ЕЖЕГОДНИК-2009, Тр. ИГГ УрО РАН, вып. 157, 2010, с. 267–272

ГЕОХРОНОЛОГИЯ

ЦИРКОНОЛОГИЯ АМФИБОЛИТОВ ЛИПОВОЙ КУРЬИ (ИЛЬМЕНОГОРСКАЯ ЗОНА, ЮЖНЫЙ УРАЛ)

А. А. Краснобаев, П. М. Вализер*, Е. В. Медведева*, А. И. Русин, Е. В. Дубинина*, Н. Н. Банева

Амфиболиты Липовой Курьи (ЮВ берег оз. Б. Миассово) относятся к особому типу метабазитов Ильменогорской зоны [1]. Впервые они были обнаружены и описаны К.И. Постоевым [12] как "анортитовые амфиболиты" экзоконтактовых зон серпентинитовых массивов (Няшевка и др.). Позже [2], в северной части Ильменских гор было выявлено несколько самостоятельных будинообразных (5–10 × 100–150 м) тел анортитовых амфиболитов, залегающих согласно с рассланцованностью вмещающих пород и имеющих петрографическое сходство с "экзоконтактовыми амфиболитами". Подчеркивалось, что по особенностям химического состава (высокие содержания кальция, магния, алюминия) анортитовые амфиболиты не имеют аналогов среди других типов амфиболитов Ильменских гор, но характеризуются парагенетическим сходством с диопсид-роговообманковым габбро Кытлымского массива [2]. Вместе с тем, высказывалось мнение [5], что ассоциация анортитовых амфиболитов с метагипербазитами и вмещающие их толщи относятся к рифейским "рифтогенным офиолитам", испытавшим зональный динамотермальный метаморфизм, сопряженный с формированием антиклинорной структуры, и среднекаледонский региональный кремнекислый метасоматоз. Предполагалась апавулканическая природа мафит-ультрамафитовой ассоциации, стратиграфический контроль будинированных тел и изофациальность термальной структуре антиклинория. Эти представления основывались, главным образом, на петрографических исследованиях метагиперазитовых массивов.

Детальное картирование и петрографо-минералогические исследования, проводившиеся В.Г. и Е.В. Кориневскими [9,10 и др.] в восточной части Ильменского заповедника, дали много новой информации. Было установлено, что анортитовые амфиболиты, ассоциированные с метагипербазитами, слагают разрозненные глыбы размером до первых десятков метров, ограниченные резкими контактами и хаотически распространенные на площади развития кварцито-сланцевых толщ саитовской серии. Они характеризуются специфическими особенностями химического состава и не имеют аналогов среди интрузивных пород нормального ряда. Очень низкие содержания кремнезема (от 30 до 40–43%) и высокие – Al_2O_3 (более 17–22%) и CaO (18–29%), при значимых колебаниях соотношений петрогенных компонентов в отдельных глыбах, обусловливают большое разнообразие минеральных типов анортитовых амфиболитов (гранатовые, диопсидовые, цоизитовые, шпинелевые, кианитовые, корундовые и др.). Впервые были исследованы составы породообразующих и акцессорных минералов метабазитов и ассоциированных с ними метагипербазитов, выделены новые для Ильмен минеральные виды (высокожелезистые оливины и ортопироксены, высококальциевые гранаты, геденбергит, фассаит и др.), выполнена предварительная оценка PT-параметров минеральных равновесий в метабазитах и вмещающих сланцах. Полученные В.Г. и Е.В. Кориневскими результаты вводили серьезные ограничения в построения А.С. Варлакова и развернувшуюся в печати острую дискуссию между этими исследователями можно было бы считать завершенной. Однако, сосредоточив основное внимание на критике концепции "рифтогенных офиолитов", Кориневские не смогли дать адекватной оценки всей совокупности полученных ими новых данных. Предлагавшиеся ими объяснения природы чужеродных блоков ("апоэклогитовые", "продукты метаморфизованного меланжа либо дезинтегрированной древней глинисто-карбонатной коры выветривания", "олистолиты", "габбро-гипербазитовые интрузии платиноносного типа") являются взаимоисключающимися и не могут составить основу единой непротиворечивой концепции.

Следует отметить, что все исследователи, обсуждавшие проблему генезиса анортитовых амфиболитов Ильмен, основывались на традиционных представлениях об антиклинорной структуре этого региона, с четко обособляющимися "гнейсовым ядром" и "сланцевым обрамлением", сложенных в различной степени метаморфизованными стратифицированными толщами. Новая трактовка Ильмено-Вишневогорской структуры [6,13] как глубинного фрагмента региональной постколлизионной сдвиговой зоны и анализ всех имеющихся материалов позволили предположить, что анортитовые амфиболиты, ассоциированные с метагипербазитами, являются элементами сложно построенной многофазной щелочно-ультраосновной интрузии центрального типа, дезинтегрированной и рас-

* Ильменский государственный заповедник, г. Миасс.

тащенной в зоне сдвига более чем на 100 км. Важными аргументами в такой интерпретации стали данные о тектоническом и реологическом контроле дезинтегрированных фрагментов с вмещающими породами и химизм мафит-ультрамафитовой ассоциации. В осевой зоне сдвига преобладающими породами являются не гнейсы, а гранитоидные бластомилониты. Залегающие в них в виде тектонических клиньев фрагменты раннедокембрийского фундамента ("селянкинский комплекс") и цепочки будинообразных мафит-ультрамафитовых включений ориентированы согласно с направлением тектонического потока. В прилегающих к осевой зоне кварцито-сланцевых толщах чехла ("саитовская серия") деформационные процессы реализовались в поле гидростатических напряжений, и резкий контраст реологических свойств обусловил хаотическое размещение мафит-ультрамафитовых блоков. Вне зависимости от пространственного положения, все "метабазитовые" составляющие мафит-ультрамафитовой ассоциации характеризуются недосыщенностью кремнеземом и в них обязательно рассчитывается присутствие нормативного оливина, нефелина и ларнита. Это, несомненно, щелочные породы. В их нормативном составе обнаруживается качественное сходство в наборах минералов с породами ийолит-якупирангитовой серии. Общей же геохимической особенностью пород мафит-ультрамафитовой ассоциации являются аномально высокие содержания редких и редкоземельных элементов, вполне сопоставимые с их концентрациями в миаскитах и щелочных нефелиновых сиенитах [13].

В настоящее время имеется обширная база данных по составам минералов "анортитовых амфиболитов" и вмещающих их комплексов [2, 4, 7, 9–11, и др.]. Анализ этих материалов дает основание утверждать, что "анортитовые амфиболиты" являются глубинными породами. Их типовой парагенезис (An+Di+Hb±Gr±Ky, Cor, Sp) представлен высококальциевыми и высокоглиноземистыми минералами, что позволяет предполагать их связь с карбонатизированной и обогащенной редкими и редкоземельными элементами мантией. Это заключение согласуется с данными по изотопии Nd и Sr в ультрамафитах, ассоциированных с метабазитами, указывающими на обогащенные мантийные резервуары типа EM1 и EM2 [3]. В аспекте проблемы глубинных источников вещества заслуживает внимания факт присутствия в анортитовых амфиболитах высококальциевых альмандин-гроссуляровых гранатов. Длительное время считалось, что между гранатами с 35 и 70 ат. % гроссуляра существует разрыв смесимости. Вместе с тем, высказывалось предположение [16], что гранаты с таким содержанием гроссуляра все же существуют и возникают в необычных бедных кремнеземом породах в соответствующих физико-химических условиях. Это предположение получило надежное подтверждение после открытия в трубке Загадочной гроспидитов [14], содержащих непрерывную серию пироп-гроссуляровых гранатов (43–82 ат. % Gross), последующего исследования гроспидитов и кианитовых эклогитов в кимберлитах Южной Африки [8]. Экспериментальные исследования ассоциаций субсолидуса, образующихся за счет гроспидитов [7], показали, что ассоциация высококальциевого граната с клинопироксеном и плагиоклазом является устойчивой в интервале давлений от 22.5 до 27 кбар. С повышением давления до 36 кбар плагиоклаз исчезает, появляется кианит и увеличивается доля граната по отношению к клинопироксену, а содержание гроссуляра в гранате заметно возрастает.

Следует особо подчеркнуть, что исследованные в экспериментах Т.Х. Грина химические и нормативные составы синтетических проб гроспидитов имеют сходные характеристики с составами анортитовых амфиболитов Ильменогорской зоны, а компонентный состав гранатов ($Pyr_{9-11}Alm_{34-39}Gros_{50-55}$), кристаллизовавшихся при давлениях 27–36 кбар, тождествен альмандин-гроссулярам гранатовых разновидностей [4, 10, 11]. Важной особенностью клинопироксен-гранатовых ксенолитов кимберлитов является характер соотношения содержаний Na_2O в клинопироксенах и гроссуляра в сосуществующих гранатах. "Эмпирическое правило Соболева" [14] об одновременном возрастании гроссуляра в гранате и натрия в пироксенах гроспидитов и падении содержания гроссуляра в гранате параллельно с увеличением содержания натрия в пироксене эклогитов, подтверждено наблюдениями над природными объектами, термодинамическими расчетами и экспериментами [7, 8]. Отмечаются заметные колебания в минальном составе гранатов гроспидитов даже в пределах одного образца, в то время как состав гранатов эклогитовых ксенолитов характеризуется большим постоянством. Сосуществующие с гранатами клинопироксены гроспидитов и эклогитов существенно различаются по содержаниям жадеитового компонента. Эти же закономерности обнаруживаются в гранат-диопсид-анортитовых амфиболитах Ильменогорской зоны. Клинопироксены в них содержат незначительное количество натрия, а в их компонентном составе обязательно рассчитывается присутствие кальциевой молекулы Чермака и псевдожадеитовой молекулы Эскола. Данные парагенетического анализа показывают, что многообразие и особенности минерального состава анортитовых амфиболитов Ильмен было обусловлено как термодинамическими параметрами их формирования, так и особенностями валового химического состава пород. Отсутствие граната в Няшевских и некоторых других глыбах амфиболитов связано с их повышенной магнезиальностью (F < 36 ат. %), как и увеличение содержания пиропового компонента

Таблица 1. Результаты U-Pb изотопного анализа цирконов из гранат-анортит-клинопироксен-амфиболовых пород

Анализ кратер	$^{206}Pb_o$, %	Содержание, ppm			$\frac{^{232}Th}{^{238}U}$	Возраст, млн. лет (1)		D, %	Изотопные отношения (1)		
		U	Th	$^{206}Pb^*$		$\frac{^{206}Pb}{^{238}U}$	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$		$^{207}Pb/^{206}Pb^*$, ± %	$^{207}Pb/^{235}U^*$, ± %	$^{206}Pb/^{238}U^*$, ± %
1.1	0.53	304	147	23.1	0.50	543.6 ± 9.2	542 ± 61	0	0.06264 ± 1.4	0.708 ± 3.3	0.088 ± 1.8
1.2	2.87	155	42	12.4	0.28	557 ± 11	620 ± 240	11	0.0838 ± 2.1	0.752 ± 11.0	0.0902 ± 2.1
2.1	0.82	85	68	8.22	0.82	680 ± 13	625 ± 140	–8	0.0674 ± 2.4	0.929 ± 6.8	0.1112 ± 2.1
2.2	0.64	57	29	5.46	0.53	680 ± 13	751 ± 120	10	0.0695 ± 3.0	0.986 ± 6.1	0.1113 ± 2.1
3.1	0.15	484	327	43.6	0.70	642 ± 11	638 ± 38	–1	0.06219 ± 1.1	0.881 ± 2.5	0.1048 ± 1.7
4.1	0.54	749	451	57.4	0.62	548.1 ± 9	544 ± 61	–1	0.06274 ± 0.92	0.714 ± 3.3	0.0887 ± 1.7
5.1	2.30	504	426	39.6	0.87	551.8 ± 9.3	580 ± 190	5	0.0781 ± 5.5	0.731 ± 8.7	0.0894 ± 1.8
6.1	0.59	234	58	16.8	0.26	513.7 ± 9.3	497 ± 160	–3	0.0619 ± 1.7	0.654 ± 7.4	0.083 ± 1.9
7.1	0.43	180	104	13.5	0.59	537.3 ± 9.4	609 ± 93	13	0.0637 ± 2.1	0.721 ± 4.7	0.0869 ± 1.8
8.1	0.19	279	185	21.5	0.68	551.7 ± 9.3	589 ± 50	7	0.0611 ± 2.1	0.734 ± 2.9	0.0894 ± 1.8

Примечание. Pb_o и Pb* – общий и радиогенный свинец, (1) – коррекция по ^{204}Pb, D – дискордантность.

до 15–20% в альмандин-гроссуляровых гранатах Уразбаевского участка. Отчетливо прослеживается связь появления высокоглиноземистых минералов (кианит, корунд, Al-шпинель) с низкими значениями отношения Ca/Al в породах. Вся же совокупность имеющихся материалов не оставляет сомнений в том, что группа анортитовых амфиболитов Ильмен должна рассматриваться как “апагроспидитовая”.

Выдвигаемое представление об апогроспидитовой природе анортитовых амфиболитов открывает новые возможности в понимании глубинных источников вещества щелочно-ультраосновной ассоциации Ильменогорской сдвиговой зоны, возможных путях ее эволюции и характере связей с миаскит-карбонатитовой ассоциацией. Эти вопросы заслуживают специального обсуждения, но уже сейчас можно говорить, что “гроспидитовый уровень” генерации исходных щелочно-ультраосновных расплавов в карбонатизированном и обогащенном мантийном резервуаре мог вполне быть и источником углекислотных, и стерильных относительно радиоактивных элементов растворов, обусловливающих выщелачивание U и Th из цирконов миаскит-карбонатитовой ассоциации и придающих им сходство по этим параметрам с цирконами кимберлитов.

Прецизионные данные о времени формирования анортитовых амфиболитов отсутствовали, и в качестве объекта для изотопно-хронологического исследование цирконов нами были выбраны ассоциированные с метагипербазитами гранат-анортит-клинопироксен-амфиболовые породы Липовой курьи, формирующие глыбообразные выходы среди кварцитосланцев саитовской серии. Детальное петролого-минералогическое и геохимическое изучение этих пород [4] позволяет относить их к типичным представителям щелочно-ультраосновной ассоциации Ильменогорской зоны. Они характеризуются недосыщенностью кремнеземом (SiO_2 = 32–39%) и повышенными содержаниями CaO (16–23%), Al_2O_3 (18–22%) и РЗЭ (до 100 ppm). Общая железистость пород составляет 64–75 мол. %, а отношение Ca/Al в них изменяется от 0.67 до 1.18. Альмандин-гроссуляровые гранаты ($Pyr_{4,9–7,3}Alm_{30–46}Spes_{2–5}Gros_{44–62}$) и сосуществующие с ними клинопироксены, с низким содержанием щелочей, были уравновешены при T > 750ºC и P = 28–30 кбар. Равновесия рассчитанные по программам “GeoPatch 2.1” и “Celektor” с участием гидроксилсодержащих минералов (паргасит, калий-паргасит и др.) дают значения T = 750–550ºC и P = 9.5–5.5 кбар, отражающие видимо условия декомпрессионного подъема. Акцессорные минералы в породах представлены ильменитом, рутилом, апатитом и цирконом.

U-Pb возраст цирконов определен на микрозонде SHRIMP-II в ЦНИИ ВСЕГЕИ по известной методике [15, 17].

Цирконы исследованных гранат-анортит-клинопироксен-амфиболовых пород представляют гетерогенное сообщество кристаллов, варьирующих по размеру, облику, внутреннему строению, окраске, прозрачности, причем для большинства кристаллов характерен “алмазный” блеск. Просматриваются постепенные переходы от призматических (с удлинением 1.5–2) субидиоморфных кристаллов к округлым, причем среди последних встречаются обломки (фрагменты) более крупных зерен, испытавшие нивелировку (сглаживание) поверхностей излома. В табл. 1 и на рис. 1–2 представлены наиболее характерные особенности этих цирконов. Минимальными содержаниями U (57–85 ppm) и Th (29–68 ppm) выделяются одновозрастные (680 млн. лет) части кристалла 2 (2.1–2.2), отражающие его первичную структурную гетерогенность (секториальность). К этому же возрастному уровню отно-

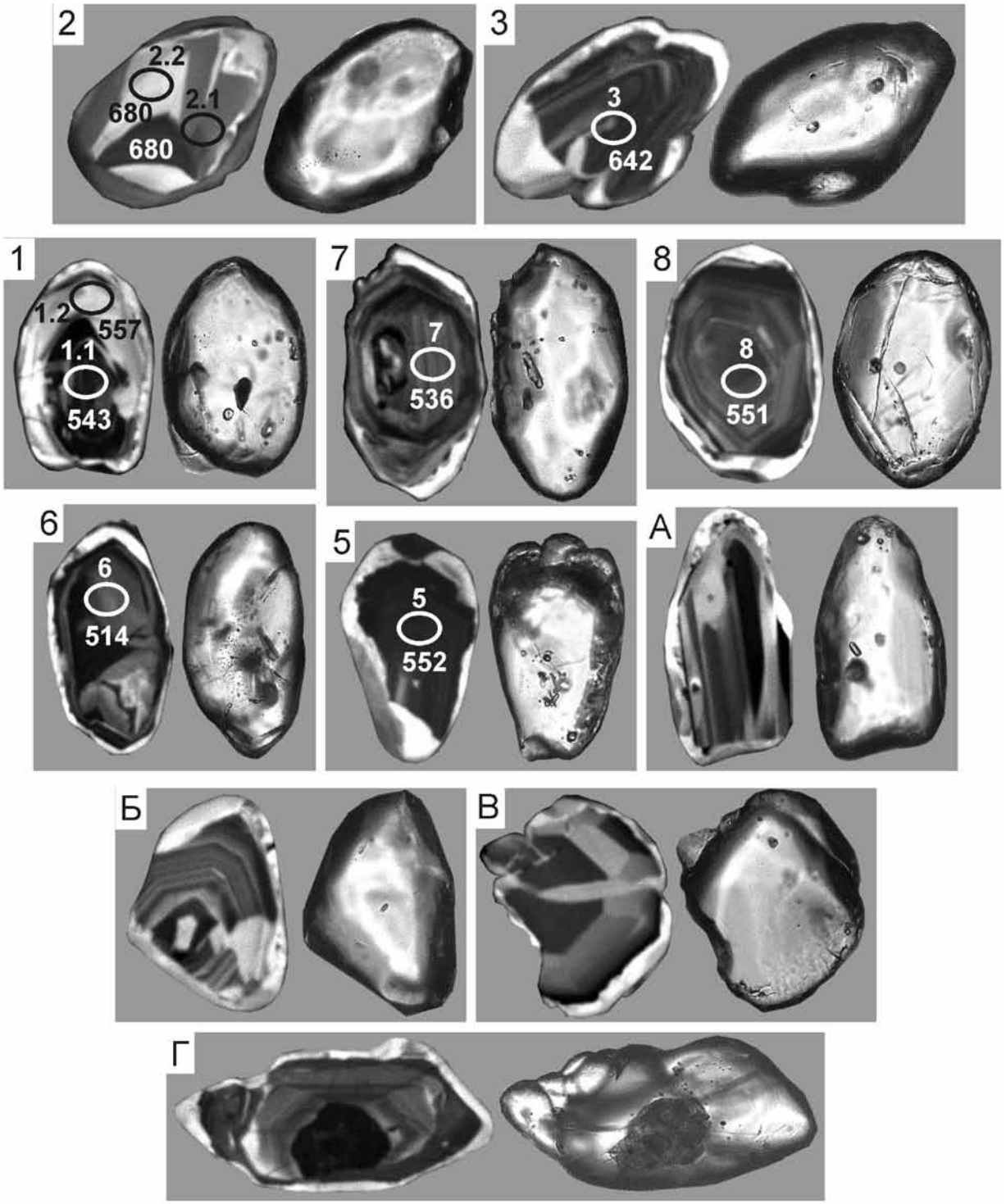

Рис. 1. Микроморфологические особенности цирконов из гранат-анортит-клинопироксен-амфиболовых пород. Увеличение ×100–150. Цифры у кратеров – номера анализов и возраст по $^{206}Pb/^{238}U$ (см. табл. 1).

ситься и кристалл 3, заметная обогащенность радиоэлементами которого (U-484 ppm, Th-327 ppm) способствовала его незначительным преобразованиям. В совокупности кристаллы 2 и 3 образуют "древнюю" группу цирконов с конкордантным возрастом T = 662 ± 14 млн. лет.

В другую группу входят кристаллы с отчетливым зональным строением (7, 8), отвечающие иногда ранней-поздней генерациям 1 (1.1–1.2). Сюда же относятся и сравнительно "однородные" кристаллы 5 (и подобный ему 4) с высокими содержаниями U (504–749 ppm) и Th (426–451 ppm). Эти

кристаллы вместе с отмеченными 7, 8 и 1 (1.1–1.2) характеризуются конкордантным возрастом T_1 = 543.0 ± 7.1 млн. лет. Для близкого этой группе по минералогическим признакам и составу кристалла 6, но испытавшего и дробление, и залечивание трещин с образованием точечных вторичных включений, получена более низкая датировка T_2 = 513.7 ± 9.3 млн. лет при незначительной дискордантности (D = –3). По-видимому, этот возрастной рубеж свидетельствует о прекращении эндогенной деятельности, сопровождаемой преобразованием уже существующих цирконов.

Определенную "загадку" представляют единичные зерна, которые по внешним признакам могут быть сопоставлены с "обломочными" (рис. 1, А–Б). Они испытали и хрупкие деформации, и последующую коррозионную нивелировку (округление) поверхностей излома с резкими границами. Присутствие подобных "обломочных" (?) зерен ставит вопрос об их связи с терригенными породами и соответственно, процессами окатывания, то есть об их абразивной обработке. Следуя этой логике – и об участии осадочного материала при формировании субстрата амфиболитов, то есть об их принадлежности к параамфиболитам. Более тщательные исследования цирконов позволили, как нам кажется, найти корректное решение этой задачи. Оно содержится в морфологических особенностях кристаллов В и Г, которые, подобно кристаллам А и Б, были также раздроблены, но, в отличии от них, испытали не только поверхностную нивелировку, но и новый рост в виде отдельных (В) или групповых (Г) выростов, известных как "петушиный" гребень. Такие же новообразования заметны и у кристаллов 1 и 5, причем у последнего в нижней (на снимке) части сохранились признаки излома. Естественно, влияние окатывания здесь исключается, то есть вопрос об осадочном материале в составе амфиболитов оказывается излишним. В результате мы приходим к альтернативному выводу о внутриформационном дроблении и регенерации цирконов в самих амфиболитах, испытавших хрупко-пластические деформации и метаморфизм до выведения их в нижнюю кору. Тогда 660 млн. лет – это ранний этап эндогенного образования цирконов, а 540 млн. лет – последующий, сопряженный, по-видимому, с декомпрессионным подъемом мафит-ультрамафитовой ассоциации сопровождаемый дроблением и коррозией ранних генераций цирконов и новообразованием новых.

В заключении следует отметить, что работы в которых приводятся сведения о минералого-геохимических и изотопно-хронологических исследованиях цирконов гроспидитовых ксенолитов кимберлитов нам не известны, поэтому результаты изучения цирконов "метагроспидитов" представляются не только как объективные свидетельства допалеозойского возраста щелочно-ультраосновной

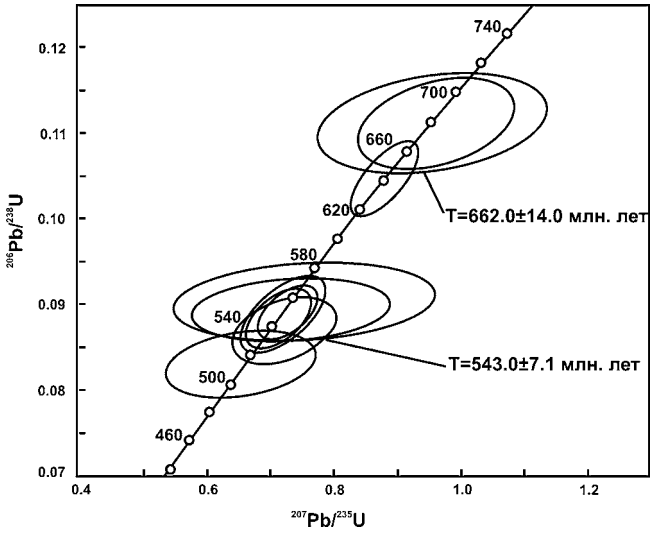

Рис. 2. U-Pb возраст цирконов из гранат-анортит-клинопироксен-амфиболовых пород.

ассоциации Ильменогорской зоны, но и, несомненно, имеющие методическую ценность.

Исследования проведены при финансовой поддержке Программы ОНЗ РАН № 4 и Интеграционного проекта УрО РАН, выполняемого совместно с СО и ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Баженов А.Г., Иванов Б.Н., Баженова Л.Ф., Кутепова Л.А.* Особенности химизма амфиболитов Ильменогорского комплекса // Метаморфические породы в офиолитовых комплексах Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979. С. 90–100.
2. *Баженов А.Г., Иванов Б.Н., Постоев К.И.* Анортитовые амфиболиты ильменогоского комплекса // Магматизм и метаморфизм ультраосновных и щелочных пород Урала. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1978. С. 101–105.
3. *Банева Н.Н., Медведева Е.В., Русин А.И.* Геохимические особенности ультрамафитов Ильменогорской сдвиговой зоны // Ежегодник-2008. Тр. ИГГ УрО РАН. Вып. 156. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 115–119.
4. *Вализер П.М., Дубинина Е.В., Краснобаев А.А. и др.* Глыбообразные включения гранат-анортит-клинопироксен-амфиболовых пород саитовской серии (ильменогорский комплекс, Южный Урал) // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Т. 1. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2009. С. 102–105.
5. *Варлаков А.С.* Рифтогенные доэвгеосинклинальные офиолиты в допалеозойской истории Урала // Эволюция офиолитовых комплексов. Свердловск, 1981. С. 34–48.
6. *Ворощук Д.В., Русин А.И.* Опорный геологический разрез средней части Ильменогорско-Сысертской полиметаморфической зоны // Путеводитель геологических экскурсий. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН,

2003. С. 64–95.
7. *Грин Т.Х.* Экспериментальное исследование ассоциаций субсолидуса, образующихся при высоких давлениях за счет высокоглиноземистых базальтов, кианитовых эклогитов и гроспидитов // Происхождение главных серий изверженных пород по данным экспериментальных исследований. Л.: Недра, 1970. С. 21–52.
8. *Доусон Дж.* Кимберлиты и ксенолиты в них. М.: Мир, 1983. 300 с.
9. *Кориневский В.Г., Кориневский Е.В.* Экзотические афиболиты Ильменских гор (Южный Урал): состав и геологическая позиция // Геология и геофизика. 2004. Т. 45, № 9. С. 1114–1127.
10. *Кориневский В.Г., Кориневский Е.В.* Новое в геологии, петрографии и минералогии Ильменских гор // Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. 102 с.
11. *Медведева Е.В.* Гранат из метаморфических толщ Ильменских гор // Геология и минералогия Ильменогорского комплекса: ситуация и проблемы. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. С. 80–130.
12. *Постоев К.И.* Ультраосновные и основные горные породы Ильменского заповедника и продукты их метаморфизма // Тр. Ильменского гос. заповедника. Вып. VII. 1958. 85 с.
13. *Русин А.И., Краснобаев А.А., Русин И.А. и др.* Щелочно-ультраосновная ассоциация Ильменских–Вишневых гор // Геохимия, петрология, минерагения и генезис щелочных пород. Миасс: ИМин УрО РАН, 2006. С. 222–227.
14. *Соболев Н.В., Зюзин Н.И., Кузнецов И.К.* Непрерывная серия пироп-гроссуляровых гранатов в гроспидитах // Докл. АН СССР. 1966. Т. 167. С. 902–905.
15. *Larionov A.N., Andreicev V.A., Gee D.R.* The Vendian alkaline igneous suite of northerm Timan: ion microprobe U-Pb zircon ages of gabbros and syenite // Gee D.R. & Pease V.L. (eds). The Neoproterozoic Timanid Orogen of Eastern Baltica. Geological Sosiety. London: Memoirs, 30, 2004. P. 69–74.
16. *O'Hara M.J., Mercy E.L.P.* Exceptionally calcic pyralspite from South African kyanite eclogite // Nature. 212. 1966. P. 68–69.
17. *Williams I.S.* U-Th-Pb Geochronology by ion microprobe. In: Applications in microanalytical techniques to understanding mineralizing processec. Revievs in Economic Geology. 1998. V. 7. P. 1–35.