

На правах рукописи



СТИФЕЕВА Мария Владимировна

**U-Rb ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА Ca-Fe ГРАНАТОВ КАК ИСТОЧНИК
ИНФОРМАЦИИ О ВОЗРАСТЕ ЩЕЛОЧНЫХ, ЩЕЛОЧНО-
УЛЬТРАОСНОВНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ИЗВЕСТКОВЫХ СКАРНОВ**

Специальность: 25.00.09 - геохимия, геохимические методы поисков полезных ископаемых

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Санкт-Петербург - 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук (ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург).

Научный руководитель:	Котов Александр Борисович член-корр. РАН, доктор геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией изотопной геологии ИГГД РАН
Официальные оппоненты:	Зайцев Анатолий Николаевич Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры минералогии Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета; Иванов Алексей Викторович Доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН, руководитель ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН.
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии Карельского научного центра РАН (г. Петрозаводск)

Защита диссертации состоится 19 апреля 2022 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (ФГБУН ИГХ СО РАН) по адресу: 664033, а/я 304, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (<http://igc.irk.ru>).

Автореферат разослан «9» марта 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,
кандидат геол.-мин. наук



Е.В. Канева

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять учёному секретарю совета к.г.-м.н. Каневой Е.В. по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1а и в формате pdf на email: kaneva604@mail.ru.

Введение

Актуальность исследований

Как известно, циркон, бадделеит, рутил, монацит и титанит являются надёжными минералами-геохронометрами для определения абсолютного возраста горных пород U-Pb методом. Однако для щелочных, щелочно-ультраосновных пород и высокотемпературных метасоматических пород их использование часто затруднено ввиду отсутствия этих минералов или их низкой степени сохранности. В связи с этим поиск новых минералов-геохронометров для датирования таких пород является важной и актуальной задачей современной геохронологии. В настоящей работе в качестве потенциальных U-Pb минералов-геохронометров рассматриваются широко распространенные в различных типах изверженных и метасоматических пород урансодержащие Ca-Fe гранаты.

Цель диссертации заключалась в выявлении возможностей и ограничений применения Ca-Fe гранатов в качестве U-Pb минералов-геохронометров для определения возраста щелочных, щёлочно-ультраосновных пород и известковых скарнов.

Задачи исследований:

1. Провести комплексные исследования состава и строения Ca-Fe гранатов из различных типов пород.
2. Разработать оптимальную методику предварительной подготовки Ca-Fe гранатов к проведению U-Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований.
3. Выполнить U-Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования гранатов из разновозрастных щелочных, щёлочно-ультраосновных пород и известковых скарнов, для которых имеются оценки возраста, полученные независимыми методами.

Объекты исследований:

1. Гранаты из магматических пород щелочно-ультраосновных массивов крупнейших изверженных щелочных провинций (Кольская провинция, Маймеча-Котуйская, Восточно-Саянская, Западно-Алданская, Сангиленская, провинция Сьюпериор).
2. Гранаты из известковых скарнов (Дашкесанское железорудное месторождение, Карышская группа Cu-Mo-W месторождений (Туим-Карышский массив), Хову-Аксинское Ni-Co-As месторождение и железомagneзиальных флогопитоносных метасоматитов Алданского щита).

Фактический материал.

Для решения поставленных задач были выполнены U-Pb (ID-TIMS) геохронологические исследования 49 образцов гранатов из 16 реперных магматических комплексов, использовано более 600 анализов гранатов и их минеральных включений на главные и более 100 анализов гранатов на редкие и редкоземельные элементы. Часть проб и образцов гранатов для проведения геохронологических и геохимических исследований любезно предоставлены: А.А. Арзамасцевым (ИГГД РАН), Н.В. Владыкиным (ИГХ СО РАН), В.В. Врублевским (НБ

ТГУ), Ю.Д. Гриценко (МГУ, музей им. Ферсмана), А.В. Никифоровым (ИГЕМ РАН), А.В. Самсоновым (ИГЕМ РАН), А.Р. Шахмурадяном (Университет Манитобы).

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Впервые проведены комплексные (минералогические, геохимические, геохронологические) исследования Са-Fe гранатов из пород различного состава, происхождения и возраста.
2. Получены оценки возраста гранатов из щелочных и щёлочно-ультраосновных пород нескольких магматических провинций: Кольской, Маймеча-Котуйской, Восточно-Саянской, Западно-Алданской, Сангиленской, Сьюпериор.
4. Получены прямые оценки возраста формирования известковых скарнов Дашкесанского железорудного месторождения, Карышской группы Cu-Mo-W месторождений (Туим-Карышский массив) и Хову-Аксинского Ni-Co-As месторождения.
4. Получена «прямая» оценка возраста формирования железо-магнезиальных флогопитоносных метасоматитов Алданского щита.

Практическая значимость работы. Продемонстрирована возможность использования Са-Fe гранатов в качестве U-Pb минералов-геохронометров для широкого спектра магматических и контактово-метасоматических пород. Полученные результаты имеют принципиальное значение для изучения проблемы последовательности и продолжительности процессов магматизма и рудообразования.

Защищаемые положения:

1. По данным U-Pb датирования Са-Fe гранатов, щелочные и щёлочно-ультраосновные магматические комплексы Кольской провинции имеют возраст 373-377 млн лет, Маймеча-Котуйской провинции – 247-250 млн лет, Восточно-Саянской провинции - 639 ± 11 млн лет, Западно-Алданской провинции - 131 ± 1 млн лет, Сангиленской провинции - 492 ± 2 млн лет и провинции Сьюпериор Канадской щита - 2715 ± 4 млн лет и 1800 ± 24 млн лет.
2. U-Pb возраст Са-Fe гранатов из рудоносных известковых скарнов Дашкесанского железорудного месторождения составляет 147 ± 2 млн лет, Карышской группы Cu-Mo-W месторождений - 476 ± 3 млн лет, Хову-Аксинского Ni-Co-As месторождения - 399 ± 2 млн лет и, наконец, железо-магнезиальных флогопитоносных метасоматитов Алданского щита - 1901 ± 5 млн лет.
3. Полученные оценки U-Pb возрастов Са-Fe гранатов из разновозрастных щелочных и щелочно-ультраосновных магматических пород, а также рудоносных известковых скарнов совпадают с оценками их возраста, полученными независимыми методами. Это позволяет рассматривать Са-Fe гранаты как надежные U-Pb минералы-геохронометры, что обусловлено значительным содержанием в них урана, низкой долей обыкновенного свинца и, как правило, высокой устойчивостью их U-Pb изотопной системы в ходе проявления наложенных процессов.

Апробация результатов исследований. Основные результаты исследований были представлены на Всероссийской научно-практической молодёжной конференции "Современные исследования геологии" (Санкт-Петербург, 2016), XXVII и XXVIII Молодёжной научной школе-конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова (Апатиты, 2016; Санкт-Петербург, 2017), V Международной конференции молодых учёных и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (Санкт-Петербург, 2017), VI Российской конференции по изотопной геохронологии (Санкт-Петербург, 2015), VII Российской конференции по изотопной геохронологии (Москва, 2018), Ежегодной международной конференции "Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits" (Saint-Petersburg, 2019), Международной конференции "The Goldschmidt Conference" (Barcelona, 2019), VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия (Санкт-Петербург, 2019).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 27 печатных работ, включая 6 статей в рецензируемых научных журналах и 21 тезисах докладов.

Благодарности.

Автор выражает глубокую и искреннюю благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н. члену-корреспонденту РАН Александру Борисовичу Котову за всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах подготовки и написания диссертации. Автор искренне признателен к.г.-м.н. Екатерине Борисовне Сальниковой за терпение, поддержку и неоценимую помощь в проводимых исследованиях, подготовке и написании диссертации. За всестороннюю помощь автор выражает благодарность своим коллегам и наставникам, сотрудникам лаборатории изотопной геологии ИГГД РАН В.П. Ковачу, Ю.В. Плоткиной, Е.В. Толмачёвой, С.З. Яковлевой, О.В. Якубович. За помощь в подготовке минеральных фракций для проведения исследований автор признателен сотрудникам минералогической группы ИГГД РАН Л.А. Ивановой, Г.В. Платоновой и А.М. Федосеенко. За консультации и ценные рекомендации автор выражает благодарность П.Я. Азимову, А.А. Арзамасцеву, Ю.Д. Гриценко, В.В. Гуржию, А.В. Никифорову, И.М. Пейчевой, В.М. Саватенкову, А.Р. Шахмурадян.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-05-00912, 18-55-18011, 20-55-1807).

Структура и объём диссертации.

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём работы составляет 145 страниц, включая рисунки, таблицы и приложения. Список литературы содержит 126 наименований.

Кристаллохимические особенности и геохимическая характеристика Ca-Fe-гранатов

Гранаты - группа минералов класса силикатов и их аналогов с островной структурой кристаллической решётки. Они относятся к кубической сингонии (пространственная группа Ia3d). Общая структурная формула $\{X_3\}[Y_2](Z_3)\phi_{12}$, где додекаэдрическая позиция $\{X\} = Ca, Na, Mn, Y, Mg, Fe^{2+}$; октаэдрическая позиция $[Y] = Fe^{3+}, Fe^{2+}, Al, Sn, Mn, Mg, Ti, Si, Cr, V, Sc, Zr, U^{6+}, Sb, Te$; тетраэдрическая позиция $(Z) = Si, Al, As, V, Fe^{3+}, Zn, Li, O$, позиция $\phi = O, (OH)$ или F (Grew et al., 2013).

Гранаты являются минералами переменного состава. Они образуются в широком интервале температур, давлений и химического состава минералообразующей среды. Наличие трёх крупнокатионных позиций в структуре способствует реализации различных вариантов изоморфных замещений, в том числе вхождению в структуру актиноидов и лантаноидов. Присутствие «равномерно распределённого» (структурно связанного) урана в различных по составу гранатах установлено с помощью метода треков осколков спонтанного и нейтронно-индуцированного деления (Шуколюков и др., 1970; Комаров и др., 1967). Изоморфное замещение кальция ураном в структуре гранатов носит гетеровалентный характер. Одновременно с вхождением урана в додекаэдрическую позицию $\{X_3\}$, в октаэдрическую $[Y_2]$ и тетраэдрическую (Z_3) позиции входят элементы с пониженной валентностью (Rak et al., 2011). Результаты изучения искусственных соединений со структурой граната (Лавёров и др., 2010) показали, что максимальной ёмкостью в отношении актинидов ферриты со структурой гранатового типа обладают в том случае, когда тетраэдрическая позиция полностью занята Fe^{3+} , а октаэдрическая - Zr (Лавёров и др., 2010). Согласно последней классификации (Grew et al., 2013), существуют две группы гранатов, химический состав которых частично удовлетворяет этим условиям - группа битиклеита и группа шорломита. Они характеризуются либо полным отсутствием (группа битиклеита), либо частичным дефицитом (группа шорломита) кремния в тетраэдрической позиции.

Благодаря устойчивости кристаллической структуры, гранаты успешно используются для определения термодинамических условий образования различных горных пород (Соболев, 1964). Гранаты пироп-альмандин-спессартинового ряда зарекомендовали себя в качестве надёжных Sm-Nd и Lu-Hf минералов-геохронометров для определения возраста метаморфических событий (Johnson et al., 2018; Duchêne et al. 1997; van Breemen and Hawkesworth, 1980; Griffin and Brueckner, 1980).

Первые исследования U-Pb системы в гранатах (Mezger et al., 1989; Burton and O'Nions, 1991; DeWolf et al., 1996) показали невозможность использования метаморфических гранатов альмандин-пиропового состава для получения геохронологической информации ввиду низкого содержания урана и наличия урансодержащих минеральных включений. В тоже время результаты изучения высокотитанистых андрадитов из лампрофиров (Barrie et al., 1990) продемонстрировали потенциальную возможность использования гранатов в качестве U-Pb минералов-геохронометров. Это послужило предпосылкой для продолжения геохронологических исследований гранатов.

Методика исследований. Для решения поставленных задач были выполнены U-Pb геохронологические исследования гранатов из щелочных, щёлочно-ультраосновных пород и известковых скарнов. Для всех гранатов проводилось определение состава главных и редких элементов, изучение морфологических особенностей и строения кристаллов.

Аналитические методики. Изучение морфологических особенностей и строения кристаллов граната проводилось с использованием оптических методов (оптический микроскоп Leica DNLP) и электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N, СПбГУ «Геомодель»). Анализ состава гранатов и включений осуществлялся с помощью микрозондового анализа (сканирующий электронный микроскоп Hitachi S-3400N с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max20, СПбГУ «Геомодель»). Определение содержаний редких и рассеянных элементов, а также U-Th-Pb геохронологические исследования выполнялись методом LA-ICP-MS (ICP-MS ELAN DRC Quadrupole, оснащённый системой лазерной абляции UP193FX New Wave, Геологический институт Болгарской академии наук; LA-ICP-MS Thermo Finnigan Element с лазером Nd-YAG Merchantek, Университет Манитобы (Канада).

Отбор проб гранатов для проведения U-Pb геохронологических исследований осуществлялся под биноклем с визуальным контролем гомогенности выбранных фрагментов (размер фрагментов не более 200 мкм). Проба очищалась от поверхностных загрязнений в ультразвуковой ванне и подвергалась предварительной кислотной обработке 3N - 8N HCl, согласно модифицированной методике (DeWolf et al., 1996). Разложение граната и последующее химическое выделение U и Pb проводилось в соответствии с модифицированными методиками (Krogh, 1973; Horwitz et al., 1992; Corfu and Andersen, 2002).

Определение изотопного состава Pb и U выполнено на многоколлекторном масс-спектрометре Triton TI в статическом или динамическом режимах (при помощи счётчика ионов). Точность определения U/Pb отношений и содержаний U и Pb составила 0.5%. Холостое загрязнение не превышало 15 пг для Pb и 1 пг для U. Обработка экспериментальных данных осуществлялась в программах "PbDat" (Ludwig, 1991) и "ISOPLOT" (Ludwig, 2012). При расчёте возрастов использованы общепринятые значения констант распада U (Steiger et al., 1977). Поправки на обычный Pb приведены в соответствии с модельными величинами (Stacey et al., 1975). Все ошибки приведены на уровне 2σ.

Обоснование защищаемых положений

1. По данным U-Pb датирования Ca-Fe гранатов щелочные и щёлочно-ультраосновные магматические комплексы Кольской щелочной провинции имеют возраст 373-377 млн лет, Маймеча-Котуйской провинции – 247-250 млн лет, Восточно-Саянской провинции - 639±11 млн лет, Западно-Алданской провинции - 131±1 млн лет, Сангиленской провинции - 492±2 млн лет и провинции Сьюперior Канадской щита - 2715±4 млн лет и 1800±24 млн лет, которые согласуются с имеющимися геохронологическими данными.

Кольская щелочная провинция. Изучены гранаты из пород фойдолитовой серии пяти щёлочно-ультраосновных массивов Кольской магматической провинции: Африканда, Ковдор, Вуориярви, Салмагора и Салланлатва. Для всех гранатов характерна тёмная окраска - от чёрной в крупных фрагментах до тёмно-коричневой на тонких сколах. Зёрна граната преимущественно изометричные, часто с хорошо различимыми элементами природной огранки. Состав гранатов из всех пяти массивов соответствует ряду андрадит-шорломит-моримотоит (рис. 1а). Отмечаются примеси циркония (ZrO₂ не более 1.5 вес.%), натрия (Na₂O не более 1.5 вес.%), магния (MgO до 2 вес.%) и ванадия (не более 0.5 вес.%). Гранаты из щелочных массивов

Кольской провинции характеризуются высоким содержанием REE (279-1799 мкг/г) с тенденцией к обогащению MREE (рис. 2а).

Массив Африканда. Гранат входит в число акцессорных минералов практически всех щелочных пород массива Африканда (Chakmouradian et al., 2004). Для геохронологических исследований использован гранат из кальцит-амфибол-пироксеновых пегматоидных пород. Геохронологические исследования проведены для двух навесок граната. Содержание U в них составляет 14.10 и 16.50 мкг/г, Pb - 0.98 и 1.42 мкг/г. Точки изотопного состава изученного граната располагаются на конкордии (рис. 3а), а его конкордантный возраст составляет 377 ± 3 млн лет (СКВО = 0.22). Эта оценка возраста хорошо согласуется с оценками U-Th-Pb-возраста (LA-ICP-MS) перовскита из карбонатитов и пироксенитов массива Африканда (Арзамасцев и др., 2014; Reguir et al., 2010).

Ковдорский массив. Гранат является одним из главных минералов контактово-метасоматических апооливинитовых пород Ковдорского массива. Он характеризуется высоким содержанием урана (12.41 – 21.4 мкг/г) и низкой долей обыкновенного свинца ($Pb_c/Pb_t = 0.07 - 0.08$). Конкордантный возраст граната из апооливинитовых пород Ковдорского массива составляет 377 ± 1 млн лет (СКВО = 1.4) (рис. 3б). Полученная оценка возраста в пределах погрешности хорошо согласуется с U-Pb возрастом бадделеита из карбонатитов (378.5 ± 0.2 млн лет; 380 ± 3 млн лет), U-Pb (LA-ICP-MS) возрастом цирконолита (380 ± 5 млн лет) и перовскита (382 ± 3 млн лет) из пироксенитов Ковдорского массива (Amelin et al., 2002; Баянова и др., 1997; Wu et al., 2010; Арзамасцев и др., 2014).

Массив Вуориярви. Гранат входит в число породообразующих минералов ийолитов и ийолит-уртитов, а также в качестве акцессорных минералов встречается в пегматоидных пироксенитах этого массива. Геохронологические исследования проведены для двух микронавесок граната из пегматоидных пироксенитов. Содержание U в них достигает 6.92 и 15.76 мкг/г. Доля Pb_c (Pb_c/Pb_t) - 0.49 и 0.46. Среднее значение возраста граната, рассчитанного по отношению $^{206}Pb/^{238}U$, составляет 373 ± 2 млн лет (СКВО=0.01). Эта оценка возраста совпадает в пределах погрешности с U-Pb возрастом бадделеита из карбонатитов массива Вуориярви (377 ± 4 млн лет (Bayanova et al., 1997)).

Массив Салмагора. Гранат встречается в виде акцессорного минерала в ийолитах, мельтейгитах и турьяитах этого массива. Для геохронологических исследований использован гранат из крупнозернистых ийолитов. Он характеризуется незначительными вариациями содержания U (6.52 - 8.78 мкг/г). Доля нерадиогенного свинца (Pb_c/Pb_t) не превышает 0.33. На диаграмме с конкордией (рис. 3г) точки изотопного состава изученных микронавесок граната расположены на конкордии (конкордантный возраст - 377 ± 1 млн лет, СКВО = 0.40).

Массив Салланлатва. В ийолитах и пегматоидных породах фойдолитовой серии массива Салланлатва гранат присутствует в качестве породообразующего минерала. Для геохронологических исследований использована микронавеска граната из мелкозернистого ийолита и две микронавески граната из пегматоидного ийолита. Гранат из мелкозернистого ийолита характеризуется низким содержанием U – 5.78 мкг/г и содержит незначительное количество примесного обычного свинца (Pb_c/Pb_t) = 0.24. Конкордантный возраст этого граната - 375 ± 2 (СКВО = 0.01) (рис. 3д). Содержание U в гранатах из пегматоидного ийолита составляет 8.50 – 6.67 мкг/г, а доля Pb_c ($Pb_c/Pb_t = 0.66 - 0.18$). Для одной из микронавесок граната получена конкордантная оценка возраста 378 ± 3 млн лет (СКВО = 0.08) (рис. 3д). Среднее значение возраста, рассчитанное по отношению

($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$) для двух микронавесок граната, составляет 378 ± 1 млн лет и совпадает с оценкой возраста граната из мелкозернистого ийолита (рис. 3д).

Оценки U-Pb возраста гранатов из различных пород фойдолитовой серии пяти массивов Кольской магматической провинции согласуются между собой и находятся в интервале 373-377 млн лет (рис. 3), что соответствует возрастным границам главного этапа формирования Кольской щелочной провинции 380 - 360 млн лет (Kramm et al., 1994).

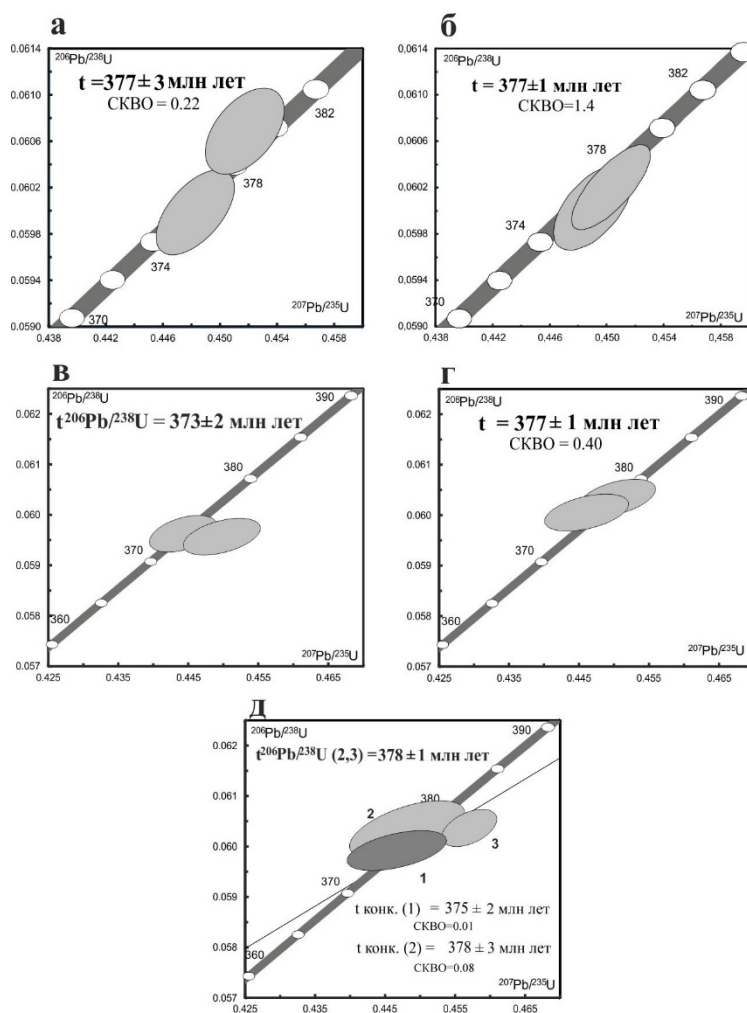


Рис. 3. Диаграммы с конкордией для гранатов из щелочных массивов Кольской щелочной провинции (а – массив Африканда, б – Ковдорский массив, в – массив Вуориярви, г – массив Салмагора, д – массив Салланлатва).

Маймеча-Котуйская щелочная провинция. Кальциевые гранаты являются распространёнными породообразующими и аксессуарными минералами в породах, слагающих массивы Маймеча-Котуйской щелочной провинции. Изучены гранаты из контактово-реакционных зон мелилит-содержащих пород Гулинского массива и пегматоидных пород флогопит-пироксен-мелилитового состава из массива Одихинча. Их состав соответствует ряду андрадит-шорломит-моримотоит (рис. 1а), в качестве примесей присутствуют гроссуляровый, голдманитовый и кальдеритовый компоненты. Данные гранаты характеризуются высокими содержаниями REE (Гулинский массив: 255-483 мкг/г, массив Одихинча: 780-939 мкг/г) с обогащением LREE и MREE (рис. 2а). Отличительной особенностью распределения редкоземельных элементов в гранатах щелочных пород Маймеча-Котуйской провинции является резкое обеднение HREE.

Гулинский массив. Содержание U в гранате из мелилит-содержащих пород Гулинского массива достигает 7 мкг/г, а отношение Pb_c/Pb_t не превышает 0.32. Гранат характеризуется незначительной возрастной дискордантностью (рис.4; № 1, 2). Его возраст по отношению $^{206}Pb/^{238}U$ составляет 247 ± 6 млн лет (СКВО = 1.3) и в пределах погрешности согласуется с возрастом бадделеита из карбонатитов Гулинского массива - 250 ± 0.3 млн лет (Kamo et al., 2003).

Массив Одихинча. Гранат из пегматоидных пород флогопит-пироксен-мелилитового состава массива Одихинча имеет сравнительно высокие содержания U (13.64-16.02 мкг/г); доля обыкновенного свинца (Pb_c/Pb_t) - 0.08 и 0.14. Для него получена конкордантная оценка возраста 250 ± 1 млн лет (СКВО = 0.77)

Оценки возраста гранатов из пород щелочной серии массива Одихинча и Гулинского массива, согласуются между собой и совпадают с U-Pb возрастом бадделеита Гулинского массива - 250 ± 0.3 млн лет (Kamo et al., 2003).

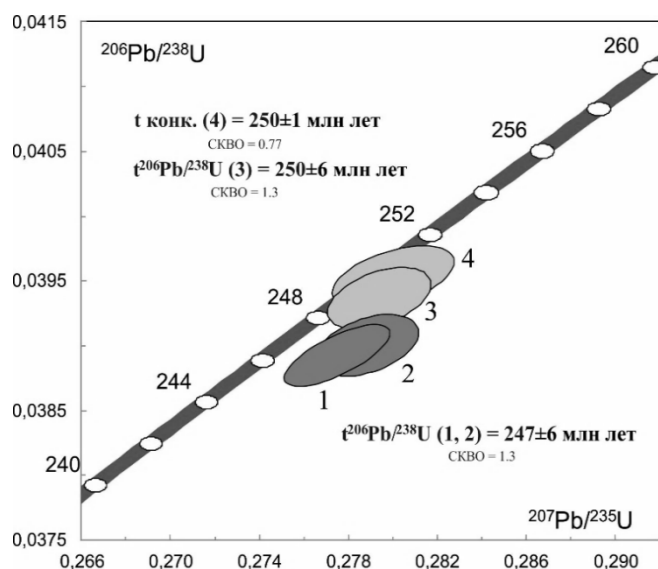


Рис. 4. Диаграмма с конкордией для гранатов из щелочных массивов Маймеча-Котуйской щелочной провинции (1, 2 – Гулинский массив; 3, 4 – массив Одихинча).

Восточно-Саянская щелочная провинция. Белозиминский (Нижне-Саянский) массив щелочно-ультраосновных пород и карбонатитов вмещает крупнейшее редкометальное месторождение Восточно-Саянской провинции. Кальциевые гранаты входят в число породообразующих минералов щелочных пород этого массива. Для U-Pb геохронологических исследований использован гранат из крупнозернистых карбонатсодержащих ийолитов. По химическому составу он соответствует изоморфному ряду андрадит - шорломит – моримотоит (рис. 1а). Также в его составе присутствуют кимцеитовый (до 1.5%), кальдеритовый (до 1.3 %), гольдманитовый (до 1.6%) и гроссуляровый (до 10%) компоненты. Отмечается зональность зёрен граната, выраженная в уменьшении содержания титана от центра к периферии. Гранат обогащен REE. Характерно уменьшение их содержаний от внутренних зон (1467 мкг/г) к краевым зонам (995 мкг/г). Графики распределения REE пологие с незначительным обогащением MREE и идентичны для всех зон кристаллов граната (рис. 2а).

Изученный гранат характеризуется высоким содержанием U (38.8-46.4 мкг/г), низкой долей обыкновенного Pb ($Pb_c/Pb_t = 0.01-0.20$) и незначительной дискордантностью (1.4-4.0%) (рис. 5). Среднее значение возраста ($^{207}Pb/^{206}Pb$) граната составляет 645 ± 6 млн лет (СКВО = 0.41). Эта оценка возраста совпадает

с U-Pb возрастом циркона (643 ± 4 млн лет) из нефелиновых сиенитов (Ярмолюк и др., 2005) и Ar-Ar возрастом флогопита (645 ± 6 млн лет) из анкеритовых карбонатитов Белозиминского массива (Doroshkevich et al., 2016).

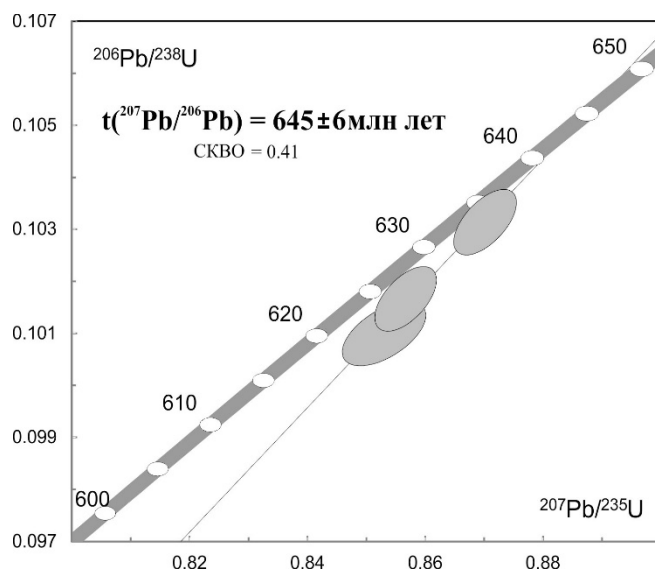


Рис. 5. Диаграмма с конкордией для граната из крупнозернистых карбонатсодержащих ийолитов Белозиминского массива.

Западно-Алданская щелочная провинция. Мурунский массив щелочных пород и карбонатитов является крупнейшим массивом Западно-Алданской провинции калиевых щелочных пород. Для геохронологических исследований использованы гранаты из кальсилитовых ийолитов и пироксен-микроклиновых пегматитов с кальсилитом этого массива.

Состав граната из кальсилитовых ийолитов соответствует ряду андрадит-моримотоит-шорломит с преобладанием андрадитового компонента (48.4-73.4%) (рис. 1а). В качестве второстепенных компонентов присутствуют кимцеитовый (до 3.51%) и голдманитовый (до 1.65%) миналы. В гранате обнаружены редкие включения сульфидов (пирит, халькопирит), апатита и карбонатных минералов. Содержание REE в гранате сравнительно невысокое (437-580 мкг/г). Наблюдается резкое обеднение LREE ($[La/Sm]_N = 0.07-0.09$), ($[Gd/Yb]_N = 1.44-1.60$) (рис.2а).

Состав граната из пироксен-микроклиновых пегматитов также отвечает ряду андрадит-моримотоит-шорломит. От граната из кальсилитовых ийолитов он отличается более высоким содержанием андрадитового компонента (58.07-81.83%) (рис. 1а) и характеризуется более высоким содержанием REE (782-1447 мкг/г) и незначительным обеднением LREE ($[La/Sm]_N = 0.11-0.14$, ($[Gd/Yb]_N = 2.04-3.81$). Включения в гранате представлены мелкими зернами сульфидов.

Гранат из ийолитов характеризуется высоким содержанием урана (45.59-62.26 мкг/г) и высокой долей обыкновенного свинца ($Pb_{302}/Pb_{300} = 0.50-0.55$). Гранат из пегматитов содержит меньше урана (4.84-15.85 мкг/г), но в нем также отмечается высокое содержание обыкновенного свинца (до 42%), скорее всего, обусловлено присутствием захваченных в ходе его кристаллизации включений сульфидов. Для корректировки полученных изотопных данных (рис. 6) были введены поправки на изотопный состав свинца галенитов из различных пород Мурунского массива (Владыкин и др., 1995). В результате для граната из кальсилитовых ийолитов по нижнему пересечению дискордии с конкордией получена оценка возраста 130 ± 1 млн лет (СКВО=1.03), а для граната из

пироксен-микроклинового пегматита - 131 ± 1 млн лет (СКВО=1.7) (рис. 6). Они в пределах погрешности согласуются с оценками Ar-Ar возраста (113 - 133 млн лет) для токкоита, тинаксита, франкаменита и микроклина из чароитсодержащих пород Мурунского массива (Иванов и др., 2018).

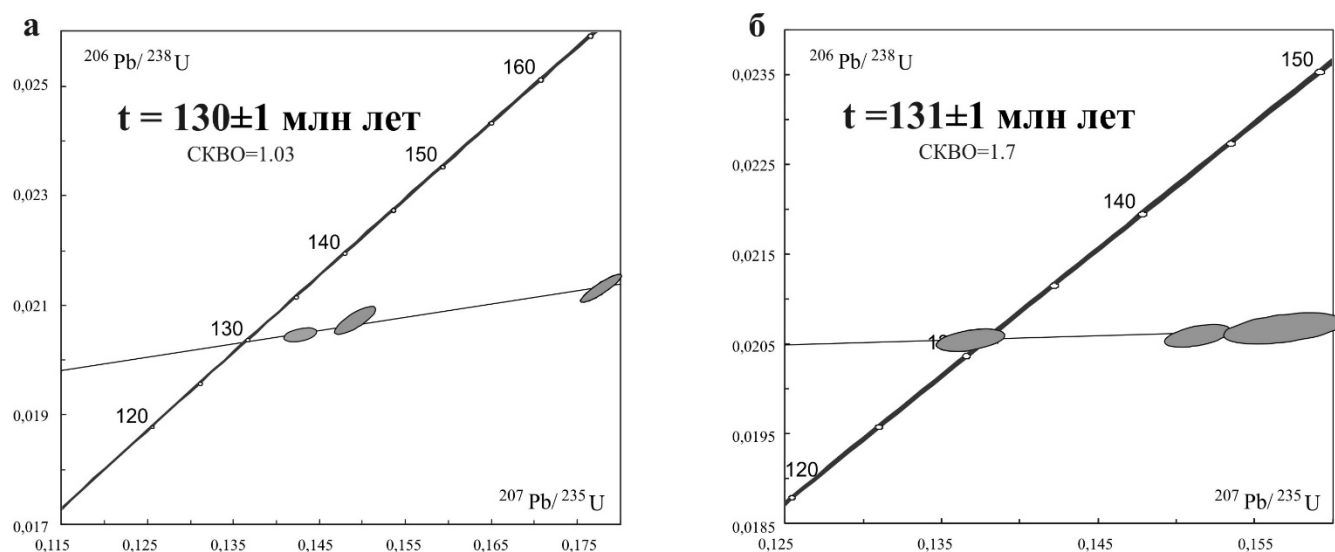


Рис. 6. Диаграммы с конкордией для граната из щелочных пород Мурунского массива (а – кальсилитовые ийолиты, б – пироксен-микроклиновые пегматиты). Примечание: * - точки изотопного состава без корректировки на изотопный состав свинца галенитов.

Сангиленская щелочная провинция. В пределах Сангиленской (Тувинно-Монгольской) щелочной провинции выделяется несколько этапов щелочного магматизма. С одним из них связано формирование Чикского массива, сложенного ийолит-уртитамы, ийолитами и мельтейгитами. Гранат является распространённым минералом ийолитов. Его содержание в породах варьирует в пределах 5-10%. Состав граната соответствует ряду андрадит-моримотоит-шорломит, в качестве примеси присутствует гроссуляровый минерал (7-19%) (рис. 1а). Содержания андрадитового компонента уменьшается от центральных частей к краям зерен. В гранате присутствуют редкие включения магнетита, титанита и графита. Он характеризуется высоким содержанием REE (747-793 мкг/г), обеднением LREE ($[\text{La}/\text{Sm}]_N = 0.06-0.07$) и обогащением HREE ($[\text{Gd}/\text{Yb}]_N = 0.69-0.79$) (рис. 2а).

Гранат из ийолитов Чикского массива характеризуется сравнительно высокими содержаниями урана (14.50-16.40 мкг/г) и низкой долей обыкновенного свинца ($\text{Pbc}/\text{Pbt} = 0.07-0.1$). Его конкордантный возраст (рис. 7) составляет 492 ± 2 млн лет (СКВО=0.01, вероятность - 92%) и совпадает с Sm-Nd изохронным возрастом, определённым для апатита и граната из этой же пробы - 489 ± 9 млн лет (СКВО=0.86) (Сальникова и др., 2018).

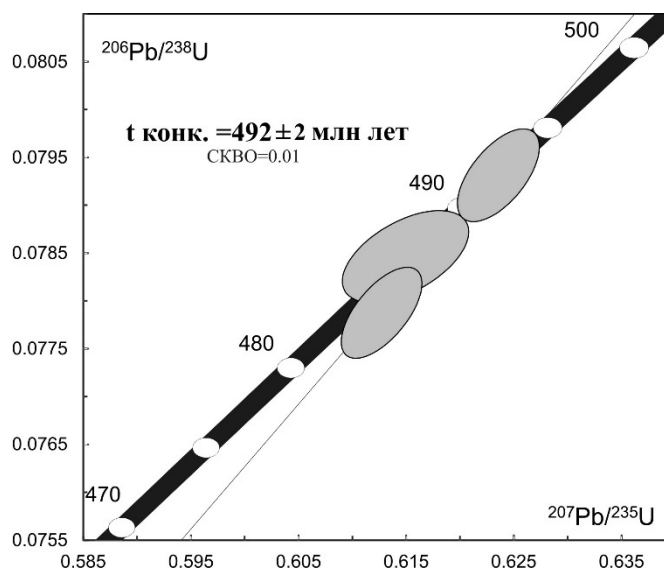


Рис. 7. Диаграмма с конкордией для граната из ийолита Чикского массива.

Провинция Сьюпериор. В провинции Сьюпериор (Канадский щит) изучены массивы Эден Лейк и Синдер Лейк. Их образование связано с различными этапами постколлизийного щелочного магматизма, проявленного в данном регионе.

Массив Синдер Лейк (зеленокаменный пояс Оксфорд-Лейк – Кни-Лейк) сложен главным образом сиенитами, карбонатитами и лампрофирами (Chakmouradian et al., 2008a). Гранат является типичным аксессуарным минералом сиенитовых пород. Для проведения геохронологических исследований использован гранат из пегматоидного сиенита. Его состав соответствует андрадиту (60.01-62.14%) с присутствием шорломитового (14.32-14.88%), моримотоитового (17.37-19.65%), кимцеитового (0.73-0.88%) и кальдеритового (1.29-1.41%) компонентов (рис. 1а). Он характеризуется высоким содержанием ΣREE (1800-4000 мкг/г) с обогащением MREE ($(\text{Sm/La})_N = 11.65-13.34$) (рис. 2а).

Гранат из пегматоидного сиенита характеризуется высоким содержанием U (6.73-13.63 мкг/г) и низкой долей обыкновенного свинца ($\text{Pbc/Pbt} < 0.12$). Точки его изотопного состава образуют дискордию, верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 2715 ± 4 млн лет (нижнее пересечение составляет 120 ± 49 млн лет, СКВО = 1.17) (рис. 8). Полученные данные хорошо согласуются с возрастом цирконов из монцогранитов (2721 ± 16 млн лет (Kressall et al., 2010)) и вишневитовых сиенитов (2705 ± 2 млн лет; Chakmouradian et al., 2008a) рассматриваемого массива.

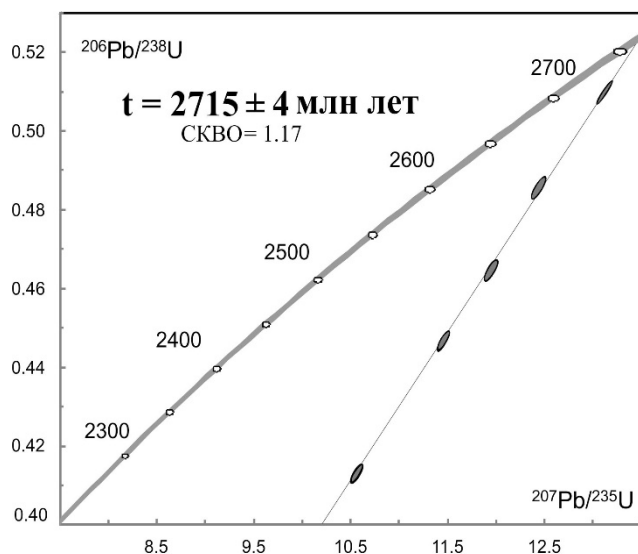


Рис. 8. Диаграмма с конкордией для граната из пегматоидного сиенита массива Синдер Лейк.

Массив Эден Лейк (Транс-Гудзонский ороген) сложен различными по составу сиенитами и карбонатными породами (Chakmouradian et al., 2008b; Mumin, 2002). Гранат является продуктом контактово-метасоматических процессов в реакционных зонах между щелочными и карбонатными породами. Состав граната соответствует андрадиту с примесью спессартинового (до 1.52%) и альмандинового (менее 0.5%) компонентов (рис. 1а). Распределение REE в пределах зёрен граната неоднородное. Центральные зоны зерен характеризуются более высокими содержаниями REE (1406-1849 мкг/г) с обогащением HREE ((Gd/Yb)_N = 0.52-0.90). Краевые части зёрен значительно обеднены REE (557-855 мкг/г) и характеризуются пониженным содержанием HREE ((Gd/Yb)_N = 0.97-3.99) и большим содержанием LREE (рис. 2а).

Гранат из массива Эден Лейк характеризуется сравнительно высоким содержанием U (4.08-5.09 мкг/г) и низкой долей обыкновенного свинца (Pbc/Pbt = 0.03-0.37). Точки его изотопного состава располагаются на дискордии, верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 1800±24 млн лет, а нижнее - 816±450 млн лет (СКВО = 0.45) (рис. 9). Эта оценка возраста в пределах погрешности согласуется с возрастом циркона из карбонатитов массива Эден Лейк (Шахмурадян А.Р., неопубликованные данные).

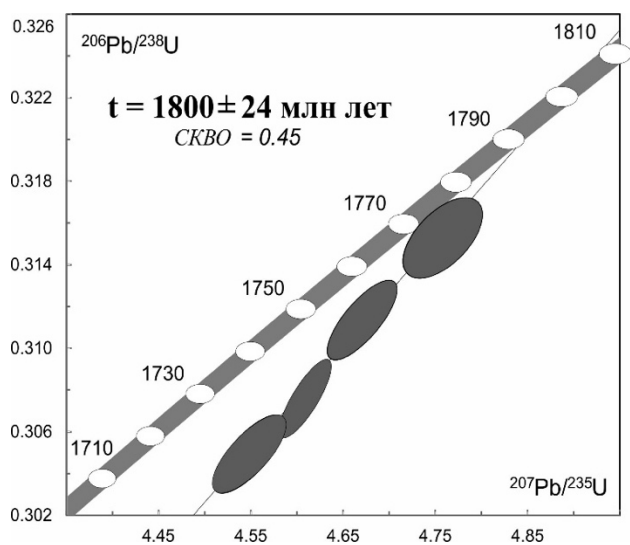


Рис. 9. Диаграмма с конкордией для гранатов из контактово-реакционных пород массива Эден Лейк.

2. *U-Pb* возраст Ca-Fe гранатов из рудоносных известковых скарнов Дашкесанского железорудного месторождения составляет 147 ± 2 млн лет, Карышской группы Cu-Mo-W месторождений - 476 ± 3 млн лет, Хову-Аксинского Ni-Co-As месторождения - 399 ± 2 млн лет и, наконец, железо-магнезиальных флогопитоносных метасоматитов Алданского щита - 1901 ± 5 млн лет, что соответствует имеющимся представлениям об их возрасте.

Скарны Дашкесанского железорудного месторождения. Гранат является породообразующим минералом рудоносных известковых скарнов Дашкесанского месторождения. Его химический состав соответствует ряду андрадит-гроссуляр, с преобладающим количеством андрадитового компонента (60-86 %); в незначительных количествах присутствуют спессартин (2-3 %), моримотоит (0.1-4.0 %), хатчеонит (0.1-3.4 %) и альмандин (0.1-3.8 %) (рис. 16). Содержание REE в гранате изменяется в пределах 151-366 мкг/г. Наблюдается уменьшение содержания элементов данной группы от центра к периферии зёрен. Характерно обогащение MREE ($[La/Sm]_N = 0.12-0.21$) и значительное обеднение HREE ($[Gd/Yb]_N = 2.24-19.35$) (рис. 26).

Изученный гранат характеризуется сравнительно высокими содержаниями U (8.16-8.47 мкг/г), низким содержанием Pb (0.24-0.29 мкг/г) и низкой долей обыкновенного Pb ($Pb_c/Pb_t = 0.01-0.17$). Две точки изотопного состава граната располагаются на конкордии (конкордантный возраст - 147 ± 2 млн лет, СКВО=0.87, вероятность конкордантности 0.35) (рис. 10). Одна из точек изотопного состава находится несколько правее конкордии (рис. 10). Среднее значение возраста ($^{206}Pb/^{238}U$), рассчитанное для трех проанализированных микронавесок граната, составляет 147 ± 3 млн лет (СКВО=4.5).

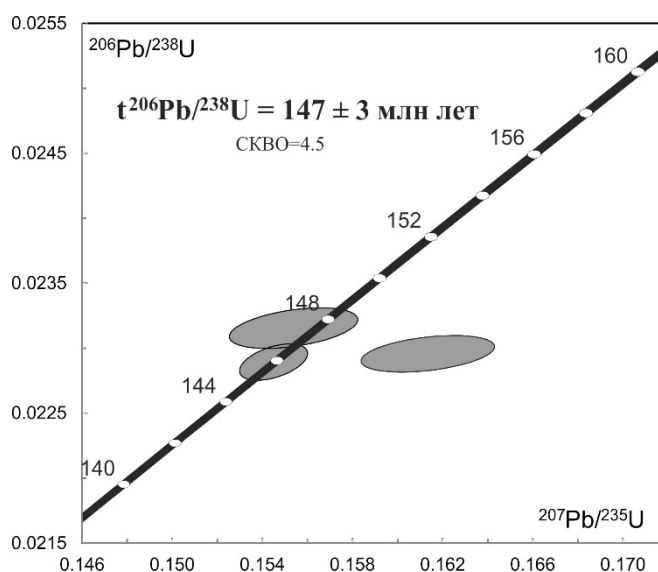


Рис. 10. Диаграмма с конкордией для граната из скарнов Дашкесанского железорудного месторождения.

Для граната из скарнов месторождения Дашкесан также были проведены U-Th-Pb (LA-ICP-MS) геохронологические исследования. Полученная оценка возраста (143 ± 5 млн лет) в пределах погрешности совпадает с результатами датирования U-Pb методом (ID-TIMS).

Возраст граната из скарнов Дашкесанского месторождения (147 ± 2 млн лет) согласуется с позднеюрским возрастом полифазного Дашкесанского магматического комплекса (Жеримов и др., 2009; Мустафаев, 2007;

Садыхов, 2019) и свидетельствует о формировании железорудной ассоциации месторождения на рубеже юрского и мелового этапа эндогенной активности региона.

Скарны Карышской группы Cu-Mo-W месторождений (Туим-Карышский массив). На контакте Туим-Карышского массива гранодиоритов и вмещающих его метаморфизованных карбонатсодержащих пород локализованы известковые рудоносные скарны, с которыми связана Карышская группа Cu-Mo-W месторождений. Химический состав граната этих скарнов соответствует андрадиту (93-97%) с незначительным количеством гроссулярового компонента (не более 5%) (рис. 16). Содержание REE не превышает 150 мкг/г. Гранат характеризуется низким содержанием HREE, значительным обогащением LREE ($[La/Sm]_N = 22.3-60.9$) (рис. 26), высоким содержанием U (12.55-41.31 мкг/г) и низкой долей обыкновенного свинца ($Pb_c/Pb_{tot} = 0.08-0.12$). Для него получена конкордантная оценка возраста 478 ± 4 млн лет (СКВО=0.62). Среднее значение возраста ($^{207}Pb/^{206}Pb$) граната всех проанализированных микронавесок составляет 476 ± 4 млн лет (СКВО=0.38).

Полученные оценки возраста образования скарнов хорошо согласуются с U-Pb (ID-TIMS) возрастом циркона (470 ± 4 млн лет) из кварцевого диорита (Руднев и др., 2002) и U-Th-Pb (LA-ICP-MS) возрастом циркона (477 ± 5 млн лет) из гранодиоритов Туим-Карышского массива (De Grave J. et al., 2011).

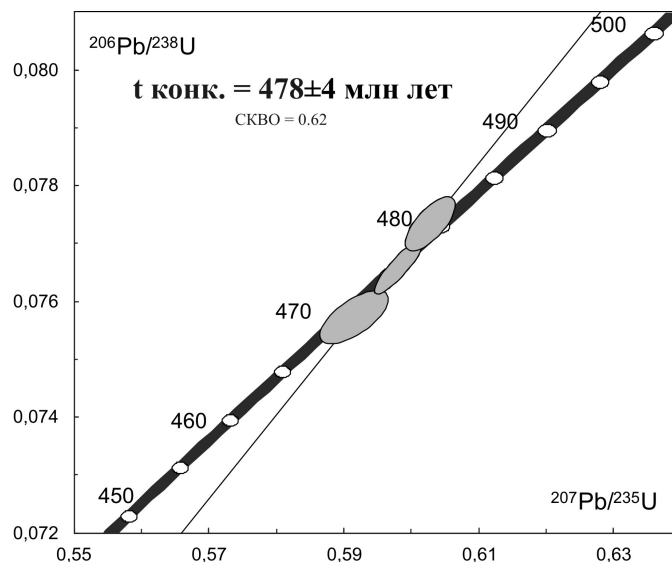


Рис. 11. Диаграмма с конкордией для гранатов из скарнов Туим-Карышского массива.

Скарны Хову-Аксинского Ni-Co-As месторождения. Хову-Аксинское Ni-Co-As гидротермальное месторождение входит в состав Алтае-Саянской кобальтовой металлогенической провинции. Образование контактово-метасоматических пород связано с многоэтапным магматизмом, широко проявленным в данном регионе в течение раннего и среднего палеозоя. Гранат является распространённым породообразующим минералом скарновых пород Хову-Аксинского месторождения. Состав граната отвечает ряду андрадит-гроссуляр с преобладающим количеством андрадитового компонента (52-79%) (рис. 16). В значительно меньших количествах присутствуют шорломитовый, моримотоитовый, альмандиновый и спессартиновый компоненты (не более 4%). Для граната характерно обеднение LREE ($[La/Sm]_N = 0.01-0.02$) и обогащение MREE ($[Gd/Yb]_N = 1.32-6.56$) (рис. 26).

Содержание U в гранате изменяется в пределах 10.76-29.5 мкг/г. Доля обыкновенного свинца (Pb_c/Pb_{tot}) составляет 0.07-0.42. На диаграмме с конкордией (рис. 12) точки изотопного состава граната располагаются на

дискордии, нижнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 399 ± 2 млн лет (СКВО = 0.082). Эта оценка возраста незначительно древнее Ag-Ag возраста флогопита (383 ± 5 млн лет) из скарнов Хову-Аксинского месторождения.

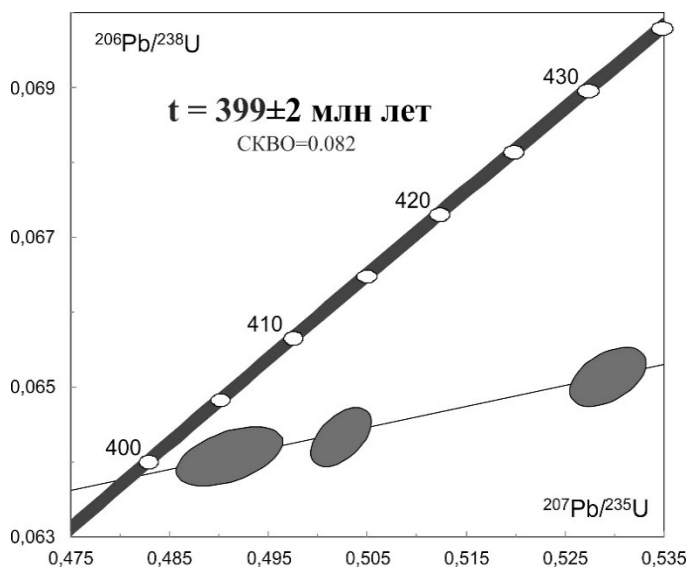


Рис. 12. Диаграмма с конкордией для граната из скарнов Хову-Аксинского месторождения.

Железо-магнезиальные флогопитоносные метасоматиты Алданского щита приурочены к карбонатсодержащим горизонтам фёдоровской толщи алданского гранулитогнейсового мегакомплекса. По химическому составу гранат из железо-магнезиальных флогопитоносных метасоматитов Леглиерской группы месторождений соответствует андрадиту (75-90%) с постоянным присутствием альмандина, хатчеонита, гроссуляра и Mg-моримотоита (рис. 16). Он характеризуется высоким содержанием REE (3389-3785 мкг/г), обогащен HREE ($[Gd/Yb]_N = 0.47-0.49$), обеднен LREE ($[La/Yb]_N = 0.06-0.07$) и обладает отчетливо выраженной отрицательной европиевой аномалией ($Eu/Eu^* = 0.43$) (рис. 26). Содержание U в гранате достигает 58 мкг/г, а доля обыкновенного свинца не превышает 0.2 нг. Верхнее пересечение дискордии с конкордией, рассчитанной для трех точек изотопного состава граната, составляет 1901 ± 5 млн лет (СКВО = 0.46) (рис. 13). Эта оценка возраста хорошо согласуется с U-Pb (ID-TIMS) возрастом циркона из Иджекского массива чарнокитов - 1916 ± 10 млн лет (Бибикова и др., 1986) и полевошпатовых метасоматитов Тыркандинской зоны разрывных нарушений (1919 ± 4 млн; Сальникова и др., 2006), образование которых связано с завершающими этапами раннепротерозойской эндогенной активности Алданского щита.

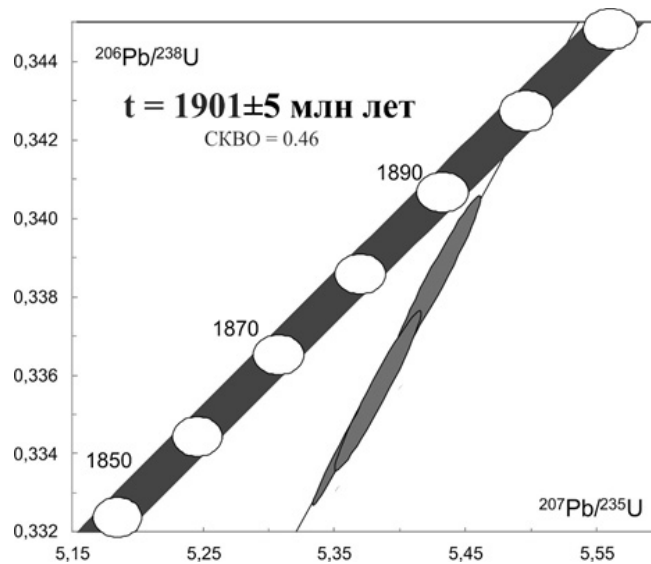


Рис. 13. Диаграмма с конкордией для граната из железо-магнезиальных флогопитоносных метасоматитов Алданского щита.

3. Полученные оценки U-Pb возрастов Ca-Fe гранатов из разновозрастных щелочных и щелочно-ультраосновных магматических пород, а также рудоносных известковых скарнов совпадают с оценками их возраста, полученными независимыми методами. Это позволяет рассматривать Ca-Fe гранаты как надежные U-Pb минералы-геохронометры, что обусловлено значительным содержанием в них урана, низкой долей обыкновенного свинца и, как правило, высокой устойчивостью их U-Pb изотопной системы в ходе проявления наложенных процессов.

Проведённые минералогические, геохимические и геохронологические U-Pb (ID-TIMS) исследования Ca-Fe гранатов из пород щелочно-ультраосновного состава и высокотемпературных метасоматитов различного возраста свидетельствуют об их высоком потенциале для использования в качестве минералов-геохронометров. Содержание урана в изученных гранатах изменяется в пределах 4-62 мкг/г, а его распределение в пределах отдельных зёрен варьирует в узком диапазоне. Изучение строения кристаллов гранатов с использованием оптических методов и электронной микроскопии указывают на отсутствие уран содержащих включений. Концентрация Pb в изученных образцах составляет 0.23-20.1 мкг/г, при этом они характеризуются незначительной долей обыкновенного свинца, как правило, не превышающей 10%. Следовательно, в большинстве случаев не возникает необходимости во внесении дополнительных поправок на первичный состав захваченного обыкновенного свинца. Эти характеристики позволяют определять U/Pb отношения Ca-Fe-гранатов с точностью, сопоставимой с точностью определения изотопного состава традиционных U-Pb минералов-геохронометров (циркон, титанит, монацит, бадделеит).

По результатам U-Pb геохронологических исследований Ca-Fe-гранатов из щелочно-ультраосновных пород и высокотемпературных метасоматитов, в большинстве случаев получены конкордантные или субконкордантные воспроизводящиеся значения возрастов, которые хорошо согласуются с независимыми оценками возрастов, полученных U-Pb методом по циркону, титаниту, U-Th-Pb методом по перовскиту, Sm-Nd изохронному возрасту, рассчитанному для апатита и граната и Ar-Ar методом по слюдам. Таким образом, можно полагать, что состояние кристаллической решетки гранатов и форма нахождения в ней Pb и U препятствуют миграции этих элементов из гранатов в ходе наложенных процессов.

Благодаря своим кристаллохимическим свойствам, замкнутости U-Pb системы и широкому распространению в качестве породообразующих и акцессорных минералов в различных типах пород, Ca-Fe гранаты могут служить надёжным источником геохронологической информации.

Заключение

В диссертационной работе представлены результаты минералогических, геохимических и геохронологических U-Pb (ID-TIMS) исследований Ca-Fe гранатов из щёлочно-ультраосновных пород и высокотемпературных метасоматитов. Гранаты из щёлочно-ультраосновных пород по составу соответствуют ряду андрадит - шорломит - моримотоит. Они характеризуются высоким содержанием некогерентных элементов, включая REE (405-2896 мкг/г). Отличительной особенностью распределения REE в изученных гранатах из щелочных и щёлочно-ультраосновных пород является отчётливо выраженным максимумом для группы MREE. В пределах отдельных зёрен гранатов содержание REE изменяется в узком диапазоне и не зависит от вариаций количества главных элементов. Состав гранатов из высокотемпературных метасоматических пород соответствует ряду андрадит-гроссуляр с постоянным присутствием Ti-содержащих компонентов. Эти гранаты также демонстрируют высокий уровень накопления REE (104-3538 мкг/г). В пределах зёрен прослеживается отрицательная корреляция между REE и Al.

Установлено, что присутствие урана в этих гранатах не связано с урансодержащими включениями. Эмпирическим путём подобран оптимальный режим обработки минерала перед проведением U-Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований. Продемонстрирована необходимость комплексного изучения состава и строения гранатов для корректной интерпретации полученных результатов.

Проведены U-Pb геохронологические исследования гранатов из щелочных и щёлочно-ультраосновных пород ряда крупнейших магматических провинций: Кольская провинция, Маймеча-Котуйская, Восточно-Саянская, Западно-Алданская, Сангиленская, Сьюперитор. Полученные данные согласуются с независимыми оценками возраста по другим минералам.

Результаты изучения Ca-Fe-гранатов из скарновых пород (Дашкесанское железорудное месторождение, Карышской группы Cu-Mo-W месторождений (Туим-Карышский массив), Хову-Аксинского Ni-Co-As месторождения и железо-магнезиальных флогопитоносных метасоматитов Алданского щита) также демонстрируют возможность использования U-Pb системы Ca-Fe-гранатов для получения оценок возраста скарнообразования и сопутствующего оруденения.

Полученные результаты свидетельствуют о большом потенциале Ca-Fe-гранатов в качестве U-Pb минералов-геохронометров для различных пород.

Список работ по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых журналах.

1. Сальникова Е.Б., **Стифеева М.В.**, Шахмурадян А.Р., Глебовицкий В.А., Регир Е.П. U-Pb-систематика шорломита из кальцит-амфибол-пироксеновых пегматитов массива Африканда (Кольский полуостров) // ДАН. 2018. Т. 478. № 4. С. 443-446.
2. Сальникова Е.Б., **Стифеева М.В.**, Никифоров А.В., Ярмолюк В.В., Котов А.Б., Анисимова И.В., Сугоракова А.М., Врублевский В.В. Гранаты ряда андрадит-моримотоит - потенциальные

минералы-геохронометры для U-Pb датирования ультраосновных щелочных пород // Докл. АН. 2018. Т. 480. № 5. С. 583-586.

3. Salnikova E.B., Chakmouradian A.R., **Stifeeva M.V.**, Reguir E.P., Kotov A.B., Gritsenko Yu.D., Nikiforov A.V. Calcic garnets as a geochronological and petrogenetic tool applicable to a wide variety of rocks // *Lithos*. 2019. V. 338. P. 141-154.
4. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Самсонов А.В., Котов А.Б., Гриценко Ю.В. U-Pb возраст граната из скарнов Дашкесанского месторождения (Малый Кавказ) // Докл. АН. 2019. Т. 487. № 5. С. 554-557.
5. **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.
6. Reguir E.P., Salnikova E.B., Yang P., Chakmouradian A.R., **Stifeeva M.V.**, Rass I.T., Kotov A.B. U-Pb geochronology of calcite carbonatites and jacupirangite from the Guli alkaline complex, Polar Siberia, Russia // *Mineralogical Magazine*. 2021. P. 1-15.

Статьи в тематических сборниках, тезисах совещаний и конференций.

1. Chakmouradian A.R., Salnikova E.B., Yakovleva S.Z., Kressall R.D., Bohm C.O., **Stifeeva M.V.**, Plotkina Yu.V. Timing of carbonatite emplacement at the Cinder Lake alkaline intrusive complex: U-Pb ID-TIMS data from andradite // *Материалы VI Российской конференции по изотопной геохронологии (2-5 июня 2015 г., Санкт-Петербург, ИГГД РАН)*. Санкт-Петербург. 2015. С. 350-351.
2. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Шахмурадян А.Р. U-Pb датирование гранатов подгруппы уграндитов из щелочного интрузивного комплекса Синдер Лейк (западная часть кратона Сьюпериор, Канадский щит) // *Материалы всероссийской научно-практической молодёжной конференции "Современные исследования в геологии" (25-27 марта 2016 г., Санкт-Петербургский Государственный Университет)*. Санкт-Петербург. 2016. С. 40-41.
3. **Stifeeva M.V.**, Salnikova E.B., Chakmouradian A.R. U-Pb study of ugrandites - first results and perspectives // *Proceedings of the conference "8th international Siberian early career geoscientists conference" (13-24 June 2016, Novosibirsk, Russia)*. IGM SB RAS, IPPG SB RAS, NSU: Novosibirsk. 2016. P. 119.
4. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Шахмурадян А.Р. U-Pb датирование шорломита из щелочного интрузивного комплекса Африканда (Кольская щелочная провинция) // *Материалы XXVII молодёжной научной школы-конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента АН СССР К.О. Кратца и академика РАН Ф.П. Митрофанова (3-7 октября 2016 г., Апатиты, ГИ КНЦ РАН)*. Апатиты. 2016. С. 75.
5. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б. U-Pb изотопная систематика гранатов из скарнов месторождения Дашкесан (Азербайджан) // *Материалы XXVIII Молодёжной научной конференции памяти К.О. Кратца "Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии" (2 - 7 октября 2017 г., Санкт-Петербург)*. Санкт-Петербург. 2017. С. 156-157.
6. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Шахмурадян А.Р., Никифоров А.В. U-Pb систематика кальциевых гранатов как источник информации о возрасте карбонатитов (на примере массивов Африканда и Белая Зима) // *Материалы V Международной конференции молодых учёных и специалистов памяти академика А.П. Карпинского (28 февраля - 3 марта 2017 г., Санкт-Петербург)*. Санкт-Петербург. 2017. С. 497-498.
7. Salnikova E., Chakmouradian A., **Stifeeva M.**, Reguir E., Nikiforov A. Calcic Garnets as a Promising U-Pb Geochronometers // *The Goldschmidt Conference 2017*. P. 3479.

8. Сальникова Е.Б., **Стифеева М.В.**, Котов А.Б., Анисимова И.В., Шахмурадян А.Р., Гриценко Ю.Д. U-Pb систематика гранатов как источник геохронологической информации // *Материалы VII Российской конференции по изотопной геохронологии (5-7 июня 2018г., Москва, ИГЕМ РАН)*. Москва. 2018. С. 311-313.
9. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Савко К.А., Толмачёва Е.В. U-Pb геохронологические исследования андрадита из щелочных пироксенитов Дубравинского массива (Воронежский кристаллический щит) // *Материалы VII Российской конференции по изотопной геохронологии (5-7 июня 2018г., Москва, ИГЕМ РАН)*. Москва. 2018. С. 345-347.
10. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Владыкин Н.В., Горовой В.А. U-Pb возраст андрадиты из щелочных пород Мурунского массива (Алданский щит) // *Материалы VII Российской конференции по изотопной геохронологии (5-7 июня 2018г., Москва, ИГЕМ РАН)*. Москва. 2018. С. 344-345.
11. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Арзамасцев А.А., Шахмурадян А.Р., Гриценко Ю.В., Анисимова И.В. Кальциевые гранаты как источник геохронологической информации о возрасте щелочных комплексов крупных магматических провинций // *Материалы VII Российской конференции по изотопной геохронологии (5-7 июня 2018г., Москва, ИГЕМ РАН)*. Москва. 2018. С. 343-344.
12. **Stifeeva M.V.**, Salnikova E.B., Plotkina Yu.V., Peytcheva I., Vassileva R. Andradite from Dashkesan iron skarn deposit as a potential standard reference material for U-Pb geochronological studies // *National Conference «Geosciences 2018» (December 6-7, 2018, Sofia)*. 2018. V. 79. part 3. P. 61-62.
13. Peytcheva I., Burkhardt R., von Quadt A., Guillong M., Klimentyeva D., Salnikova E., **Stifeeva M.** From relative to absolute timing of ore mineralization using garnets: a case study of the Karavansalija Cu-Au skarn deposit in Rogozna Mountains, SW Serbia // *National Conference «Geosciences 2018» (December 6-7, 2018, Sofia)*. 2018. V. 79. part 3. P. 57-59.
14. **Stifeeva M.V.**, Salnikova E.B., Kotov A.B. U-Pb garnet ages of the ijolites from Kola Alkaline Province massifs // *Proceedings of International Conference "Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits" (23-26 May 2019, Saint-Petersburg State University)*. Moscow. GEOKHI RAS. 2019. P. 293-295.
15. Salnikova E.B., **Stifeeva M.V.**, Kotov A.B. LIP's timing - what's new // *Материалы VII Международной конференции "Крупные изверженные (КИП - 2019)" (28 августа - 08 сентября 2019 г., Томск)*. Томск: "Томский центр научной информации". 2019. С. 113.
16. **Stifeeva M.V.**, Salnikova E.B., Chakmouradian A.R., Kotov A.B., Arzamastsev A.A., Peytcheva I. LIPs timing by U-Pb ID-TIMS dating of calcic garnets // *The Goldschmidt Conference 2019 (18-23 August 2019, Barcelona)*. 2019.
17. Vassileva R.D., Dimitrova D., Peytcheva I., Grozdev V., von Quadt A., Guillong M., Salnikova E., **Stifeeva M.** Mineralogy, geochemistry and U-Pb geochronology of grandite from the Martinovo Fe-skarn deposit, Western Balkanides, Bulgaria // *Proceedings of the "15th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits" (27-30 August, 2019, Glasgow, Scotland)*. Glasgow. 2019. P. 416-419.
18. Peytcheva I., Burkhardt R., von Quadt A., Guillong M., Klimentyeva D., Salnikova E., **Stifeeva M.** Relative and absolute timing of the KMC Cu-Au skarn deposit in Rogozna Mountains (SW Serbia) using garnets // *Proceedings of the "15th Biennial Meeting of the Society for Geology Applied to Mineral Deposits" (27-30 August, 2019, Glasgow, Scotland)*. Glasgow. 2019.
19. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Подольская М.М., Аносова М.О., Пейчева И.М., Адамская Е.В. U-Pb возраст гранатов из железо-магнезиальных метасоматитов центральной части Алданского щита // *Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и*

геодинамики докембрия (22-24 октября 2019 г., Санкт-Петербург, ИГГД РАН). Санкт-Петербург. 2019. С. 223-224.

20. Vassileva R., Grozdev V., Peytcheva I., von Quadt A., **Stifeeva M.** U-Pb dating of skarn garnets from Bulgarian deposits // EGU General Assembly 2020 (4-8 May 2020).
21. **Стифеева М.В.**, Сальникова Е.Б., Носова А.А. Новые данные о возрасте формирования щелочных пород Кольской магматической провинции // Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания "Петрология и геодинамика геологических процессов" (6-13 сентября 2021г.,Иркутск).

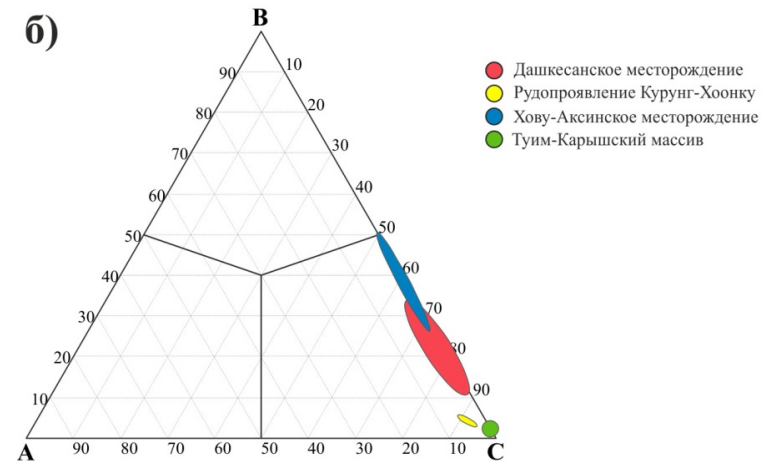
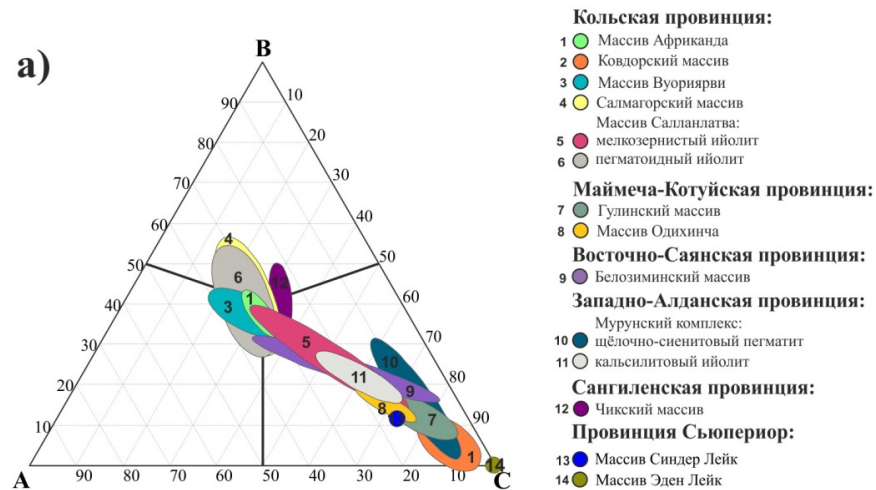


Рисунок 1а. Состав гранатов из пород щелочных и щёльно-ультраосновных комплексов. Обозначения (содержания компонентов в %): А - моримотит $(Ca_3(Ti, Fe^{2+})(SiO_4)_3) + Mg$ -моримотит $(Ca_3(Ti, Mg)(SiO_4)_3)$, В - шорломит $(Ca_3Ti_2(Si, Fe^{3+})O_{12}) + хатчеонит (Ca_3Ti_2(Si, Al)_2O_{12})$, С - андрадит $(Ca_3Fe^{3+}_2(SiO_4)_3)$.

Рисунок 1б. Состав гранатов из скарновых пород и железо-магнезиальных метасоматитов. Обозначения (содержания компонентов в %): А - спессартин $(Mn^{2+}_3Al_2(SiO_4)_3) + пироп (Mg_3Al_2(SiO_4)_3) + альмандин (Fe^{2+}_3Al_2(SiO_4)_3)$, В - андрадит $(Ca_3Fe^{3+}_2(SiO_4)_3) + моримотит (Ca_3(Ti, Fe^{2+})(SiO_4)_3) + хатчеонит (Ca_3Ti_2(Si, Al)_2O_{12})$, С - гроссуляр $(Ca_3Al_2(SiO_4)_3)$.

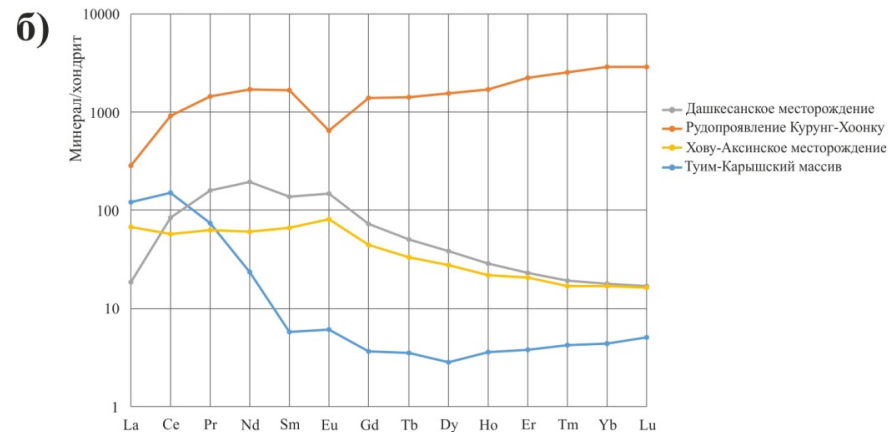
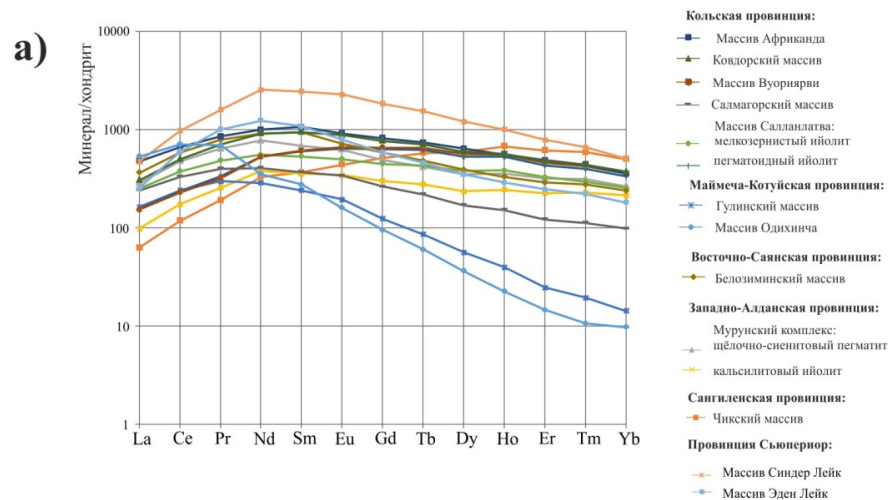


Рисунок 2а. График распределения редкоземельных элементов в гранатах из пород щелочных и щёльно-ультраосновных массивов. Нормализовано по [Anders, Grevesse, 1989].

Рисунок 2б. График распределения редкоземельных элементов в гранатах из скарновых пород и железо-магнезиальных метасоматитов. Нормализовано по [Anders, Grevesse, 1989].