарновых минералах, в том числе и в гранате, являются характерной чертой рудной ассоциации и других железорудных месторождений Восточного Саяна (Кондомское рудное поле) [Vakhru-shev, 1965].

Изучение фрагментов различных зон полихромных гранатов позволило установить, что центральные темноокрашенные зоны андрадитового состава более обогащены ураном в сравнении со светлоокрашенными зонами, которые демонстрируют гораздо более низкое содержание урана и значительную потерю радиогенного свинца. Можно предположить, что в ходе поздних

метасоматических процессов гранат испытал температурное воздействие, инициировавшее диффузию свинца. Эти процессы затронули внешнюю зону полихромных зерен, тогда как в центральных частях U/Pb система осталась практически ненарушенной.

Полученное значение возраста граната из магнетитовых скарнов Ирбинского рудного поля согласуется с полученной по гранату оценкой возраста 499 ± 1 млн лет (U-Pb ID-TIMS) железорудных скарнов Шалымского месторождения (Кондомское рудное поле, Горная Шория) [Stifeeva et al., 2024]. Это указывает на синхронность проявления раннепалеозойского этапа железорудного рудогенеза в пределах восточного сегмента АССО. Близкий возраст габброидных вулканоплутонических комплексов других областей Алтае-Саянского региона [Vrublevskii et al., 2018] дает основания выделять железорудную металлогеническую эпоху аккреционно-коллизийного этапа развития АССО.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания.

7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

8. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Berzin N.A., Kolman R.G., Dobretsov N.L., Zonenshain L.P., Sya Syuchan, Chang E.Z., 1994. Geodynamic Evolution of the Western Part of the Paleo-Asian Ocean. *Russian Geology and Geophysics* 35 (7–8), 8–28 (in Russian) [Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л., Зоненшайн Л.П., Сяо Сючань, Чанг Э.З. Геодинамическая эволюция западной части Палеоазиатского океана // Геология и геофизика. 1994. Т. 35. № 7–8. С. 8–28].

Berzin N.A., Kungurtsev L.V., 1996. Geodynamic Interpretation of Geological Complexes of the Altai-Sayan Region. *Russian Geology and Geophysics* 37 (1), 63–81 (in Russian) [Берзин Н.А., Кунгурцев Л.В. Геодинамическая интерпретация геологических комплексов Алтае-Саянской области // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 1. С. 63–81].

Berzina A.N., Berzina A.P., Gimón V.O., 2016. Paleozoic-Mesozoic Porphyry Cu (Mo) and Mo (Cu) Deposits Within the Southern Margin of the Siberian Craton: Geochemistry, Geochronology, and Petrogenesis (A Review).

Minerals 6 (4), 125. <https://doi.org/10.3390/min6040125>.

Berzina A.N., Berzina A.P., Gimón V.O., 2019. The Aksug Porphyry Cu-Mo Deposit (Northeastern Tuva): Chronology of Magmatism and Ore Formation Processes (U-Pb and Re-Os Isotope Data) and Metallogenic Implications. *Russian Geology and Geophysics* 60 (9), 1060–1075. <https://doi.org/10.15372/RGG2019070>.

Berzina A.N., Berzina A.P., Gimón V.O., 2021. The Aksug Porphyry Cu-Mo Ore-Magmatic System (Northeastern Tuva): Sources and Formation of Ore-Bearing Magma. *Russian Geology and Geophysics* 62 (4), 445–459. <https://doi.org/10.2113/RGG20194115>.

Bogatsky V.V., 1969. Metasomatic Magnetite Deposits of Southern Middle Siberia. In: *Problems in Petrology and Metallogeny of the Western Border of the Siberian Platform*. Krasnoyarsk Book Publishing House, Krasnoyarsk, p. 19–48 (in Russian) [Богацкий В.В. Метасоматические магнетитовые месторождения юга Средней Сибири // Вопросы петрологии и металлогении западного обрамления Сибирской платформы. Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1969. С. 19–48].

Dymkin A.M., Mazurov M.P., Nikolaev S.M., 1975. Petrology and Specific Features of the Formation of Magnetite Deposits in the Irba Ore Field (Eastern Sayan). *Novosibirsk, Nauka*, 185 p. (in Russian) [Дымкин А.М., Мазуров М.П., Николаев С.М. Петрология и особенности формирования магнетитовых месторождений Ирбинского рудного поля (Восточный Саян). Новосибирск: Наука, 1975. 186 с.].

Kalugin A.S., Kalugina T.S., Ivanov V.I., 1981. Iron Ore Deposits of Siberia. *Novosibirsk, Nauka*, 238 p. (in Russian) [Калугин А.С., Калугина Т.С., Иванов В.И. Железорудные месторождения Сибири. Новосибирск: Наука, 1981. 238 с.].

Kryukov A.V., Shelkovnikov A.D., Volobuev M.I., 1982. New Absolute Age Determinations of Rocks in Some Areas of the Krasnoyarsk Krai (Information). In: *Materials on Geology of the Krasnoyarsk Krai. Iss. 3. Western Siberia Geological Survey, Krasnoyarsk*, p. 257–260 (in Russian) [Крюков А.В., Шелковников А.Д., Волобуев М.И. Новые определения абсолютного возраста пород на отдельных районах Красноярского края (информация) // Материалы по геологии Красноярского края. Красноярск: Западно-Сибирское геологическое управление, 1982. Вып. 3. С. 257–260].

Ludwig K.R., 1991. PbDat 1.21 for MS-DOS: A Computer Program for IBM-PC Compatibles for Processing Raw Pb-U-Th Isotope Data. Version 1.07. USGS Open File Report, 35 p.

Ludwig K.R., 2008. ISOPLOT 3.70. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. User's Manual. Berkeley Geochronology Center Special Publication 4, 76 p.

Mao J., Pirajno F., Lehmann B., Luo M., Berzina A., 2014. Distribution of Porphyry Deposits in the Eurasian Continent and Their Corresponding Tectonic Settings. *Journal of Asian Earth Sciences* 79, 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.09.002>.

Mazurov M.P., 1970. Intrusive Magmatism, Metasomatism and Ore Mineralization in the Irba Ore Field (Eastern Sayan). In: Problems of Regional Geology and Petrography of Siberia and Geochemical and Geophysical Methods. Proceedings of the Conference of Young Scientists and Post-Graduates. Iss. 2. Nauka, Novosibirsk, p. 69–72 (in Russian) [Мазуров М.П. Интрузивный магматизм, метасоматоз и железоруденение в Ирбинском рудном поле (Восточный Саян) // Проблемы региональной геологии и петрографии Сибири и методы геохимических и геофизических исследований: Материалы конференции молодых ученых и аспирантов. Новосибирск: Наука, 1970. Вып. 2. С. 69–72].

Mihalasky J., Ludington S., Hammarstrom J.M., Alekseev D.V., Frost T.P., Light T.D., Robinson G.R., Briggs D.A., Wallis J.C., Miller R.J., 2015. Porphyry Copper Assessment of the Central Asian Orogenic Belt and Eastern Tethysides – China, Mongolia, Russia, Pakistan, Kazakhstan, Tajikistan, and India. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5090-X. Reston, USA, 106 p. <https://doi.org/10.3133/sir20105090X>.

Polyakov G.V., 1971. Paleozoic Magmatism and Ore Mineralization in Southern Middle Siberia. Nauka, Moscow, 309 p. (in Russian) [Поляков Г.В. Палеозойский магматизм и железоруденение юга Средней Сибири. М.: Наука, 1971. 309 с.].

Porter T.M., 2016. The Geology, Structure and Mineralisation of the Oyu Tolgoi Porphyry Copper-Gold-Molybdenum Deposits, Mongolia: A Review. *Geoscience Frontiers* 7 (3), 375–407. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.08.003>.

Rudnev S.N., 2013. Early Paleozoic Granitoid Magmatism in the Altai-Sayan Folded Area and the Lake Zone in Western Mongolia. SB RAS Publishing House, Novosibirsk, 300 p. (in Russian) [Руднев С.Н. Раннепалеозойский гранитоидный магматизм Алтае-Саянской складчатой области и Озерной зоны Западной Монголии. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 300 с.].

Rudnev S.N., Babin G.A., Semenova D.V., Travin A.V., 2024. Evolution of Intrusive Magmatism in West Sayan. *Russian Geology and Geophysics* 65 (10), 1161–1176. <https://doi.org/10.2113/RGG20244704>.

Rudnev S.N., Borisov S.M., Babin G.A., Levchenkov O.A., Makeev A.F., Plotkina Yu.V., Serov P.A., Matukov D.I., 2008. Early Paleozoic Batholiths in the Northern Part of the Kuznetsk Alatau: Composition, Age, and Sources. *Petrology* 16 (4), 395–419. <https://doi.org/10.1134/S086959110804005X>.

Rudnev S.N., Kiseleva V.Y., Babin G.A., Kovach V.P., Serov P.A., 2013. The Early Stages of Island-Arc Plagiogranitoid Magmatism in Gornaya Shoriya and West Sayan. *Russian Geology and Geophysics* 54 (1), 20–33. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.12.002>.

Rudnev S.N., Vladimirov A.G., Kruk N.N., Ponomarchuk V.A., Babin G.A., Borisov S.M., 2004. Early Paleozoic Granitoid Batholiths of the Altai-Sayan Folded Region (Lateral-Temporal Zoning and Sources). *Doklady Earth Sciences* 396 (4), 492–495.

Seltmann R., Konopelko D., Biske G., Divaev F., Sergeev S., 2011. Hercynian Post-Collisional Magmatism in the Context of Paleozoic Magmatic Evolution of the Tien Shan Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences* 42 (5), 821–838. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.08.016>.

Seltmann R., Porter T.M., Pirajno F., 2014. Geodynamics and Metallogeny of the Central Eurasian Porphyry and Related Epithermal Mineral Systems: A Review. *Journal of Asian Earth Sciences* 79, 810–841. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2013.03.030>.

Shokalskii S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M., Gusev N.I., Tokarev V.N., Zybin V.A., Dubskii V.S. et al., 2000. Correlation of Igneous and Metamorphic Complexes of the Western Part of the Altai-Sayan Folded Region. GEO, Novosibirsk, 188 p. (in Russian) [Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Борисов С.М., Гусев Н.И., Токарев В.Н., Зыбин В.А., Дубский В.С. и др. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: Гео, 2000. 188 с.].

Sotnikov V.I., Ponomarchuk V.A., Shevchenko D.O., Berzina A.N., 2003. The Aksug Porphyry Cu-Mo Deposit in Northeastern Tuva: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology and Sources of Matter. *Russian Geology and Geophysics* 44 (11), 1119–1132 (in Russian) [Сотников В.И., Пономарчук В.А., Шевченко Д.О., Берзина А.Н. Аксугское порфиоровое месторождение в Северо-Восточной Туве: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ геохронология, источники вещества // Геология и геофизика. 2003. Т. 44. № 11. С. 1119–1132].

Sotnikov V.I., Ponomarchuk V.A., Shevchenko D.O., Berzina A.P., Berzina A.N., 2001. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology of Magmatic and Metasomatic Events in the Sora Porphyry Cu-Mo Ore Cluster (Kuznetsk Alatau). *Russian Geology and Geophysics* 42 (5), 744–785.

Stacey J.S., Kramers J.D., 1975. Approximation of Terrestrial Lead Isotope Evolution by a Two-Stage Model. *Earth and Planetary Science Letters* 26 (2), 207–221. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(75\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0012-821X(75)90088-6).

Steiger R.H., Jäger E., 1977. Subcommittee on Geochronology: Convention on the Use of Decay Constants in Geo- and Cosmochronology. *Earth and Planetary Science Letters* 36 (3), 359–362. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(77\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0012-821X(77)90060-7).

Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Arzamastsev A.A., Kotov A.B., Grozdev V.Yu., 2020. Calcic Garnets as a Source of Information on the Age of Ultramafic Alkaline Intrusions in the Kola Magmatic Province. *Petrology* 28 (1), 62–72. <https://doi.org/10.1134/S0869591120010063>.

Stifeeva M.V., Salnikova E.B., Kotov A.B., Gritsenko Yu.D., 2024. The First Age Data of the Deposits of Kondomsky Iron Ore Field (Gornaya Shoriya): Results of U-Pb (ID-TIMS) Dating of Garnet. *Doklady Earth Sciences* 514 (2), 246–250 (in Russian) [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>.

Vakhrushev V.A., 1965. Mineralogy, Geochemistry and Genetic Groups of the Contact-Metasomatic Iron Ore Deposits in the Altai-Sayan Region. Nauka, Moscow, 292 p. (in Russian) [Вахрушев В.А. Минералогия, геохимия и генетические группы контактово-метасоматических железорудных месторождений Алтае-Саянской области. М.: Наука, 1965. 292 с.].

Vladimirov A.G., Gibsher A.S., Izokh A.E., Rudnev S.N., 1999. Early Paleozoic Granitoid Batholiths of Central Asia: Abundance, Sources, and Geodynamic Formation Conditions. *Doklady Earth Sciences* 369A, 1268–1271.

Vladimirov A.G., Kozlov M.S., Shokal'skii S.P., Khalilov V.A., Rudnev S.N., Kruk N.N., Vystavnoi S.A., Borisov S.M. et al., 2001. Major Epochs of Intrusive Magmatism of Kuznetsk

Alatau, Altai, and Kalba (From U-Pb Isotope Dates). *Russian Geology and Geophysics* 42 (8), 1089–1109.

Vrublevskii V.V., Kotel'nikov A.D., Izokh A.E., 2018. The Age and Petrologic and Geochemical Conditions of Formation of the Kogtakh Gabbro-Monzonite Complex in the Kuznetsk Alatau. *Russian Geology and Geophysics* 59 (7), 718–744. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.07.002>.

Yakubchuk A., Degtyarev K., Maslennikov V., Wurst A., Stekhin A., Lobanov K., 2012. Tectonomagmatic Settings, Architecture, and Metallogeny of the Central Asian Copper Province. In: J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus (Eds), *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World: A Tribute to Richard H. Sillitoe*. SEG Special Publications. Vol. 16. Cengage, Lancaster, p. 403–432.