

УДК 550.38

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2024-63-4-11-24

ВЕНДСКИЙ МАГМАТИЗМ УФАЛЕЙСКОГО БЛОКА (ЦЕНТРАЛЬНО-УРАЛЬСКАЯ МЕГАЗОНА СРЕДНЕГО УРАЛА)

Александр Вениаминович Тевелев¹, Валерий Михайлович Мосейчук²,
Екатерина Алексеевна Володина³, Наталья Валерьевна Дёмина⁴,
Наталья Николаевна Коротаева⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ООО НТПП «Геопоиск», Челябинск, Россия; atevelev@yandex.ru, https://istina.msu.ru/profile/Al_Tevelev-1970/

² ООО НТПП «Геопоиск», Челябинск, Россия; geopoisk2004@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers/1246649/>

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ООО НТПП «Геопоиск», Челябинск, Россия; ekaterina.volodina2015@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/VolodinaEA/>

⁴ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; demina.nava@gmail.com

⁵ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; nn_korotaeva@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/workers/8469617/>

Аннотация. Представлены первые изотопные данные о возрасте метагаббро-метатрондьемитового комплекса. Впервые выделенный в таком составе (метагаббро, амфиболиты и метатрондьемитовые гранофельсы) кенчурский комплекс слагает мелкие массивы в центральной части Уфалейского блока, который является частью Центрально-Уральской мегазоны. Дано полное и разностороннее описание комплекса, рассмотрены геохимические, минералогические и изотопные данные пород кенчурского комплекса. На основании этих данных доказан контрастный состав и ранневендский возраст комплекса, который ранее считался позднерифейским.

Ключевые слова: венд, габброиды, гранофельсы, изотопный возраст, Уфалейский блок, Урал

Для цитирования: Тевелев А.В., Мосейчук В.М., Володина Е.А., Дёмина Н.В., Коротаева Н.Н. Вендский магматизм Уфалейского блока (Центрально-Уральская мегазона Среднего Урала) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2024. № 4. С. 11–24.

VENDIAN MAGMATISM OF THE UFALEI BLOCK (CENTRAL URALS MEGAZONE OF THE MIDDLE URALS)

Alexander V. Tevelev¹, Valery M. Moseychuk², Ekaterina A. Volodina³,
Natalya V. Demina⁴, Natalya N. Korotaeva⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; “Geopoisk” Ltd., Chelyabinsk, Russia; atevelev@yandex.ru, https://istina.msu.ru/profile/Al_Tevelev-1970/

² “Geopoisk” Ltd., Chelyabinsk, Russia; geopoisk2004@mail.ru, <https://istina.msu.ru/workers/1246649/>

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; “Geopoisk” Ltd., Chelyabinsk, Russia; ekaterina.volodina2015@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/profile/VolodinaEA/>

⁴ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; demina.nava@gmail.com

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; nn_korotaeva@yandex.ru, <https://istina.msu.ru/workers/8469617/>

Abstract. The first isotopic data on the age of the metagabbro-metatrondjemite complex are presented. For the first time identified in this composition (metagabbro, amphibolites and metatrondhjemite granofelses), the Kenchur complex composes small massifs in the central part of the Ufaley block, which is part of the Central Ural zone. The geochemical, mineralogical and isotopic data of the rocks of the Kenchur complex are considered. Based on these data, the contrasting composition and Early Vendian age of the complex, which was previously considered Late Riphean, was proven.

Keywords: vendian, gabbroids, granofelses, isotope age, Ufaley block, Urals

For citation: Tevelev A.V., Moseychuk V.M., Volodina E.A., Demina N.V., Korotaeva N.N. Vendian magmatism of the Ufalei block (Central Urals megazone of the Middle Urals). *Moscow University Geol. Bull.* 2024; 4: 11–24. (In Russ.).

Введение. Кенчурский комплекс выделен Г.А. Плужковой и др. в 1979 году при проведении региональных работ по изучению типов железорудных месторождений Центрально-Уральской мегазоны в качестве комплекса метагабброидов позднерифейского возраста [Гаврилова и др., 2007]. Центрально-Уральская мегазона занимает особое

положение в общей структуре Урала, она разделяет его палеоконтинентальную и палеоокеаническую части, представляя самые восточные выходы фундамента Восточно-Европейской платформы с деформированным чехлом. С востока Центрально-Уральская мегазона ограничена Главным уральским разломом, по которому на нее надвинуты остро-

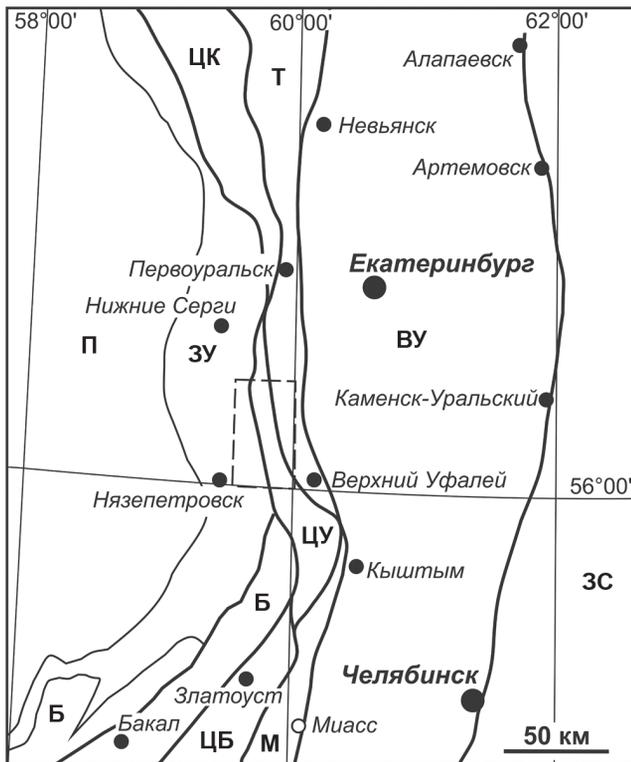


Рис. 1. Схема расположения структурных элементов Урала в районе Миасского синтаксиса. П — Предуральский краевой прогиб; ЗУ — Западно-Уральская зона дислокаций; Б — Башкирская мегазона; Ц — Центрально-Уральская мегазона: ЦК — Кваркушский блок, ЦУ — Уфалейский блок, ЦБ — Башкирский блок; Т — Тагильская мегазона; М — Магнитогорская мегазона; ВУ — Восточно-Уральская мегазона; ЗС — Западная Сибирь. Штриховой четырехугольник — район работ

дужные вулканиты Тагильской и Магнитогорской мегазон (рис. 1).

Уфалейский блок Центрально-Уральской мегазоны расположен в самой пережатой части Уральского складчатого пояса — в пределах Миасского синтаксиса и представляется наиболее деформированной частью мегазоны. Он сложен метаморфическими породами раннепротерозойской слюдяногорской и верхнерифейской указарской свит (рис. 2). Слюдяногорская свита слагает восточную часть Уфалейского блока (Восточно-Уфалейскую подзону) и представлена амфиболитами, чередующимися с маломощными телами амфиболовых и биотитовых плагиогнейсов с прослоями слюдяно-кварцевых сланцев и кварцитов. Указарская свита слагает западную часть Уфалейского блока (Западно-Уфалейскую подзону) и представлена осадочно-вулканогенной толщей с вулканитами контрастного состава, метаморфизованной в условиях зеленосланцевой и эпидот-амфиболитовой фаций. Возраст этих свит принят условно, исходя из структурного положения и степени метаморфизма.

Среди метаморфитов Уфалейского блока присутствуют тела метагаббро и гранитоидов. Последние, как правило, превращены в гнейсо-граниты (умереннощелочные разновидности относятся к битим-

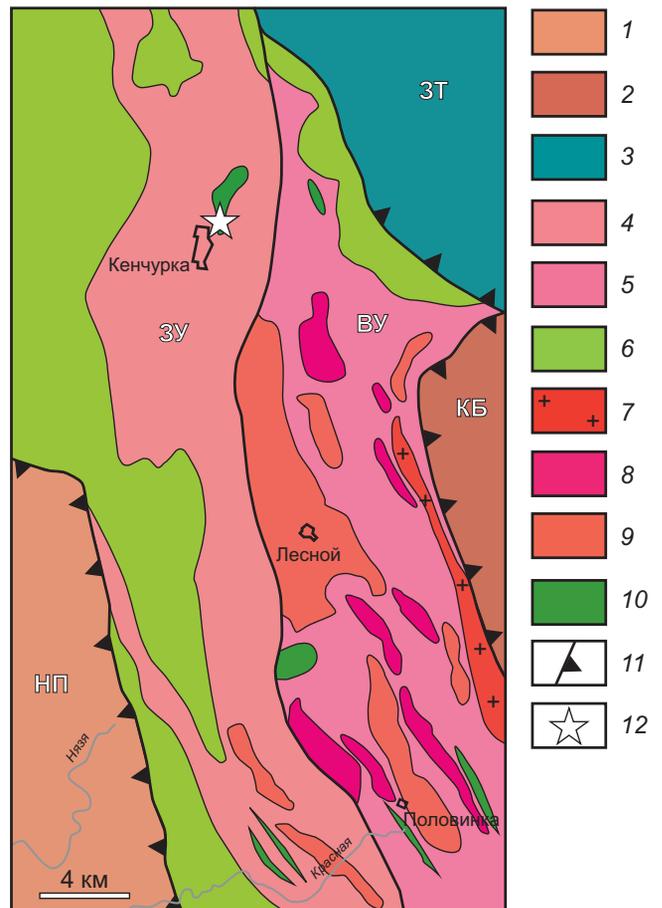


Рис. 2. Схематическая геологическая карта средней части Уфалейского блока и его обрамления. 1 — Нязепетровский аллохтон (НП); 2 — Куртинский блок (КБ); 3 — Западно-Тагильская зона (ЗТ); 4 — указарская свита Западно-Уфалейской подзоны (ЗУ); 5 — слюдяногорская свита Восточно-Уфалейской подзоны (ВУ); 6 — ордовикский чехол Уфалейской зоны (козинская и малыгинская свиты); 7 — граниты уфалейкинского комплекса (средний карбон); 8 — гнейсо-лейкограниты чувсовского комплекса (ранний ордовик); 9 — умереннощелочные гнейсо-граниты битимского комплекса (ранний кембрий); 10 — метагаббро-метатрондьемитовый кенчурский комплекс; 11 — крупные надвиги; 12 — место взятия изотопных проб

скому комплексу раннего кембрия, а лейкогранитовые — к чувсовскому комплексу раннего ордовика). Общая проблема магматизма в пределах блока заключается в том, что возраст практически всех магматических комплексов до последнего времени не был обоснован изотопными данными и принимался условно рифейским, исходя из интенсивного метаморфизма пород — как габброидов, так и гранитоидов.

Методика. Полевые исследования. Все описанные объекты были изучены и опробованы при проведении региональных геологических работ в 2020–2023 гг.

Изучение, описание и фотографирование шлифов проводилось с помощью микроскопа Olympus BX53P, приобретенного по «Программе развития МГУ».

Определение породообразующих элементов проводилось методом мокрой химии в лаборатории ИМ УрО РАН (г. Миасс) по стандартным методикам:

1 — № 138-X «Определение породообразующих элементов в горных породах и рудах ускоренными фотометрическим титриметрическим методами»;

2 — № 50-X «Определение оксида железа (II) в силикатных горных породах, силикатных и сульфидных минералах титриметрическим бихроматным методом»;

3 — № 172-C «Определение кремния, титана, алюминия, железа, кальция, магния, марганца в горных породах, рудном и нерудном минеральном сырье, объектах окружающей среды пламенным атомно-абсорбционным методом»;

4 — № 502-C «Определение калия и натрия в горных породах атомно-эмиссионным методом»;

5 — № 118-X «Определение потери при прокаливании (ППП) в бокситах, в некоторых силикатных и карбонатных породах гравиметрическим методом»;

6 — № 120-X «Определение гигроскопической и связанной воды в горных породах гравиметрическим методом»;

7 — № 197-X «Определение массовой доли фосфора в горных породах и рудах фотометрическим методом в виде восстановленного фосфоро-молибденового комплекса».

Элементный геохимический анализ горных пород проводился в лаборатории ИМ УрО РАН (г. Миасс). Пробы горных пород разлагали в микроволновой системе (SpeedWave 3, Berghof, Германия). Для анализа 0,07 г измельченного материала пробы разлагали с использованием смеси растворов концентрированных кислот в автоклавах ($\text{HF} + \text{HNO}_3 + \text{HCl}$). Программа микроволнового вскрытия выполнялась в течение 15 минут при 145 °С и 20 минут при 200 °С, время удержания 15 минут с последующим процессом охлаждения в течение 10 минут. После упаривания остаток разбавляли и процесс повторяли несколько раз. Кислотные экстракты фильтровали через мембранные фильтры из ацетата целлюлозы с размером пор 0,45 мкм и анализировали на 45 элементов с помощью масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS: Agilent Technologies 7700x, Япония).

Многоэлементные стандартные растворы (Agilent) обычно анализировались как средства контроля качества. Качество аналитических процедур оценивалось с помощью соответствующих внешних стандартов, включая материал российских стандартов СГД-2а (габбро эссекитовое) и СКД-1 (кварцевый диорит), у которых есть сертифицированные/рекомендуемые значения. Относительное стандартное отклонение (RSD) было ниже 8%. Воспроизводимость при анализе стандартных образцов составляла 91–112%.

U–Pb датирование цирконов осуществлялось на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP-II (Secondary Ion Mass-Spectrometry by Sensitive High-

Resolution Ion Micro Probe) в Центре изотопных исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ». Представительные цирконы, отобранные вручную под микроскопом, были имплантированы в эпоксидную смолу (шайба диаметром 2,5 см) вместе с зернами международных цирконовых стандартов TEMORA и 91500, затем сошлифованы приблизительно наполовину своей толщины и отполированы. На препарат наносилось токопроводящее золотое покрытие в установке катодно-вакуумного распыления в течение одной минуты при силе тока 20 мА. В дальнейшем зерна цирконов документировались с использованием сканирующего электронного микроскопа CamScan MX2500 с системой CLI/QUA2 для получения катодolumинесцентных (CL) и BSE изображений, отражающих внутреннюю структуру и зональность цирконов. Рабочее расстояние составляло 25–28 мм, ускоряющее напряжение — 20 кВ, ток практически полностью сфокусированного пучка на цилиндре Фарадея — 4–6 нА. Ток зонда варьировался с целью достижения максимального контраста CL изображения и минимизации коррозии поверхности шайбы в результате локального разогрева.

Измерения U–Pb отношений проводились по адаптированной в ЦИИ методике [Schuth, et al., 2012], описанной в работе [Williams, 1998]. Интенсивность первичного пучка молекулярного кислорода составляла 4 нА, размер кратера пробоотбора — 20 × 25 мкм при глубине до 2 мкм. Обработка полученных данных осуществлялась с помощью программы SQUID [Ludwig, 2001]. U–Pb отношения нормализовались на значение 0,0668, приписанное стандартному циркону TEMORA, что соответствует возрасту этого циркона 416,75 ± 0,24 млн лет [Black, et al., 2003]. Стандарт циркона 91500 с содержанием урана 81,2 ppm и возрастом по $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ в 1062 Ма [Wiedenbeck, et al., 1995] использовался как концентрационный стандарт. Растровая одноминутная очистка прямоугольного (50 × 65 мкм) участка минерала перед датированием позволяла минимизировать поверхностное загрязнение. Погрешности единичных анализов (отношений и возрастов) приводятся на уровне 1%, погрешности вычисленных возрастов, в том числе конкордантных, приводятся на уровне 2%. Построение графиков с конкордией проводилось с использованием программы ISOPLOT/EX [Ludwig, 2003]. Коррекция на нерадиоγενный свинец проводилась по измеренному ^{204}Pb и современному изотопному составу свинца в модели Стейси-Крамерса [Stacey, Kramers, 1975].

Микрозондовый анализ. Аналитические данные (микрозондовый анализ прозрачно-полированных шлифов) были получены в Лаборатории локальных методов исследования вещества (кафедра петрологии и вулканологии, геологический факультет МГУ) при помощи электронно-зондового микроанализатора Superprobe JEOL JXA-8230, приобретенного за счет средств «Программы развития Московского университета» (аналитик Н.Н. Коротаева).

Рис. 3. Амфибол-альбит-кварцевые метатрондьемиты.
Слева — обломок зональной жилы, справа — образец



Краткая геологическая характеристика. Массивы кенчурского комплекса в Уфалейском блоке распространены среди пород указарской свиты верхнего рифея. Они представлены мелкими телами габбро и дайками габбро-долеритов, метаморфизованных вместе с породами свиты. Метагаббро слагают небольшие силлы и дайки среди зеленых сланцев, простирающие их субмеридиональное и северо-западное, мощность до 150–250 м. Массивы метагаббро сопровождаются апофизами и сателлитами мощностью 2–3 м и пересечены редкими субширотными дайками метадолеритов мощностью 0,5–1 м. Породы метаморфизованы в зеленосланцевой (до амфиболитовой) фации. Нашими работами состав комплекса дополнен метатрондьемитами, то есть ныне в составе комплекса выделяются две фазы внедрения: 1 — габбро, метагаббро, 2 — метатрондьемиты (гранофельсы).

Первая фаза комплекса представлена метагаббро, альбит-эпидотовыми апогаббровыми амфиболитами и разнообразными сланцами. Наиболее хорошо изучены тела метагаббро, которые вскрыты карьерами восточнее дер. Кенчурка и в верховьях р. Нязя у дороги Кенчурка — Полдневая.

В карьере на северо-восточной окраине дер. Кенчурка вскрыты хлорит-эпидот-альбит-актинолитовые темно-зеленовато-серые гранолепидобластовые сланцы, круто падающие на восток (АзПд 85 \angle 70 — сланцеватость). Вероятно, также круто падает на восток и само тело метагаббро. Восточнее в карьере выходят амфибол-плаггиоклаз-кварц-серицит-хлоритовые сланцы с единичными зернами магнетита — полностью рассланцованные габбро. Структура гранонематолепидобластовая,

текстура сланцеватая. Севернее они переходят в слабо-рассланцованные, разгнейсованные и слабо метаморфизованные хлоритизированные габбро.

Карьер в 5 км восточнее дер. Кенчурка, южнее шоссе Полдневая — Кенчурка имеет размер около 30 × 8 м и вскрывает черные мелко-среднекристаллические габбро. В пределах карьера с востока на запад в габброидах увеличивается степень рассланцевания, а местами они превращены в амфиболиты. Однако в большей части карьера вскрыты мелкокристаллические метагаббро с текстурой от слабогнейсовидной до массивной. Плаггиоклаз эпидотизирован, иногда образует линзы и полосы. В небольших объемах присутствуют габбро мелкокристаллические, гнейсированные, с отчетливой директивной текстурой. Кристаллы амфибола образуют слабо выраженную линейность, а полевошпат разлинзован. В породах присутствует большое количество тонкозернистого титанита.

Вторая фаза кенчурского комплекса представлена метатрондьемитовыми гранофельсами. Эти породы вскрыты в карьере на северо-восточной окраине дер. Кенчурка. Среди сланцев залегают многочисленные жилы гранофельсов более или менее однородного состава, но с разной структурой мощностью от первых сантиметров до 40 см. Как правило, они представляют собой силлы, конформные сланцеватости. По большей части породы имеют немагнотранобластовую структуру и линейную текстуру. Основная ткань породы имеет очень тонкозернистую структуру и состоит из мельчайших зерен кварца и альбита. В основную массу погружены черные игольчатые кристаллы амфибола размером до 1,5 см в длину (соотношение длины к толщине

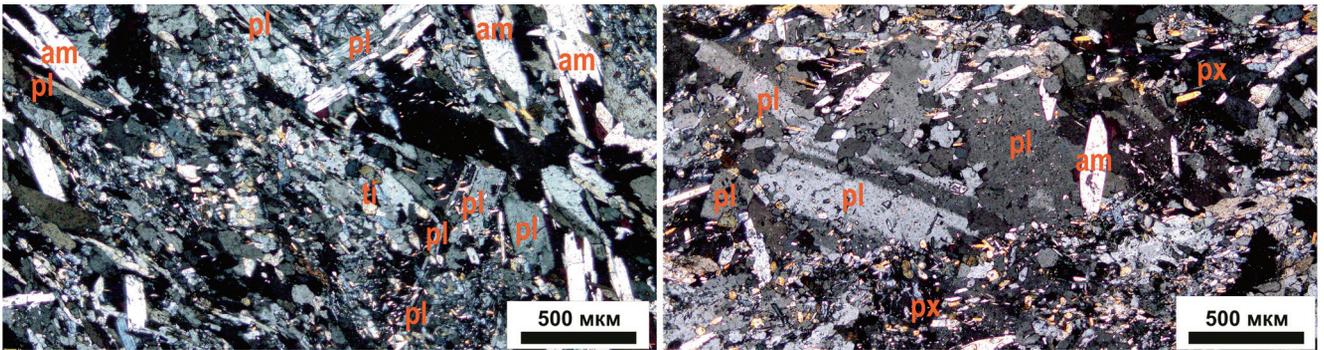


Рис. 4. Микрофото метагаббро. Николи скрещены (am — амфибол, pl — плагиоклаз, ti — титанит, px — пироксен)

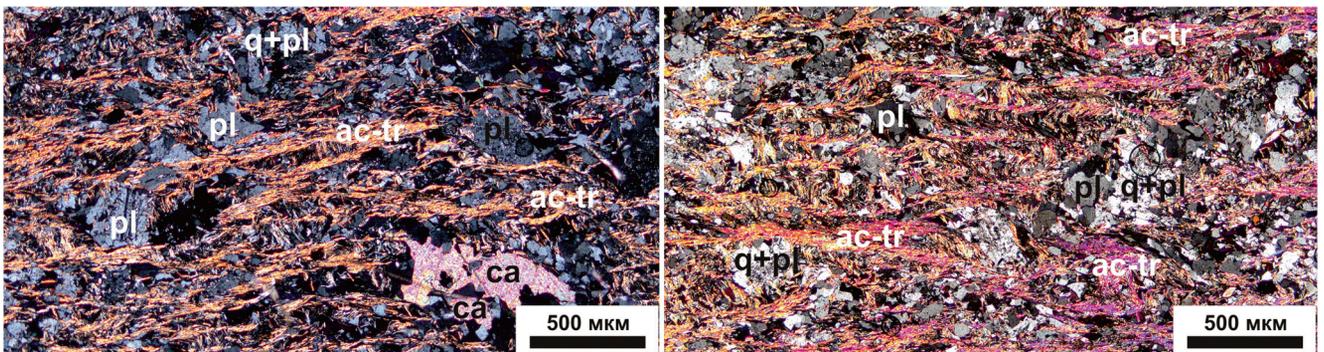


Рис. 5. Микрофото метагаббро с участками межзернового кливажа. Николи скрещены (pl — плагиоклаз, q — кварц, ac-tr — актинолит-тремолит, ca — кальцит)

от 30:1 до 50:1). Количество амфибола варьирует очень сильно: от 20–15 до 0%. Мощные жилы имеют отчетливую зональность в распределении амфибола: в приконтактовой зоне (вблизи сланцев) его много, а в центральной части — мало, вплоть до полного отсутствия (рис. 3).

Подавляющая часть кристаллов амфибола ориентирована вдоль сланцеватости и образует линейность, конформную контактам жил; отдельные кристаллы ориентированы косо к общей линейности, но подчеркивают плоскостную текстуру, параллельную контактам жил. При интенсивном рассланцевании в породах появляются полосы хлоритизированного темноцветного минерала, ориентированные по трещиноватости.

Краткая петрографическая характеристика пород кенчурского комплекса. Метагаббро, как правило, представляют собой темно-зеленую мелкокристаллическую породу. Состав: плагиоклаз — 40% (белый ксеноморфный до 1,5 мм), пироксен — 50% (черный короткопризматический до 1 мм), амфибол — 10% (черный игольчатый до 3 мм в длину). По плагиоклазу развивается фисташковый эпидот, по пироксену — темно-зеленый хлорит. Текстура гнейсовидная, сланцеватая. Особенностью этих метагаббро является присутствие значительного количества игольчатого амфибола.

В слабо измененных разностях габбро кенчурского комплекса пироксен изменен нацело, а плагиоклаз — слабо. Плагиоклаз имеет размер до 1 мм

и отчетливое двойникование. Вторичный амфибол беспорядочно наложен на структуру породы (рис. 4).

В интенсивно катаклазированных габбро появляется межзерновой волнистый кливаж (кливаж плейчатости), выраженный тонкими полосами слюдястых агрегатов, разделяющих микролитоны, сложенные обломками зерен плагиоклаза и нацело измененного темноцветного минерала (рис. 5). Местами в породе присутствует вторичная карбонатизация.

Однако чаще всего габбро превращены в сланцы смешанного состава. Среди сланцев выделяются две главные разновидности, незначительно отличающиеся друг от друга.

1. **Хлорит-эпидот-альбит-актинолитовые сланцы.** Структура породы лепидогранонематобластовая, текстура сланцеватая. Породообразующие минералы: тремолит-актинолит — 45%, альбит — 35%, эпидот — 10, хлорит — 8, биотит — 1, апатит — 1%. Тремолит-актинолит представлен игольчатыми кристаллами длиной до 0,1 мм, плеохроирующими в светло-зеленых тонах, имеющими высокие интерференционные окраски и косое погасание. Для альбита характерны бесцветные зерна размером до 0,5 мм неправильной формы или линзовидные, очень редко полисинтетически сдвойникованные. Эпидот распределен в породе неравномерно, образует линзовидные скопления, ориентированные согласно сланцеватости. Он представлен мелкими (менее 0,02 мм) бесцветными зернами неправиль-

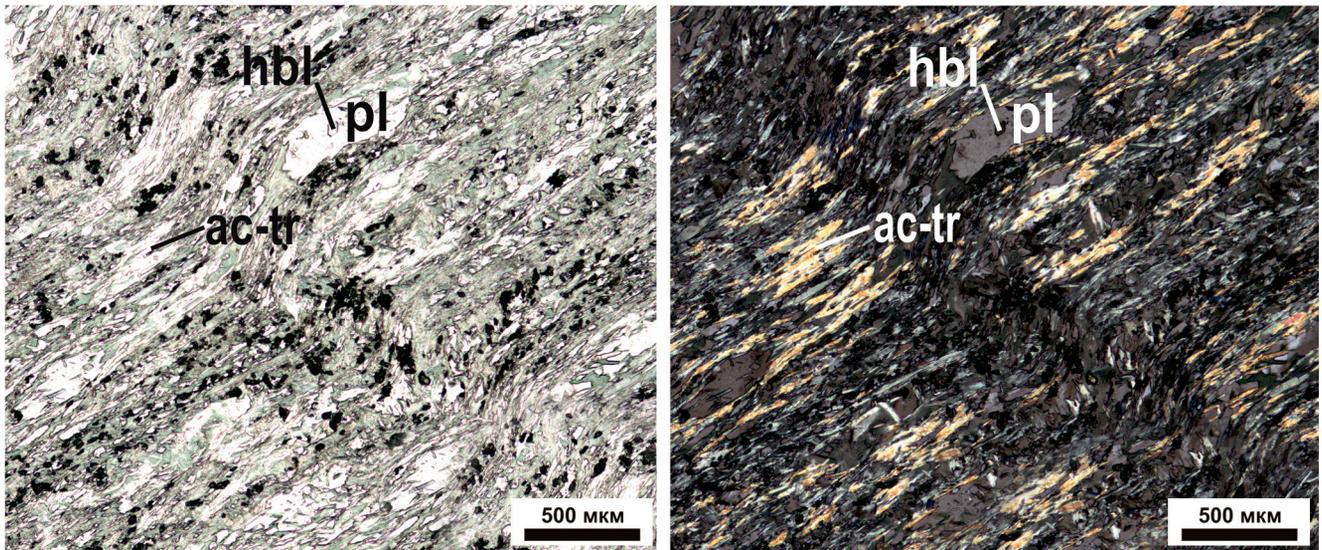


Рис. 6. Микрофото хлорит-эпидот-альбит-актинолитового сланца с левосторонним кинкбандом. Слева — николи параллельны, справа — николи скрещены (hbl — роговая обманка, pl — плагиоклаз, ac-tr — актинолит-тремолит)

ной формы с очень высоким рельефом и высокими, сарафанными интерференционными окрасками. Чешуйчатые кристаллы хлорита имеют размер 0,1–0,3 мм. Они плеохроируют в светло-зеленых тонах и имеют очень низкие серые и бурые интерференционные окраски. Редкие пластинки биотита размером 0,1–0,2 мм плеохроируют от светло-желтого до зеленовато-бурого. Зерна апатита бесцветные, имеют неправильную форму и размер до 0,4 мм (рис. 6). Местами в породе имеются отчетливые кинкбанды.

2. Хлорит-актинолит-альбитовые сланцы. Порода нематолепидогранобластовая, сланцеватая. Породообразующие минералы: альбит — 35%, тремолит-актинолит — 25, хлорит — 25, эпидот — 3, биотит — 2%. Вторичные минералы: карбонат — 10%.

Альбит представлен бесцветными ксеноморфными зернами размером 0,1–0,4 мм, очень редко с полисинтетическим двойникованием. Кристаллы тремолита-актинолита игольчатые, до 0,8 мм в длину. Они плеохроируют в светло-зеленых тонах. Хлорит чешуйчатый, плеохроирует от светло-зеленого до зеленого, в скрещенных николях серо-зеленый, табачный, размер кристаллов — от 0,1 до 0,4 мм. Эпидот представлен бесцветными зернами размером до 0,1 мм. Пластинчатые кристаллы биотита имеют размер 0,2–0,4 мм. Они плеохроируют от светло-коричневого до зеленовато-бурого. Карбонат бесцветный, образует вытянутые ксеноморфные включения размером 0,2–2,0 мм, ориентированные по сланцеватости (рис. 7).

3. Гранофельс амфибол-кварц-альбитовый с эпидотом и апатитом. Порода порфиробластовая нематогранобластовая с линейной текстурой. Порфиробласты занимают примерно 10% объема и представлены игольчатыми кристаллами амфибола. Кристаллы имеют ромбовидное поперечное сечение, в котором прослеживается средняя спайность в двух направлениях под углом 51–58°. Амфиболы

плеохроируют от светло-желтого до сине-зеленого. Внутри они содержат включения кварца размером до 0,1 мм (рис. 8).

Основная масса состоит преимущественно из альбита (52%) и кварца (35%) с редкими включениями эпидота (2%) и апатита (1%). Кварц — бесцветный, ксеноморфный, размером до 0,2 мм. Альбит представлен бесцветными ксеноморфными зернами до 0,2 мм, имеет серые интерференционные окраски и отрицательный рельеф. Очень редко альбит полисинтетически двойникован. Эпидот в породе представлен очень мелкими (до 0,015 мм) бесцветными зернами с сарафанными интерференционными окрасками. Зерна апатита — бесцветные, ксеноморфные, имеют размер от 0,05 до 0,2 мм. Редкая вкрапленность рудного минерала представлена пиритом. На микрофото шлифов, сделанных вдоль линейности, часто видны разрывы порфиробластов амфибола, ориентированные строго поперек кристаллов. Они сформированы, видимо, за счет вязкого течения при расланцевании (микробудинажа). Края отрывов неровные, зазубренные.

Геохимическая характеристика пород кенчурского комплекса. Геохимическая характеристика пород кенчурского комплекса базируется на 16 силикатных анализах и 12 анализах рассеянных элементов (ICP MS). Кенчурский комплекс представляет собой контрастную серию. На TAS-диаграмме фигуративные точки габброидов располагаются преимущественно в полях габбро и габбродиоритов (рис. 9). Фигуративные точки апогаббровых амфиболитов и апогаббровых хлорит-актинолит-альбитовых сланцев смещены в область низкощелочных пород. Три фигуративные точки метатрондьемитовых гранофельсов находятся в поле лейкогранитов, одна — в поле низкощелочных лейкогранитов.

Метагабброиды кенчурского комплекса относятся к известково-щелочной серии (рис. 10),

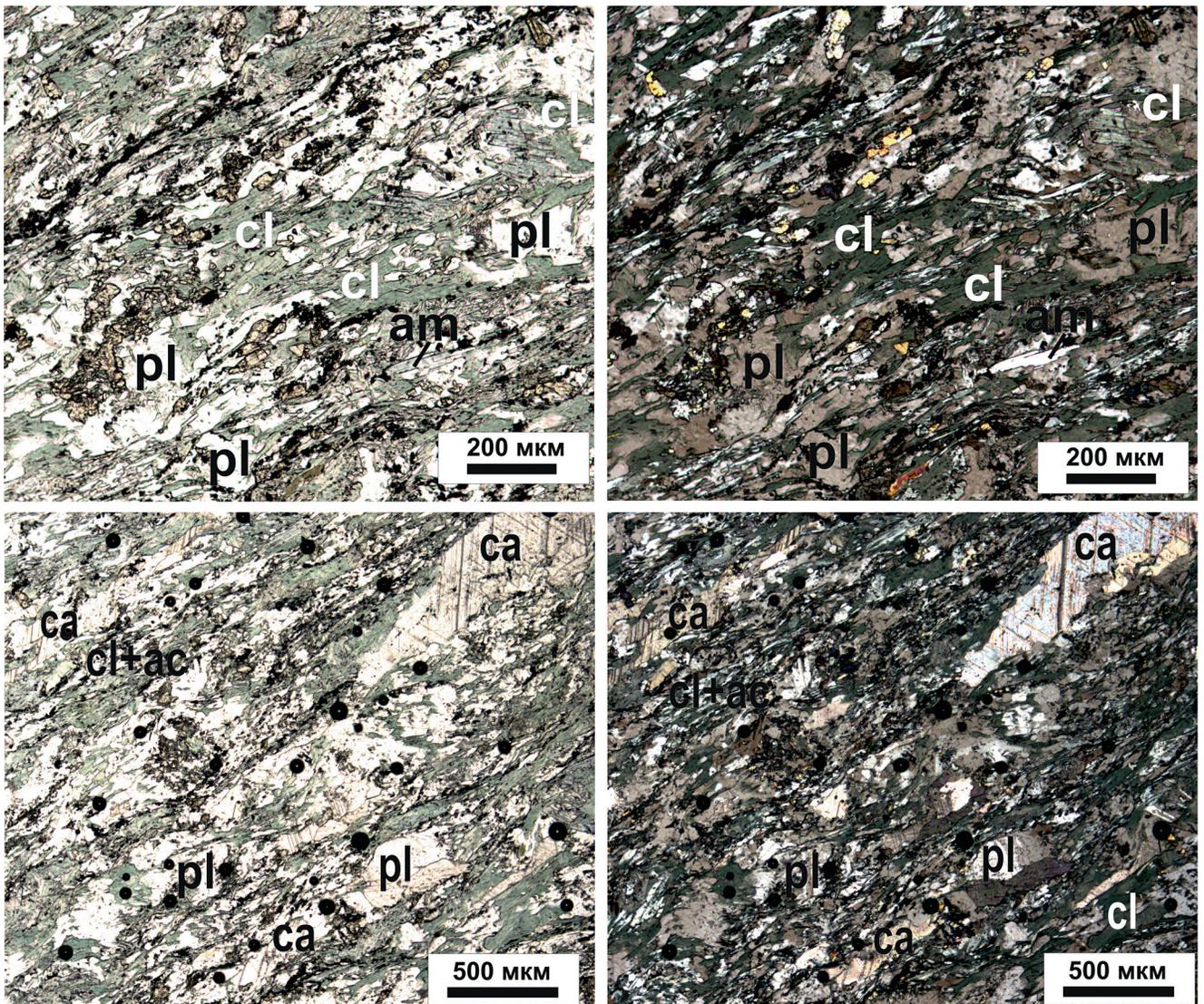


Рис. 7. Микрофото хлорит-актинолит-альбитового сланца с эпидотом, биотитом, апатитом и вторичным карбонатом. Слева — николи параллельны, справа — николи скрещены

существенно натриевой (рис. 11). Две фигуративные точки, отвечающие наиболее измененным разностям, попадают в поле толеитовых пород. Отсутствие тренда в распределении калия и натрия обязано метаморфизму пород.

Распределение РЗЭ в породах кенчурского комплекса соответствует контрастному характеру комплекса (рис. 12). Нормированные значения содержания РЗЭ в габброидах имеют довольно ровный пологий отрицательный наклон. Распределение РЗЭ в гранофельсах обладает отчетливым тетрадным эффектом. Первая тетрада (La–Nd) характеризуется крутым трендом примерно на полпорядка. Во второй тетраде (Sm–Gd) — глубокий европейский минимум со средним отношением $Eu/Eu^* = 0,49$. В третьей (Gd–Ho) и четвертой (Er–Lu) тетрадах тренд практически горизонтальный с незначительным минимумом Dy. Такое распределение предполагает коровый источник вещества с существенным фракционированием плагиоклаза.

Распределение рассеянных элементов в породах кенчурского комплекса, главным образом, противоположно для основных и кислых разностей (рис. 13).

Для распределения рассеянных элементов в габброидах характерны разноуровневые максимумы Pb, сочетающиеся с небольшим Nb-минимумом, что определяется, скорее всего, разной степенью влияния коровой составляющей. Так, на диаграмме (Th/Ta)–(La/Nb) фигуративные точки габброидов располагаются вблизи фигуративной точки состава нижней земной коры, а фигуративные точки метатрондьемитов — вблизи точки состава верхней коры (рис. 14). Природа глубокого Zr–Hf минимума не очень понятна, похоже, что источником магмы была истощенная мантия. Трондьемиты формировались уже на уровне верхней коры, им соответствует максимум Th и Pb. Глубокий Sr-минимум подтверждает существенное фракционирование плагиоклаза.

Несмотря на контрастность состава пород кенчурского комплекса, они принадлежат к единой

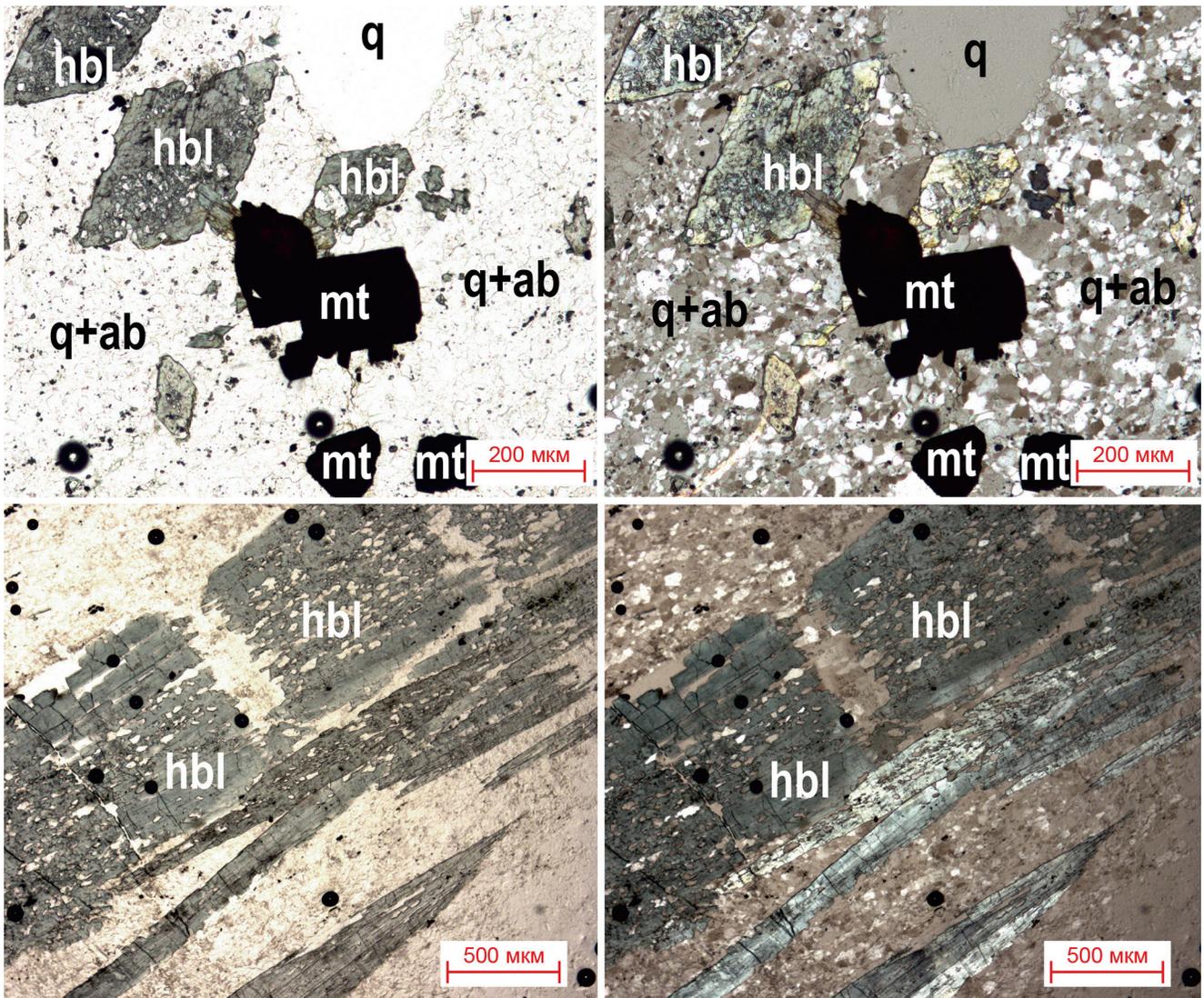


Рис. 8. Микрофото амфибол-кварц-альбитового гранофельса. Вверху фото шлифа, сделанного поперек линейности, внизу — шлифа, сделанного вдоль линейности. Слева — николи параллельны, справа — николи скрещены (hbl — роговая обманка, q — кварц, q+ab — кварц-альбитовый агрегат, mt — магнетит)

магматической серии. На диаграмме La/Yb–La фигуративные точки габброидов и метатрондьемитов составляют единый тренд (рис. 15).

Минералогическая характеристика пород кенчурского комплекса. Для определения особенностей минералогии гранофельсов были проведены микрозондовые исследования. В результате получены данные по составу плагиоклазов (альбит), амфиболов (роговая обманка), кроме того, среди аксессуарных минералов были выявлены апатит, титанит, циркон, эпидот, из рудных — магнетит (рис. 16).

Состав амфибола соответствует ферри-магнезиальной роговой обманке с пониженным содержанием алюминия. Она обладает слабо выраженной зональностью: содержание Mg уменьшается от центра кристаллов к краям, а содержание Fe и Al растет. Зональность циркона выражается в том, что содержание гафния в центральных частях кристаллов примерно в полтора раза выше, чем в краевых зонах.

Апатит относится к фтористым, концентрация фтора в апатите около 3%, хлора нет ни в одной пробе.

Изотопная характеристика. Для определения изотопного возраста метатрондьемитов из двух проб 14125-3 и 14125-4 (56°15'56,1" с.ш., 59°48'10,5" в.д.) было выделено около 100 зерен циркона, из которых было проанализировано 33 зерна (табл. 1, 2; рис. 17). Размер кристаллов от 70 до 200 мкм, по большей части — около 100 мкм. Популяция цирконов очень однородная, они имеют четкие кристаллографические очертания и обладают ясной секториальной зональностью, а также грубой осцилляционной зональностью. В кристаллах часто присутствуют многочисленные включения и метамиктные зоны.

Из пробы 14125-3 проанализировано 13 зерен, а из пробы 14125-4 — 20 зерен (рис. 17). Из тридцати трех зерен для девяти дискордантность оказалась очень высокой (выше |13|), эти зерна из расчетов исключены.

Таблица 1

Результаты U-Pb изотопных исследований зерен циркона из метатрондьемитов кенчурского комплекса (анализы 114125-3)

№ анализа	²⁰⁶ Pb _c , %	Содержание, г/г			²³² Th/ ²³⁸ U	Возраст, млн лет				D, %	Изотопные отношения, ±% (1σ)								Rho
		U	Th	²⁰⁶ Pb*		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*		²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U							
10.1	0,00	315	324	25,5	1,06	582	±4	560	±54	-4	10,6	0,7	0,0588	2,5	0,77	2,6	0,094	0,7	0,3
8.1	0,00	302	279	24,6	0,95	582	±4	609	±50	±5	10,6	0,7	0,0602	2,3	0,78	2,4	0,095	0,7	0,3
3.1	0,00	414	460	33,7	1,15	582	±7	573	±38	-2	10,6	1,3	0,0592	1,8	0,77	2,2	0,095	1,3	0,6
6.1	0,00	396	455	32,2	1,19	583	±7	531	±43	-10	10,6	1,3	0,0580	1,9	0,76	2,3	0,095	1,3	0,5
4.1	0,00	240	280	19,5	1,21	583	±10	625	±58	±7	10,6	1,7	0,0606	2,7	0,79	3,2	0,095	1,7	0,5
9.1	0,00	289	303	23,7	1,08	588	±4	528	±54	-12	10,5	0,7	0,0580	2,4	0,76	2,6	0,095	0,7	0,3
5.1	0,00	307	222	25,2	0,75	589	±9	534	±57	-11	10,4	1,6	0,0581	2,6	0,77	3,1	0,096	1,6	0,5
1.1	0,00	329	308	27,1	0,97	591	±4	534	±47	-11	10,4	0,7	0,0581	2,1	0,77	2,3	0,096	0,7	0,3
2.1	0,00	123	91	10,2	0,76	592	±12	642	±104	±8	10,4	2,0	0,0611	4,8	0,81	5,3	0,096	2,0	0,4
7.1	0,00	438	442	36,8	1,04	601	±8	578	±37	-4	10,2	1,5	0,0593	1,7	0,80	2,2	0,098	1,5	0,7
13.1	0,00	158	174	13,3	1,14	602	±5	566	±98	-7	10,2	0,8	0,0590	4,5	0,80	4,6	0,098	0,8	0,2

Примечания. ²⁰⁶Pb и ²⁰⁶Pb* — содержание обыкновенного и радиогенного свинца соответственно; изотопные отношения и значения возраста скорректированы по измеренному ²⁰⁴Pb; D — дискордантность: D = 100 [возраст (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)/возраст (²⁰⁶Pb/²³⁸U) - 1]; Rho — коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U.

Таблица 2

Результаты U-Pb изотопных исследований зерен циркона из гранофельсов кенчурского комплекса (анализ 114125-3)

№ анализа	²⁰⁶ Pb _c , %	Содержание, г/г			²³² Th/ ²³⁸ U	Возраст, млн лет				D, %	Изотопные отношения, ±% (1σ)								Rho
		U	Th	²⁰⁶ Pb*		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb*	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb*		²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U							
6.1	0,00	418	549	32,5	1,36	559	±4	564	±47	+1	11,0	0,7	0,0589	2,2	0,74	2,3	0,091	0,7	0,3
13.1	0,00	91	75	7,18	0,86	569	±6	618	±167	+8	10,8	1,0	0,0604	7,7	0,77	7,8	0,092	1,0	0,1
18.1	0,00	408	447	33,1	1,13	582	±4	625	±40	+7	10,6	0,6	0,0606	1,8	0,79	2,0	0,094	0,6	0,3
12.1	0,00	145	136	11,8	0,97	584	±5	595	±88	+2	10,5	0,9	0,0598	4,1	0,78	4,2	0,095	0,9	0,2
8.1	0,00	317	210	25,9	0,69	586	±6	581	±49	-1	10,5	1,1	0,0594	2,3	0,78	2,5	0,095	1,1	0,4
14.1	0,00	199	171	16,2	0,89	586	±7	603	±75	+3	10,5	1,2	0,0600	3,5	0,79	3,7	0,095	1,2	0,3
19.1	0,00	858	1263	70,1	1,52	586	±5	591	±25	+1	10,5	0,8	0,0596	1,1	0,78	1,4	0,095	0,8	0,6
20.1	0,00	1149	1839	94	1,65	587	±7	546	±20	-8	10,5	1,2	0,0584	0,9	0,77	1,5	0,095	1,2	0,8
3.1	0,00	199	197	16,3	1,02	587	±4	548	±82	-7	10,5	0,8	0,0585	3,8	0,77	3,9	0,095	0,8	0,2
4.1	0,00	469	592	38,7	1,30	591	±7	561	±45	-6	10,4	1,2	0,0588	2,1	0,78	2,4	0,096	1,2	0,5
17.1	0,00	83	69	6,81	0,86	591	±7	593	±188	+0	10,4	1,2	0,0597	8,7	0,79	8,8	0,096	1,2	0,1
2.1	0,00	162	183	13,4	1,17	593	±4	579	±81	-3	10,4	0,8	0,0593	3,7	0,79	3,8	0,096	0,8	0,2
11.1	0,00	311	284	28,4	0,94	653	±7	629	±44	-4	9,4	1,2	0,0607	2,0	0,89	2,4	0,107	1,2	0,5

Примечания. ²⁰⁶Pb_c и ²⁰⁶Pb* — содержание обыкновенного и радиогенного свинца соответственно; изотопные отношения и значения возраста скорректированы по измеренному ²⁰⁴Pb; D — дискордантность: D = 100 · [возраст (²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb)/возраст (²⁰⁶Pb/²³⁸U) - 1]; Rho — коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений ²⁰⁶Pb/²³⁸U и ²⁰⁷Pb/²³⁵U.

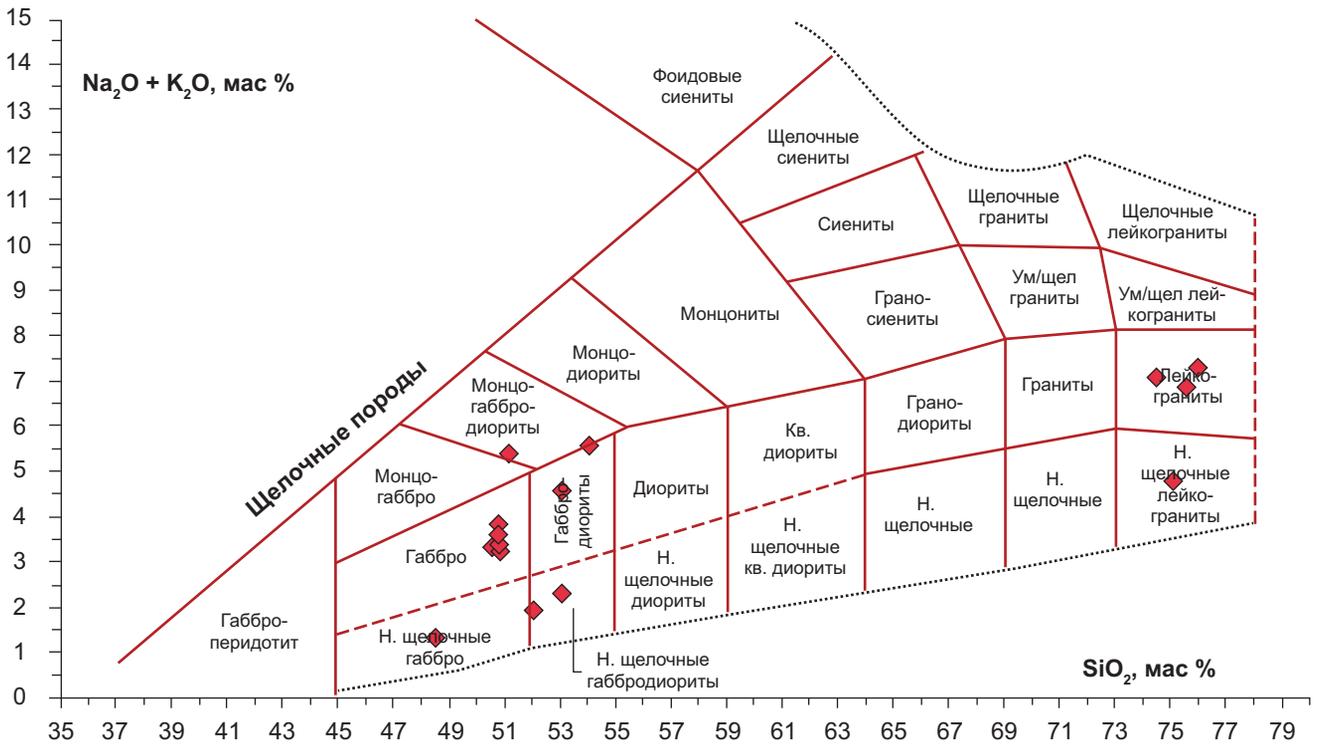


Рис. 9. Диаграмма TAS для пород кенчурского комплекса

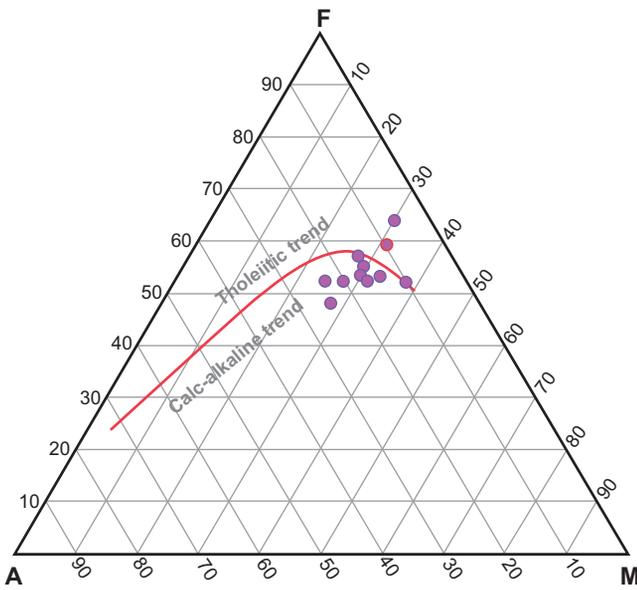


Рис. 10. Диаграмма AFM для габброидов кенчурского комплекса (линия раздела по Куно)

В пробе 14125-3 из расчета исключена точка 13.1 с наибольшим возрастом (602 млн лет) и рассчитан конкордантный возраст $586 \pm 3,4$ млн лет по 10 точкам при СКВО = 0,042 и вероятности конкордантности = 0,84 (рис. 18). В пробе 14125-4 из расчета исключены точки 6.1 и 15.1, которые имеют более молодой относительно других возраст, а также точка 11.1, имеющая возраст 653 ± 7 млн лет и относящаяся к зерну, резко отличающемуся от остальных (у него нет секториальной зональности и хорошо

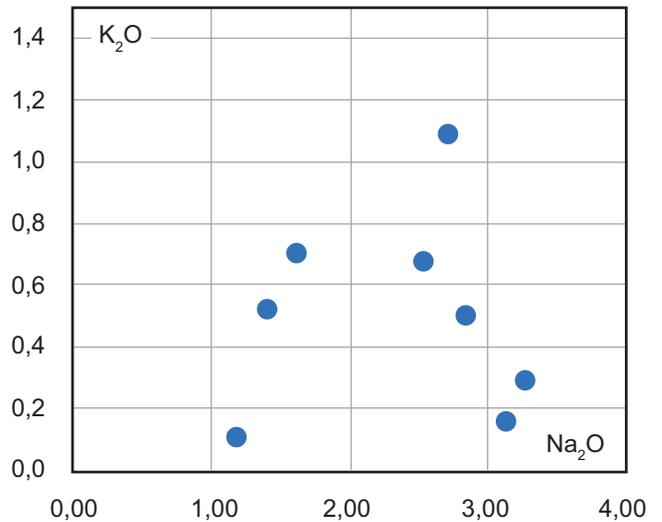


Рис. 11. Диаграмма K₂O–Na₂O для габброидов кенчурского комплекса

выражена осцилляционная). Это явно захваченное более древнее зерно, возможно относящееся к указарскому комплексу. Конкордантный возраст, рассчитанный по 10 точкам, составляет $585,0 \pm 3,2$ млн лет при СКВО = 0,0019 и вероятности = 0,96.

Рассчитанный для 20 точек интегральный конкордантный возраст составляет $585,8 \pm 2,3$ млн лет при СКВО = 0,023 и вероятности конкордантности = 0,88.

Таким образом, возраст метатрондьемитов кенчурского комплекса с высокой степенью достоверности составляет 586 млн лет, что соответствует

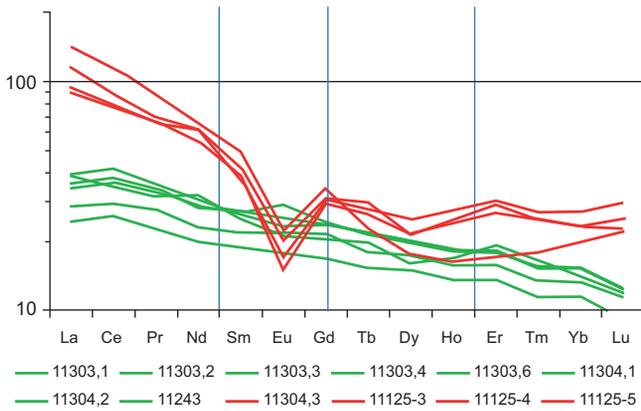


Рис. 12. Распределение РЗЭ в породах кенчурского комплекса (нормировано по хондриту C1 [Sun, McDonough, 1989]). Красные линии — метатрондымиты, зеленые линии — габбро

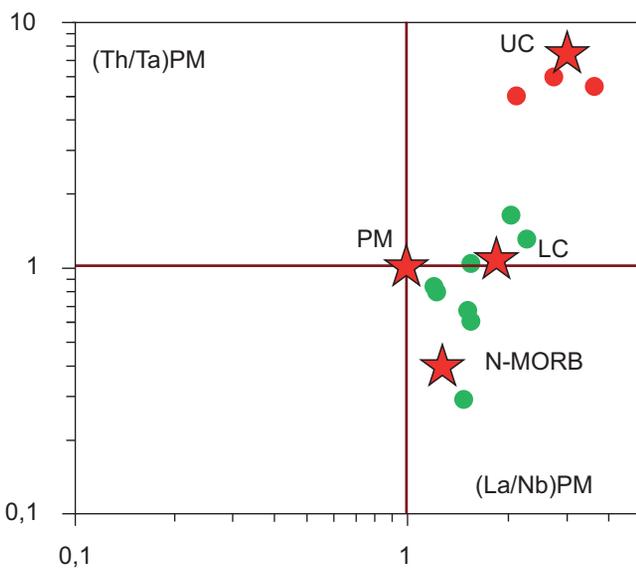


Рис. 14. Диаграмма $(Th/Ta) - (La/Nb)$, нормированные по примитивной мантии (заимствовано в [Беликова, 2013]). Составы: PM, N-MORB, по [Sun, McDonough, 1989]; континентальная верхняя (UC) и нижняя (LC) кора, по [Rudnick, Gao, 2003]. Красные точки — метатрондымиты, зеленые — габброиды

раннему венду. Этот возраст принят и для кенчурского комплекса в целом.

Обсуждение результатов. В пределах Уфалейского блока изотопные и геохимические исследования были сосредоточены, главным образом, на характеристике метаморфитов и гранитоидов. Так в работе [Краснобаев и др., 2010] описаны три пробы цирконов из амфиболитов, плагиаомфиболитов и гнейсо-гранитов. Изотопный возраст цирконов оказался раннеордовикским и раннекембрийским при удивительно плохой сохранности цирконов, практически лишенных кристаллографических граней. При этом никаким образом не определено, к каким комплексам относятся эти породы. Вендские цирконы не обнаружены. Похожие результаты получены при проведении разнообразных работ по изучению магматитов Уфалейского блока [Ронкин и др., 2006, 2009; Шардакова, 2016; Шардакова, Червяковская, 2020], причем многие работы касались

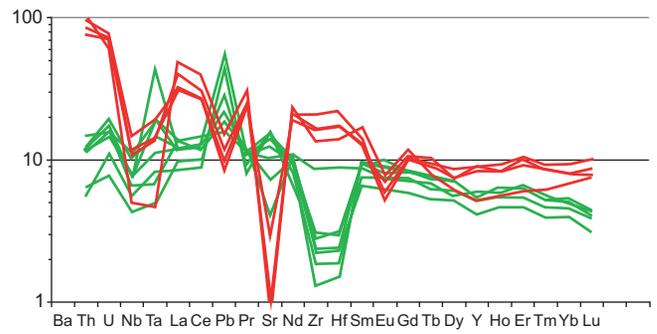


Рис. 13. Распределение рассеянных элементов в породах кенчурского комплекса (нормировано на примитивную мантию [Sun, McDonough, 1989]). Красные линии — метатрондымиты, зеленые линии — габбро

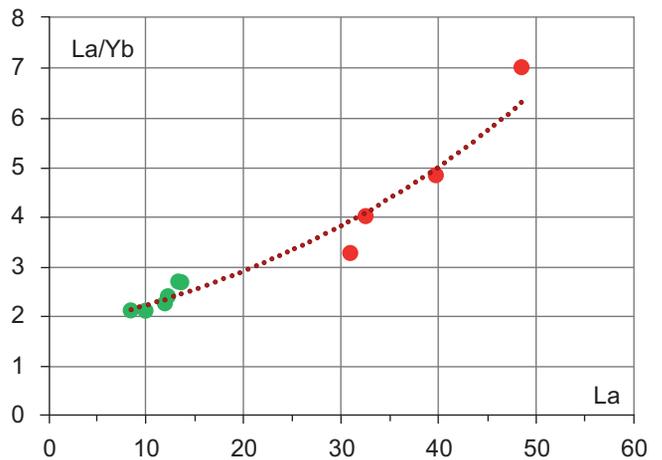


Рис. 15. Диаграмма $La/Yb - La$. Красные точки — метатрондымиты, зеленые — габброиды

совсем молодых (каменноугольных) гранитов. По данным [Шардакова, Червяковская, 2020] частично к венду могут быть отнесены умереннощелочные гранитоиды битимского комплекса, однако в этом комплексе нет габброидов, а умереннощелочной состав не соответствует составу пород кенчурского комплекса.

Вендские магматические комплексы известны и в других блоках Центрально-Уральской мегазоны — Кваркушском и Башкирском. В обобщающей работе Г.А. Петрова и др. [2005] описаны практически все докембрийские магматические комплексы Кваркушского блока. Наиболее близкий возраст к кенчурским метатрондымитам имеют гранитоиды европейского комплекса (581 ± 3 млн лет по [Beckholmen, et al., 1999]), однако в этом комплексе нет габброидов, а состав гранитоидов существенно более щелочной. По мнению А.М. Зильбермана и др. [1980] вендский возраст имеют метагаббро-метадолериты кваркушского комплекса, которые, кстати, по составу весьма близки к метагабброидам кенчурского комплекса. Однако возраст комплекса до настоящего времени не подтвержден изотопными данными. Кроме того, авторами описан вендский дворецкий вулканический комплекс, представлен-

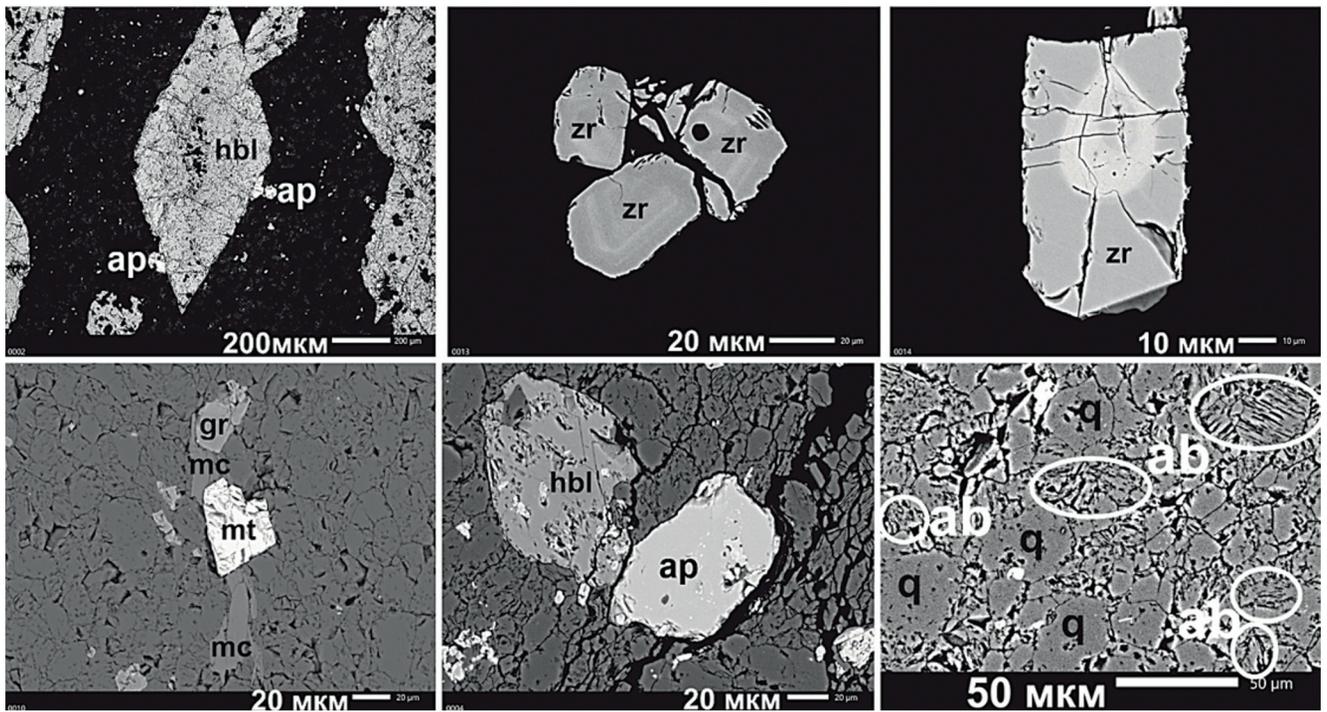


Рис. 16. Снимки минералов (электронный микроскоп). hbl — роговая обманка, ap — апатит, zr — циркон, mt — магнетит, mc — слюда, gr — гранат, q — кварц, ab — альбит (обведен белыми овалами)

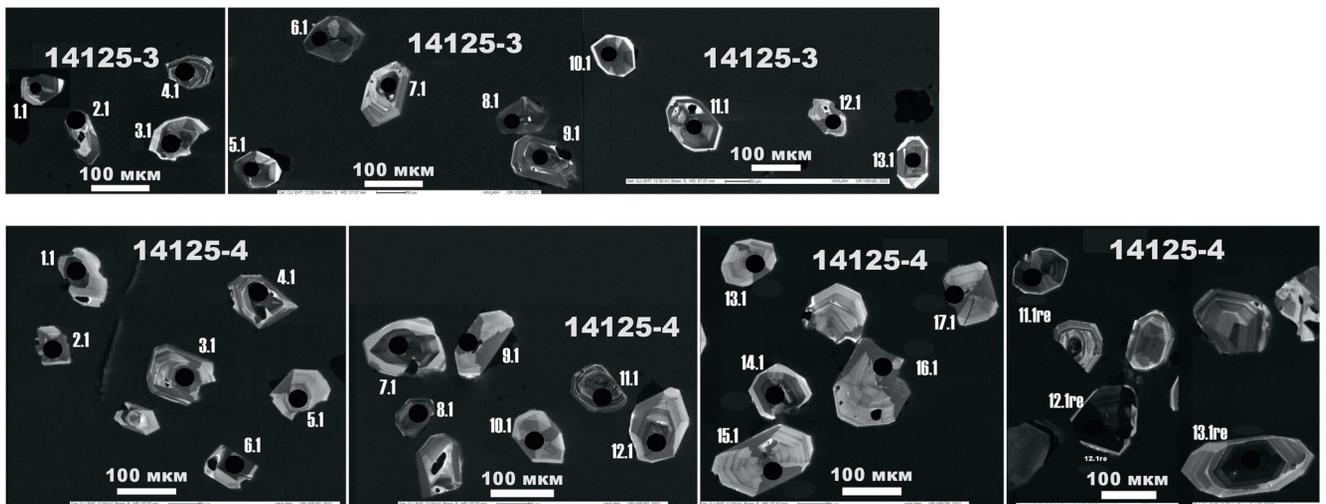


Рис. 17. Катодолуминесцентные снимки зерен циркона из метатрондьемитов. Пробы 14125-3 и 14125-4

ный трахибазальтами, щелочными пикритами, гиаломеланефелинитами, трахиандезитами, трахитами и карбонатитами. Sm–Nd и Rb–Sr методами по монофракциям клинопироксенов и валу пород для трахиандезитов получены датировки, соответственно, 569 ± 42 и 559 ± 16 млн лет [Карпущина и др., 2001]. По мнению авторов работы докембрийский магматизм Кваркушского блока связан с различными этапами формирования мантийного плюма с завершающим вендским этапом. Кваркушский комплекс авторы относят к завершающему этапу развития плюма.

Совершенно другая картина характерна для венда Башкирского блока, точнее — для зоны Уралтау. На южном замыкании зоны Уралтау, в Эбетинской

антиформе описана вендская лушниковская свита, для риолитовых туфов которой определен U–Pb изотопный возраст $591,5 \pm 3,5$ млн лет [Рязанцев, 2018], а также прорывающие ее вендские гранитоиды с U–Pb изотопным возрастом 590 ± 4 и $577,8 \pm 8,6$ млн лет [Самыгин и др., 2010]. Эти исследователи трактуют геодинамическую природу этих магматитов как над-субдукционную.

В других работах декларируется рифтогенная геодинамическая обстановка в пределах Центрально-Уральской мегазоны, которая в позднем протерозое-венде представляла собой окраину Восточно-Европейской платформы [Пучков, 2010; 2015 и др.].

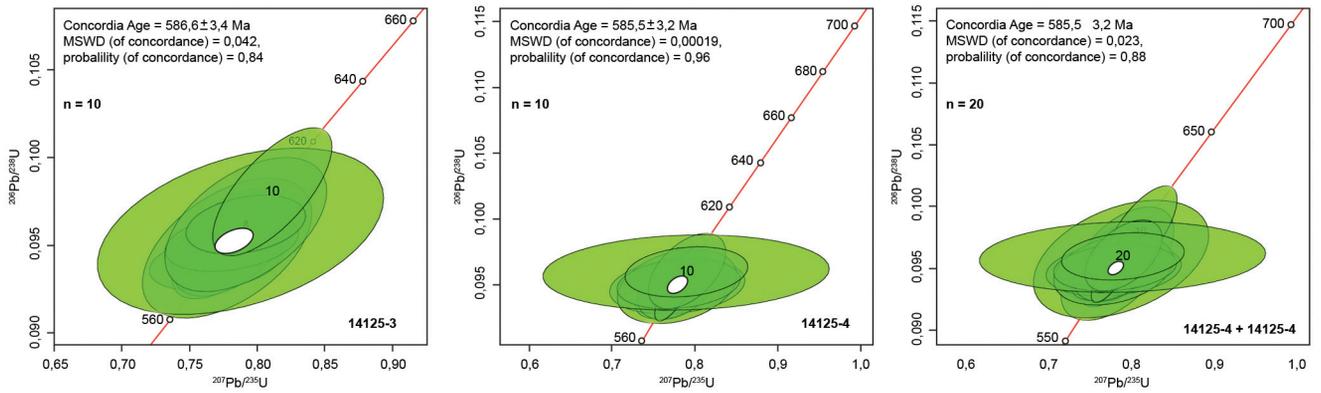


Рис. 18. U–Pb диаграмма с конкордией для проанализированных цирконов из метатрондьемитов проб 14125-3 и 14125-4, а также интегральная диаграмма для обеих проб (эллипсы фигуративных точек соответствуют погрешности 2σ)

Выводы. Центрально-Уральская мегазона представляет собой «эксгумированный докембрийский фундамент палеозойской континентальной окраины» (по [Пучков, 2000]), образуя цепь отдельных уникальных блоков, принципиально различающихся не только набором стратифицированных образований, но и характером вендского магматизма, а следовательно, и геодинамическими обстановками формирования.

Кенчурский комплекс представляет собой низкощелочную габбро-трондьемитовую ассоциацию, формировавшуюся из существенно различных ис-

точников — мантийного и корового. Метатрондьемиты кенчурского комплекса являются в настоящее время единственными породами Уфалейского блока, для которых доказан ранневендский изотопный возраст (586 ± 2 млн лет). Они формировались в обстановке рифтинга.

Благодарности. Авторы искренне благодарят А.В. Рязанцева за ценные замечания, способствовавшие улучшению статьи, и помощь в интерпретации изотопных данных. Спасибо также А.О. Хотылеву за советы по интерпретации геохимических данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Беликова Г.И. Графическая идентификация в химической геодинамике по соотношениям петрогенных компонентов (применительно к базальтам) // Геологический сборник № 10. Информационные материалы / ИГ УНЦ РАН. Уфа: ДизайнПресс, 2013. С. 155–159.

Гаврилова С.П., Градовский И.Ф., Караулов В.Б. Позднепротерозойский магматизм Уфалейского антиклинория // Известия вузов. Геология и разведка. 2007. № 1. С. 11–21.

Зильберман А.М., Чернышова Е.М., Кичигин Ю.Н. Новые проявления щелочно-ультраосновного вулканизма на западном склоне Среднего Урала // Доордовикская история Урала. Ч. 3. Вулканизм. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1980. С. 30–46.

Карпухина Е.В., Первов В.А., Журавлев Д.З. Петрология щелочного вулканизма — индикатора поздневендского рифтогенеза, западный склон Урала // Петрология. 2001. Т. 9, № 5. С. 480–503.

Краснобаев А.А., Русин А.И., Бушарина С.В. и др. Состав, цирконы и цирконовая геохронология метаморфитов уфалейского комплекса // ЕЖЕГОДНИК-2009. Тр. ИГГ УрО РАН. 2010. Вып. 157. С. 273–279.

Петров Г.А. Кваркушко-Каменногорский антиклинорий — фрагмент позднепротерозойской рифтогенной континентальной окраины // ЕЖЕГОДНИК-2014. Тр. ИГГ УрО РАН. 2015. Вып. 162. С. 127–131.

Петров Г.А., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л. Допалеозойские магматические комплексы Кваркушко-Каменногорского антиклинория (Средний Урал): новые данные геохимии и геодинамике // Литосфера. 2005. № 4. С. 42–69.

Пучков В.Н. Геология Урала и Приуралья (актуальные вопросы стратиграфии, тектоники, геодинамики и металлогении). Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2010. 280 с.

Пучков В.Н. Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: ГИЛЕМ, 2000. 146 с.

Ронкин Ю.Л., Шардакова Г.Ю., Маслов А.В. и др. Гранитоиды Уфалейского блока (Южный Урал): Sr–Nd изотопная систематика, геодинамическая позиция, генетические реконструкции // Стратиграфия, геологическая корреляция. 2009. № 17 (2). С. 29–37.

Ронкин Ю.Л., Шардакова Г.Ю., Шагалов Е.С. и др. Sr–Nd систематика гранитоидов Уфалейской зоны (Ю. Урал) // Ежегодник-2005. ИГГ УрО РАН. Екатеринбург, 2006. С. 318–322.

Рязанцев А.В. Вендский надсубдукционный магматизм на Южном Урале // Докл. АН. 2018. Т. 482, № 3. С. 311–314.

Самыгин С.Г., Белова А.А., Рязанцев А.В., Федотова А.А. Фрагменты вендской конвергентной окраины на Южном Урале // Докл. АН. 2010. Т. 432, № 5. С. 644–649.

Шардакова Г.Ю. Гранитоиды Уфалейского блока: геодинамические обстановки, возраст, источники, проблемы // Литосфера. 2016. № 4. С. 133–137.

Шардакова Г.Ю., Червяковская М.В. Венд-кембрийские гранитоиды Уфалейского блока (Средний Урал): новые изотопные данные, состав субстрата, потенциальная рудоносность // Изв. Уральского гос. горного ун-та. 2020. № 2(58). С. 48–63.

Beckholmen M., Petrov G., Larionov A. Rifted margins of Baltica in the Scandinavian Caledonides and the Uralides // EUG-10. Abstracts. Cambridge publ., 1999. P. 93.

Black L.P., Kamo S.L., Allen C.M., et al. TEMORA 1: a new zircon standard for U-Pb geochronology // *Chemical Geology*. 2003. P. 155–170.

Ludwig K.R. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Squid 1.02: A User Manual. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2001.

Ludwig K.R. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel: User's Manual for Isoplot/Ex, Version 3.00. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.

Rudnick R.L., Gao S. The Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry*: 10 Vol. Set. Oxford: Elsevier Ltd., 2003. V. 3: The Crust / R.L. Rudnick (ed.). P. 1–64.

Schuth S., Gornyy V.I., Berndt J. et al. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia // *International Journal of Geosciences*. 2012. V. 3, No 2. P. 289–296.

Stacey S., Kramers J.D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model // *Earth and Planetary Science Letters*. 1975. N 26. P. 207–221.

Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in ocean basins*. Geol. Soc. Spec. Publ. London, 1989. N 42.

Wiedenbeck M., Allé P., Corfu F. et al. Three Natural Zircon Standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, Trace Element and REE Analyses // *Geostandards Newsletter*. 1995. V. 19. P. 1–23.

Williams I.S. U-Th-Pb Geochronology by Ion Microprobe // *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes* / Eds. M.A. McKibben, W.C. Shanks III, W.I. Ridley // *Reviews in Economic Geology*. 1998. N 7. P. 1–35.

Статья поступила в редакцию 04.03.2024,
одобрена после рецензирования 21.03.2024,
принята к публикации 18.08.2024