

МЕТАБАЗИТЫ ТИМ-ЯСТРЕБОВСКОЙ И АВИЛЬСКОЙ РИФТОГЕННЫХ СТРУКТУР НА ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЕ САРМАТИИ: ГЕОХИМИЯ, ИСТОЧНИКИ РАСПЛАВОВ И ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯЦИИ

К. А. Савко, С. В. Цыбуляев, Е. Х. Кориш

Воронежский государственный университет

Поступила в редакцию 4 мая 2016 г.

Аннотация: на основании фактически одинакового распределения петрогенных, редких и редкоземельных элементов в метабазах Тим-Ястребовской и амфиболитов Авильской структур, контрастно отличающихся от неоархейских метабазитов Курского мегаблока, а также корреляции геологических разрезов обеих структур установлено: (1) близкий палеопротерозойский возраст излияний базитов в обеих структурах, (2) единый обогащенный мантийный источник и (3) вероятное формирование в одной рифтогенной синформе.

Ключевые слова: геохимия, метабазиты, редкоземельные элементы, геологические корреляции, Воронежский кристаллический массив.

METABASITES OF THE TIM-YASTREBOVSKAYA AND AVILSKAYA RIFT STRUCTURES: GEOCHEMISTRY, MELT SOURCES AND GEOLOGIC SECTIONS CORRELATIONS

Abstract: based on actual the same distribution of major, trace and rare earth elements in metabasalts Tim-Yastrebovskaya and amphibolites Avilskaya rift structures on the Sarmatia eastern edge, contrasting different from Neoarchean metabasite within Kursk block, as well as the correlation of geological sections of both structures we have recognized: (1) similar Paleoproterozoic age of the basite formation in the both structures, (2) the same enriched mantle source and (3) possibly the mutual formation within the same rift structure.

Key words: geochemistry, metabasites, rare earth elements, geological correlation, Voronezh crystalline massif.

Введение

До настоящего времени существовали представления о том, что породные комплексы, выполняющие небольшие синформы, восточнее Тим-Ястребовской и Волотовской структур относятся к позднеархейским образованиям михайловской серии (рис. 1). Они хорошо выделялись по результатам магнитометрических съемок, так как в их строении участвовали породы железисто-кремнистой формации (ЖКФ). При изучении этих ЖКФ восточнее Тим-Ястребовской и Волотовских палеопротерозойских рифтогенных структур на самой границе Курского мегаблока и Волго-Донского орогена были выделены ряд небольших по размерам магнитных аномалий: Истобнянские, Медвенские, Шатиловские, Мантуровские, Алексеевские, Коденцовские и другие [1], заверенные единичными скважинами. В отличие от хорошо изученных палеопротерозойских ЖКФ в Тим-Ястребовской и Волотовской структурах, железистые кварциты в пределах небольших синформ подверглись высокотемпературному метаморфизму при температурах 650 °С и давлениях около 5 кбар [2, 3], а вмещающие их

породы представлены гнейсами и сланцами. По аналогии с железистыми кварцитами Курско-Бесединского блока, метаморфизованными в условиях гранулитовой фации [4, 5], их возраст был принят как архейский [1, 3]. Присутствие в строении этих синформ помимо железистых кварцитов и гнейсов еще и метабазитов определило отнесение ЖКФ в них к железисто-кремнисто-метабазитовой формации верхнего архея [1].

В пределах Курского мегаблока Восточной Сарматии мощные толщи метабазитов установлены на двух стратиграфических уровнях – неоархейском в разрезе михайловской серии и палеопротерозойском в разрезах тимской, курбакинской и глазуновской свит оскольской серии. При изучении геохимии гранатовых амфиболитов Авильской структуры было обнаружено, что они контрастно отличаются от неоархейских метабазитов михайловской серии. Отсюда можно сформулировать цель настоящей статьи: на основании изучения геохимических особенностей метабазитов и корреляции вулканогенных разрезов Тим-Ястребовской и

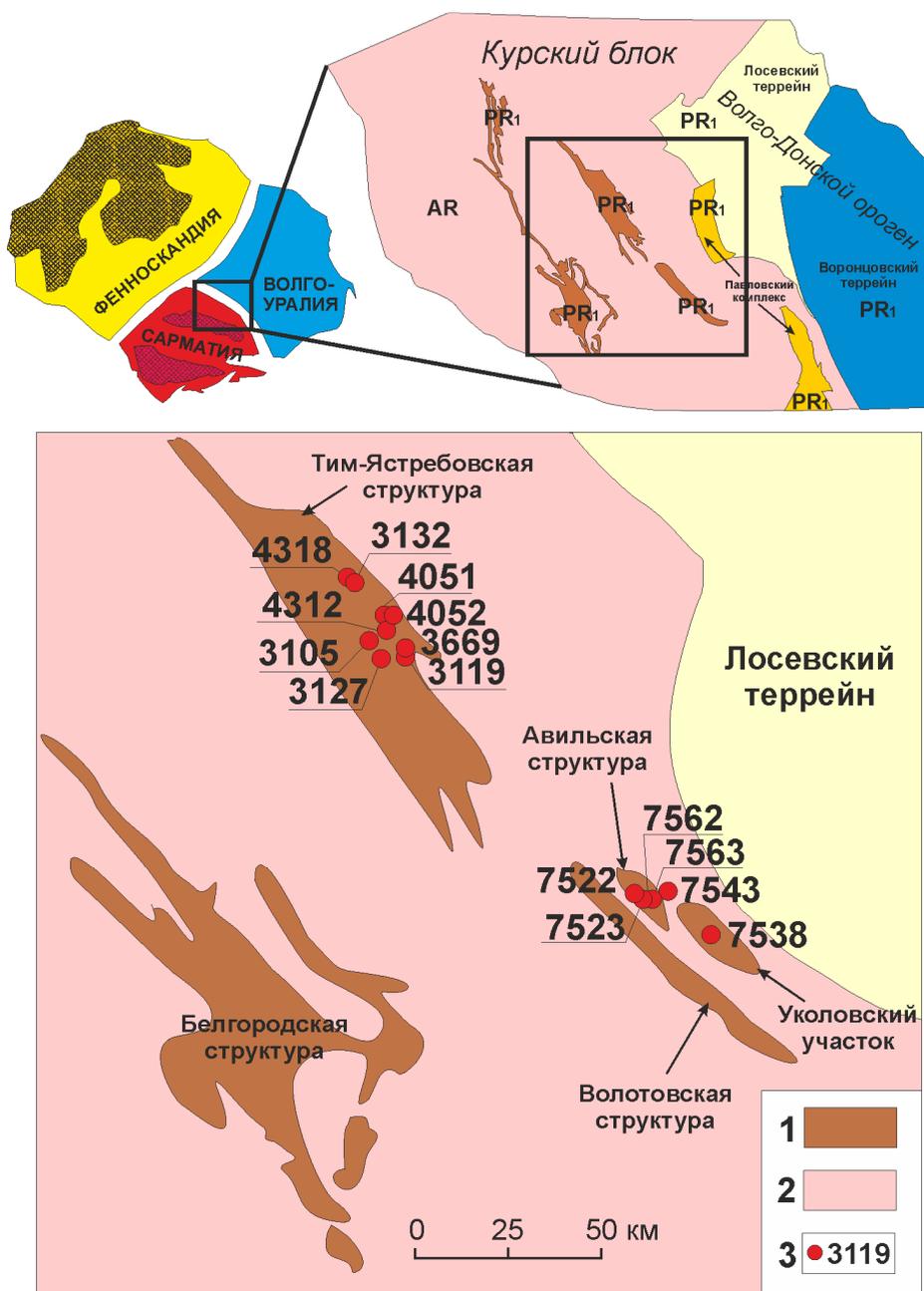


Рис. 1. Схема расположения ТЯС и АС КМА: 1 – раннеархейские образования; 2 – архейские образования; 3 – скважины и их номера.

Авильской структур сделать выводы о возрасте, источнике магм и геодинамической обстановке их излияний. Особое внимание нами было уделено анализу содержания редкоземельных элементов и связанных с ними индикаторных отношений. Это обусловлено тем, что редкоземельные элементы являются относительно инертными и их распределение не претерпевает существенных изменений в процессах метаморфизма [6].

Геологическая обстановка

Тим-Ястребовская структура (ТЯС) является одной из наиболее крупных палеопротерозойских структур в пределах Курского мегаблока (рис.1). Ее протяженность с северо-запада на юго-восток со-

ставляет 130 км при ширине 10–30 км, глубина заложения по геофизическим данным оценивается в 5–8 км. В геодинамическом отношении структура представляет собой внутриконтинентальный рифт, заложившийся в палеопротерозое на неоархейской протоплатформе [7]. Ложе, на котором в палеопротерозое формировалась ТЯС, представлено ТТГ ассоциацией обоянского комплекса мезоархея и мощными толщами высокометаморфизованных осадочных и вулканогенно-осадочных пород михайловской серий неоархея.

ТЯС выполнена палеопротерозойскими породами курской и перекрывающей ее оскольской серии, которые интенсивно дислоцированы и метаморфизованы преимущественно в условиях

верхов зеленосланцевой фации [8, 9].

Отложения курской серии распространены по всему юго-западному борту структуры, а также на северо-западном и юго-восточном замыкании и представлены терригенными породами стойленской свиты и мощными железорудными толщами магнетитовых кварцитов с прослоями внутрирудных сланцев коробковской свиты (рис. 16). Мощность отложений серии достигает 1000 м и более.

Разрез оскольской серии характеризуются сложным ритмичным строением, обусловленным неоднократно повторяющейся сменой конгломератов, гравелитов и метапесчаников, переходящими к верхам разреза в карбонатно-сланцевые сланцы с горизонтами амфиболитов, метаморфизованных доломитов и известняков, широким развитием углеродсодержащих пород и вулканитов [10]. Мощность разрез оскольской серии оценивается в несколько километров. Серия подразделяется на нижнюю, терригенно-карбонатную роговскую свиту и верхнюю, существенно терригенно-вулканогенную тимскую свиту.

Роговская свита распространена вдоль юго-западного борта ТЯС, а также в ее северо-восточном замыкании, сложена в различной степени мраморизованными известняками и доломитами, карбонатными метапесчаниками и сланцами, в отдельных прослоях обогащенными углеродистым веществом.

Отложения тимской свиты выполняют центральную и северо-восточную часть структуры. В ее составе выделяются нижняя и верхняя подсвиты. Разрез нижнетимской подсвиты характеризуется ритмичным строением и широким распространением в его составе углеродистых сульфидизированных сланцев с подчиненными прослоями метапесчаников, кварцитов, силикатно-карбонатных пород, амфиболитов. В отложениях верхнетимской свиты преобладают вулканогенные породы. Нижняя часть ее разреза сложена углеродистыми и безуглеродистыми слюдистыми сланцами, а в верхней части преобладают метаэффузивы с прослоями метапесчаников и сланцев.

Из магматических пород в пределах ТЯС широко представлены массивы и дайки гранодиоритов стойло-николаевского комплекса с возрастом 2050–2070 млн лет [11], прорывающие все осадочные и вулканогенные отложения с широкими ореолами контактового метаморфизма [12], менее распространены синхронные с ними габброидные массивы.

Возраст осадконакопления отложений оскольской серии можно ограничить завершением формирования ЖКФ курской серии около 2,45 млн лет [13] и внедрением гранитоидов стойло-николаевского комплекса 2050–2070 млн лет.

Авильская синформа (АС) располагается восточнее Тим-Ястребовской и Волотовской рифтогенных структур (рис. 1). Породные комплексы,

выполняющие синформу, представлены в основном гранатовыми амфиболитами, микроамфиболитами, габбро-амфиболитами, переслаивающимися с пачками мощностью от нескольких метров до 20–40 м углеродистых мусковит-биотит-кварцевых и кварц-биотитовых сланцев (рис. 16).

Методы исследований и аналитические данные

Все изученные образцы представляли собой керн скважин, детально описанный при проведении полевых работ. Из керна скважин были изготовлены прозрачно-полированные шлифы, изученные сначала оптически, а затем на растровом электронном микроскопе Jeol 6380 LV с энергодисперсионным анализатором INCA 250 (ВГУ). Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1,2 нА, время набора спектра 70 сек, диаметр пучка 3 мкм. ZAF коррекция при расчете содержания окислов и оценка точности проводилась с помощью комплекта программ математического обеспечения системы.

Анализы химического состава проб силикатных горных пород производили методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре последовательного действия PW2400 производства компании Philips Analytical B.V в ИГЕМ РАН. При калибровке спектрометра использованы отраслевые и государственные стандартные образцы химического состава горных пород и минерального сырья (14 ОСО, 56 ГСО). Подготовка препаратов для анализа порообразующих элементов выполнена путем плавления 0,3 г порошка пробы с 3 г тетрабората лития в индукционной печи с последующим отливом гомогенного стеклообразного диска. Точность анализа составляла 1–5 отн. % для элементов с концентрациями выше 0,5 мас. % и до 12 отн. % для элементов с концентрацией ниже 0,5 мас. %.

Малые и редкие элементы определялись методом индукционно-связанной плазмы с масс-спектрометрическим окончанием анализа (ICP-MS) в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологий микроэлектроники и особо чистых материалов (АСИЦ ИПТМ) РАН. Разложение образцов пород проводили путем кислотного вскрытия в закрытой системе. Контроль химического выхода при проведении процедуры разложения образцов осуществлялся с помощью ^{161}Dy . Согласно этому контролю, полнота разложения образцов составляла 100 %. Пределы обнаружения для REE, Hf, Ta, Th, U составляли 0,02–0,03 ppm, для Nb, Be, Co – 0,03–0,05 ppm, для Li, Ni, Ga, Y – 0,1 ppm, для Zr – 0,2 ppm, для Rb, Sr, Ba – 0,3 ppm, для Cu, Zn, V, Cr – 1–2 ppm. Правильность анализа контролировали путем измерения российского стандартного образца метаморфического сланца ССЛ-1 (ГСО3191-85). Относительное стандартное отклонение для всех элементов не превышало 0,3 при измерении содержания этих элементов до $5 \times \text{ПО}$ и не превышало 0,15 при измерении содержания $> 5 \times \text{ПО}$.

Характеристика метабазитов Петрография

Все исследуемые метабазиты ТЯС по петрографическим особенностям можно разделить на две группы: (1) метабазалты и метаандезибазалты, частично сохранившие первичные текстурно-структурные особенности, и (2) амфиболиты, микроамфиболиты и ортосланцы, полностью утратившие магматические структурные признаки.

Метабазалты и метаандезибазалты представляют собой тонкокристаллические-мелкозернистые породы тёмно-зеленого, тёмно-серого до черного цвета, иногда с порфировой структурой за счёт порфировых вкрапленников роговой обманки, плагиоклазов и реликтов пироксенов. Текстура породы в основном массивная. Под микроскопом структура порфирового облика с мелкозернистой полнокристаллической структурой основной массы (рис. 2).

Фенокристаллы в составе породы составляют от 10 до 30–40 % от всего объема и представлены роговой обманкой, вероятнее всего развитой по пироксенам, плагиоклазами и реликтами пироксенов. Размер фенокристаллов колеблется от 0,2 до 2 мм, реже крупнее. Иногда отмечается группировка крупных кристаллов плагиоклаза и пироксенов, образующих

псевдопорфировую структуру. Основная масса породы сложена мелкими (0,02–0,08 мм) зернами плагиоклаза около 50–60 %, клинопироксена до 20–30 %, ортопироксена – до 10 %, биотита до 20 %, амфиболов, эпидота, кальцита, кварца и других вторичных минералов. Акцессорные минералы представлены сфеном, ильменитом, рутилом, магнетитом. Их количество не превышает 5 %.

Порфиновые метабазиты часто сильно изменены в результате наложенного метаморфизма с полной потерей структурно-текстурных признаков магматических пород и превращением их в амфиболиты, микроамфиболиты и амфиболовые ортосланцы.

Амфиболиты представляют собой породы темно-зеленого, зеленовато-серого цвета, мелко-среднезернистые, массивные, иногда полосчатые. Характеризуются гранонематобластовой структурой и сланцеватой текстурой. Среди амфиболитов выделяются как мезо-, так и меланократовые разновидности, отличающиеся содержанием амфиболов 50–70 % и более 80 %, соответственно. Кроме амфиболов в составе принимают участие плагиоклаз до 35–40 %, кварц до 5–10 %, биотит – до 5–15 %. В гидротермально и метасоматически измененных амфиболитах увеличивается количество хлорита (до 30–40 %), кварца, биотита, а также появляется пренит и калиевый полевой шпат.

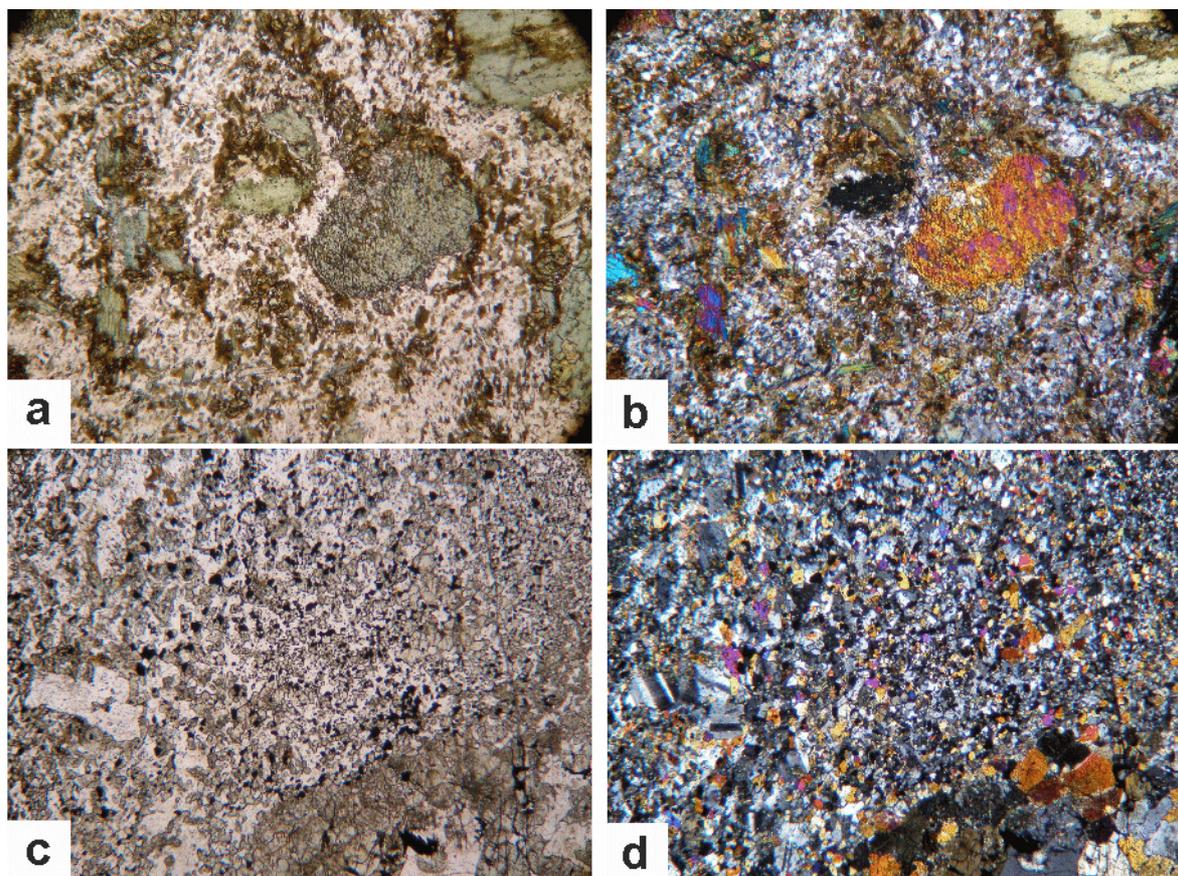


Рис. 2. Фото шлифов метабазитов ТЯС: *a, b* – обр. 3132/285 порфиробласты роговой обманки в эпидот-биотит-амфибол-плагиоклазовой основной массе; *c, d* – обр. 3105/305,3 метабазалт с фенокристаллами плагиоклаза и клинопироксена, образующими псевдопорфировую структуру. *a, b, c, d* – увеличение $\times 40$, поле зрения 4,5 мм. Слева без анализатора, справа с анализатором.

Микроамфиболиты мелкозернистые зеленовато-серые породы. В их составе преобладают амфиболы (до 70–80 %), образующие бочонковидные или призматические кристаллы размером 0,08–0,15 мм, в редких случаях размер кристаллов достигает 0,5 мм. Кроме амфиболов в породе присутствуют участки, сложенные тонкозернистым агрегатом зёрен кварца и альбита.

Амфиболовые ортосланцы представляют собой зеленовато-серые мелкозернистые неравномерно рассланцованные до биотит-плагиоклаз-амфиболовых сланцев породы с гранонематобластовой и нематобластовой структурой. Они состоят из кристаллов зеленоватых амфиболов (до 80–85 %), кварц-полевошпатового агрегата, чешуй биотита и рудной сыпи. Сланцеватая текстура породы обусловлена закономерной (в одном направлении) кристаллов амфиболов

и биотита. Породы нередко карбонатизированы, эпидотизированы и в меньшей степени окварцованы.

Амфиболиты, микроамфиболиты и амфиболовые ортосланцы имеют близкий минеральный состав и отличаются лишь проявлением различных структурно-текстурных признаков.

Амфиболиты АС представляют собой темно-зелёные, почти черные породы, мелко-среднезернистые, массивные, иногда полосчатые. Структура породы гранонематобластовая, лепидогранонематобластовая, нематогранобластовая, участками порфиробластовая (рис. 3). Макроскопическая текстура массивная, гнейсовидная. В состав амфиболитов входят: амфибол – 50–90 %, плагиоклаз – 10–40 %, биотит до 10 % и более, кварц – до 5–10 %, пироксен и гранат – единичные зерна, а также эпидот, хлорит, кальцит, сфен, апатит и рудные.

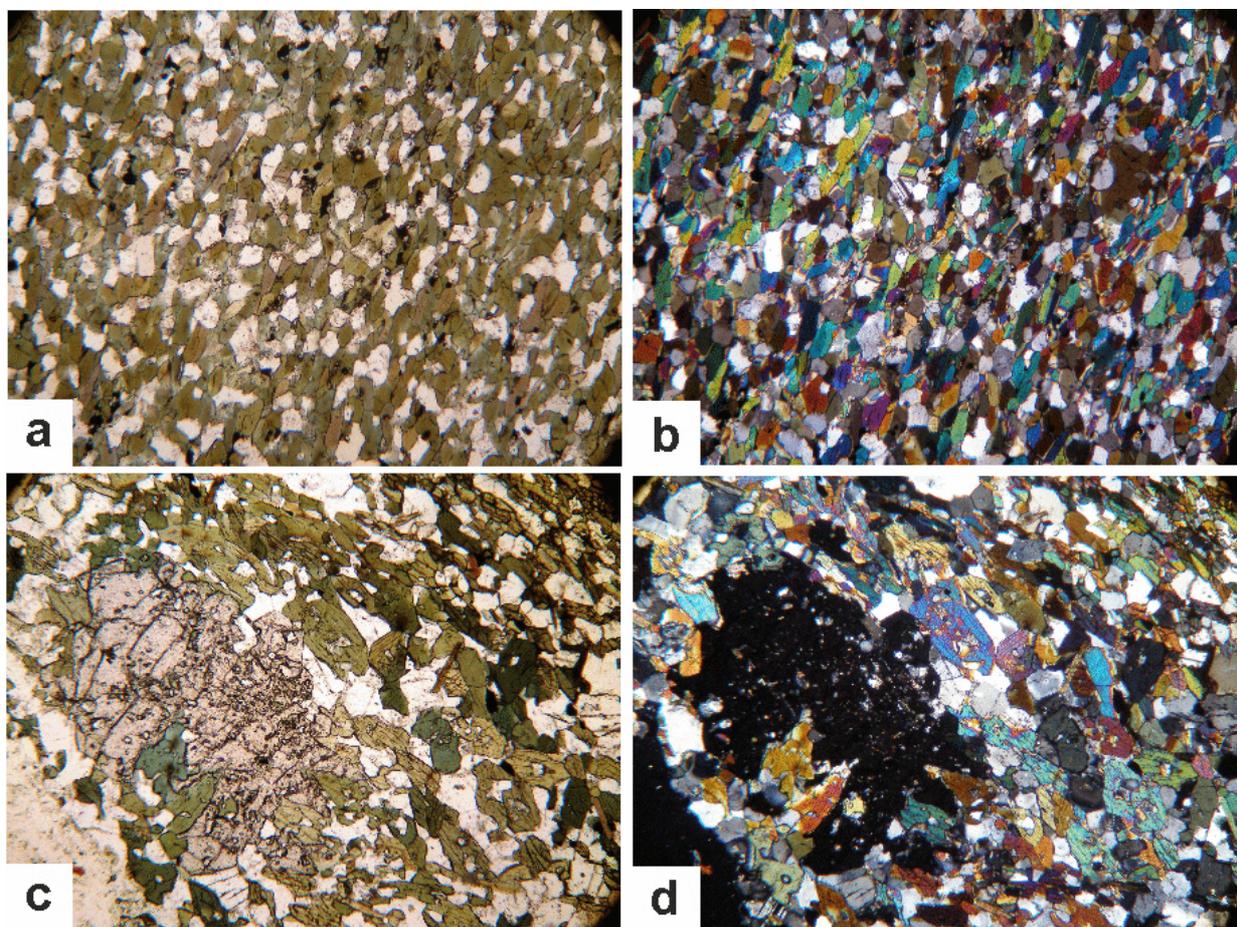


Рис. 3. Фото шлифов амфиболитов АС: *a, b* – обр.7522/571 гранобластовая структура амфиболитов; *c, d* – обр.7563/518,5 порфиробласт граната в плагиоклаз-амфиболовом матриксе. *a, b, c, d* – увеличение $\times 40$, поле зрения 4,5 мм. Слева без анализатора, справа с анализатором.

Минералогия

Главными породообразующими минералами метабазитов ТЯС и АС являются плагиоклазы, амфиболы, биотит, значительно реже отмечается присутствие пироксенов, кварца и сфена. В более высокометаморфизованных метабазитах АС появляется гранат. В гидротермально измененных породах от-

мечаются пренит, хлорит, минералы эпидот-клиноцоизитовой группы.

Плагиоклаз, присутствующий в метабазитах ТЯС и АС, чаще всего образует незональные, несдвоенные кристаллы. Его состав в слабо метаморфизованных разностях варьирует от андезина до лабрадора ($Ab_{47-61}An_{37-53}Or_{0-3}$) (эл. прил. 1). Довольно ча-

сто наблюдается альбитизация плагиоклаза до андезин-олигоклаза ($Ab_{58-84}An_{16-41}Or_{0-2}$). Состав плагиоклаза в амфиболитах АС варьирует в широком интервале основности – от альбита $Ab_{95-97}An_{0-3}Or_{0-2}$ до битовнита $Ab_{12}An_{88}$. Подобное изменение состава плагиоклаза может быть следствием вторичных гидротермально-метасоматических изменений. Отдельные зерна плагиоклаза микроклинизированы (рис. 5) и интенсивно замещаются кальцитом, серицитом, эпидотом.

Амфиболы широко распространены в метабазах ТЯС и АС и относятся к кальциевой группе (роговая обманка, амфиболы актинолит-тремолитового ряда).

Роговая обманка является типичным минералом метабазитов. В подавляющем большинстве случаев она представлена порфиробластами или мелкими удлиненными призматическими кристаллами зеленого, темно-зеленого, реже буровато-зеленого цвета. Содержание кальция в роговых обманках составляет 1,72–1,97 форм. ед., щелочей – 0,2–0,47 форм. ед. (эл. прил. 2). По соотношению железа и магния среди них выделяются железистые и магниезильные разновидности (рис. 4).

Роговые обманки чермакитового ряда представлены чермакитом и феррочермакитом по классификации (рис. 4) и имеют обычно синеватые, голубовато-зеленые тона по оси Ng. Особенности состава рассматриваемых амфиболов являются большой разброс значений магниезильности (0,26–0,82) (табл. 2), а также несколько повышенное по сравнению с обычными роговыми обманками содержание щелочей (0,35–0,65 форм. ед.) и алюминия в четверной координации (1,52–1,8 форм. ед.).

Безглиноземистые кальциевые амфиболы представлены актинолитом. Они образуют игольчатые и волокнистые бесцветные или слабо окрашенные в зеленоватые тона кристаллы или лучистые и сноповидные агрегаты.

Биотит присутствует во многих образцах метабазитов, и его количественное содержание в них сильно варьирует. Биотит образует небольшие разноориентированные чешуйки размером 0,05×0,2 мм и более, бледно-темно-бурой окраски с четким плеохроизмом. Биотит характеризуется умеренной глиноземистостью с суммарным преобладанием содержания флогопитового и аннитового миналов 54–85 % мол. %. Железистость биотита варьирует в широких пределах от 0,35 до 0,64 (эл. прил. 3). С повышением железистости в структуре биотита наблюдается увеличение формульного количества катионов титана в среднем от 0,1 до 0,29.

Мусковит представлен мелкими полуидiomорфными чешуйками размером 0,01–0,02 мм, замещающими плагиоклаз. По данным микронзондовых анализов – это почти чистый мусковит (Mu_{87-89}) с незначительной примесью фенгитового (Phn_{9-11}) и парагонитового (Pg_{0-3}) компонентов.

Хлорит наиболее часто встречается в тим-ястребовских метабазах, его количество в отдельных образцах (зоны гидротермальных изменений) может достигать 20–30 %, где он находится в ассоциации с пренином (рис. 5). По количеству катионов кремния (5,51–5,98 форм. ед.) хлориты относятся к рипидолит-пикнохлоритам с магниезильностью 0,58–0,65.

Пироксены в метабазах представлены клино- и ортопироксенами. Клинопироксены в тим-ястребовских метабазах представлены двумя генерациями: мелкими кристаллами основной массы (размером менее 0,1–0,2 мм) и микровкрапленниками (до 0,5 мм), плеохроирующими в бледно-зеленоватых тонах. По составу они формируют компактное поле в пределах авгита-салита-ферросалита ($En_{22-36}Wo_{43-46}Fs_{20-33}$). Клинопироксены в авильских метабазах имеют более крупные кристаллы (до 2,5 мм) и интенсивно замещаются амфиболами и другими вторичными минералами. Это ферросалиты ($En_{21-22}Wo_{47-49}Fs_{30-32}$).

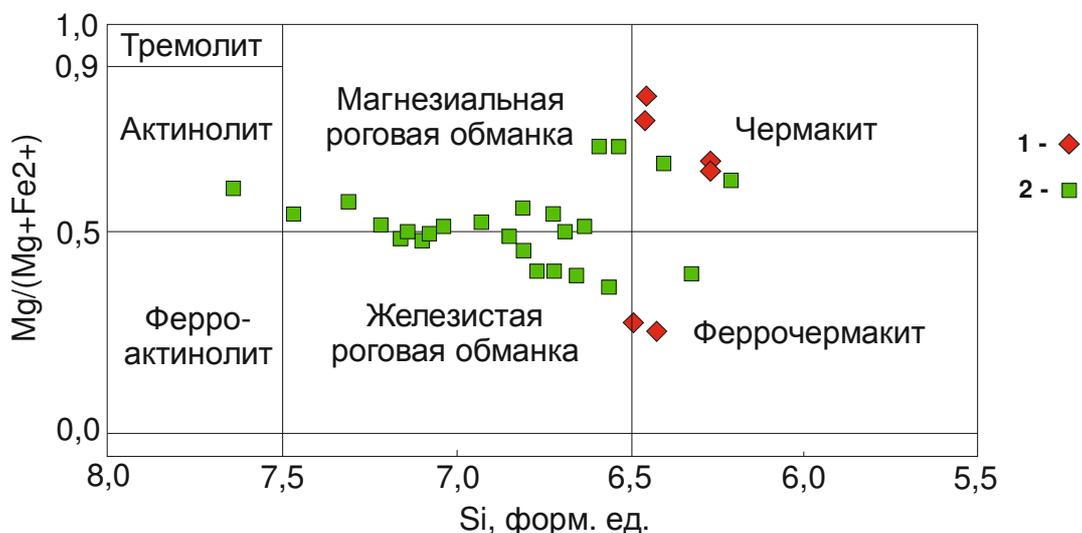


Рис. 4. Номенклатура амфиболов в метабазах ТЯС и АС [14]. Условные обозначения: 1 – амфиболы метабазитов ТЯС, 2 – амфиболы метабазитов АС.

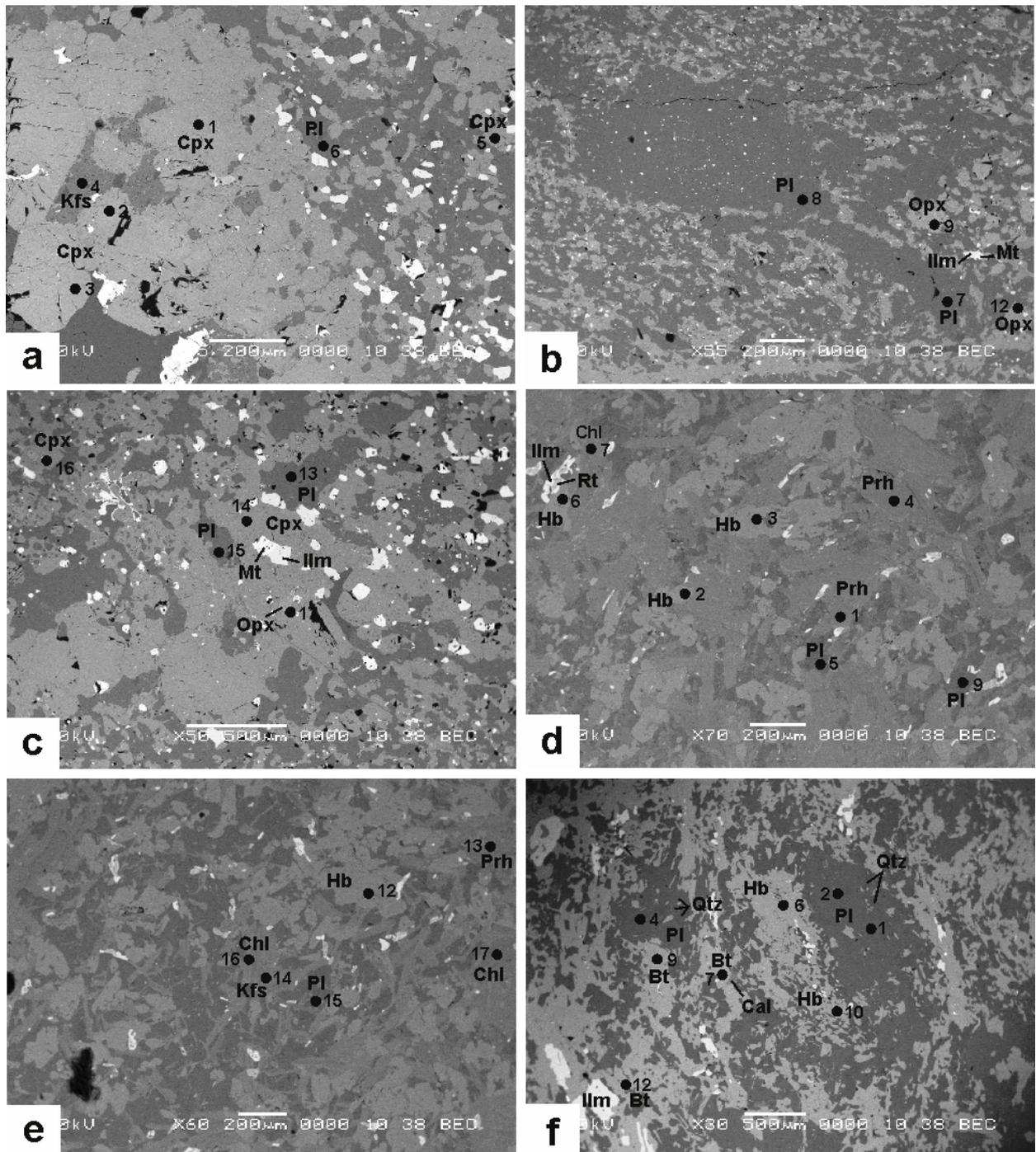


Рис. 5. Электронно-микроскопические снимки в отражённых электронах. Условные обозначения: a, b, c - обр.3105/305,3; d, e - обр.4312/419,2; f - обр. 4318/518,6. Номера точек на рисунках соответствуют номерам микрозондовых анализов в эл. прил. 1, 2, 3, 4.

Ортопироксены из тим-ястребовских метабазальтов представлены гиперстенами с небольшой изоморфной примесью CaO (En₄₈₋₄₉ Wo₂₋₅ Fs₄₈₋₄₉) (эл. прил. 4).

Минералы эпидот-клиноцоизитовой группы присутствуют в различных количествах в метабазилах обеих структур. Стоит отметить, что в породах ТЯС эпидот присутствует в больших количествах, в

виде округлых зерен развивающихся в основном по плагиоклазам, тогда как в авильских амфиболитах эпидот отмечается в единичных образцах как в виде небольших зерен в основной массе, так и пойкилобласт с червеобразными выделениями кварца (рис. 7e). По составу он относится преимущественно к клиноцоизиту (содержание эпидотового компонента 15–17 % моль).

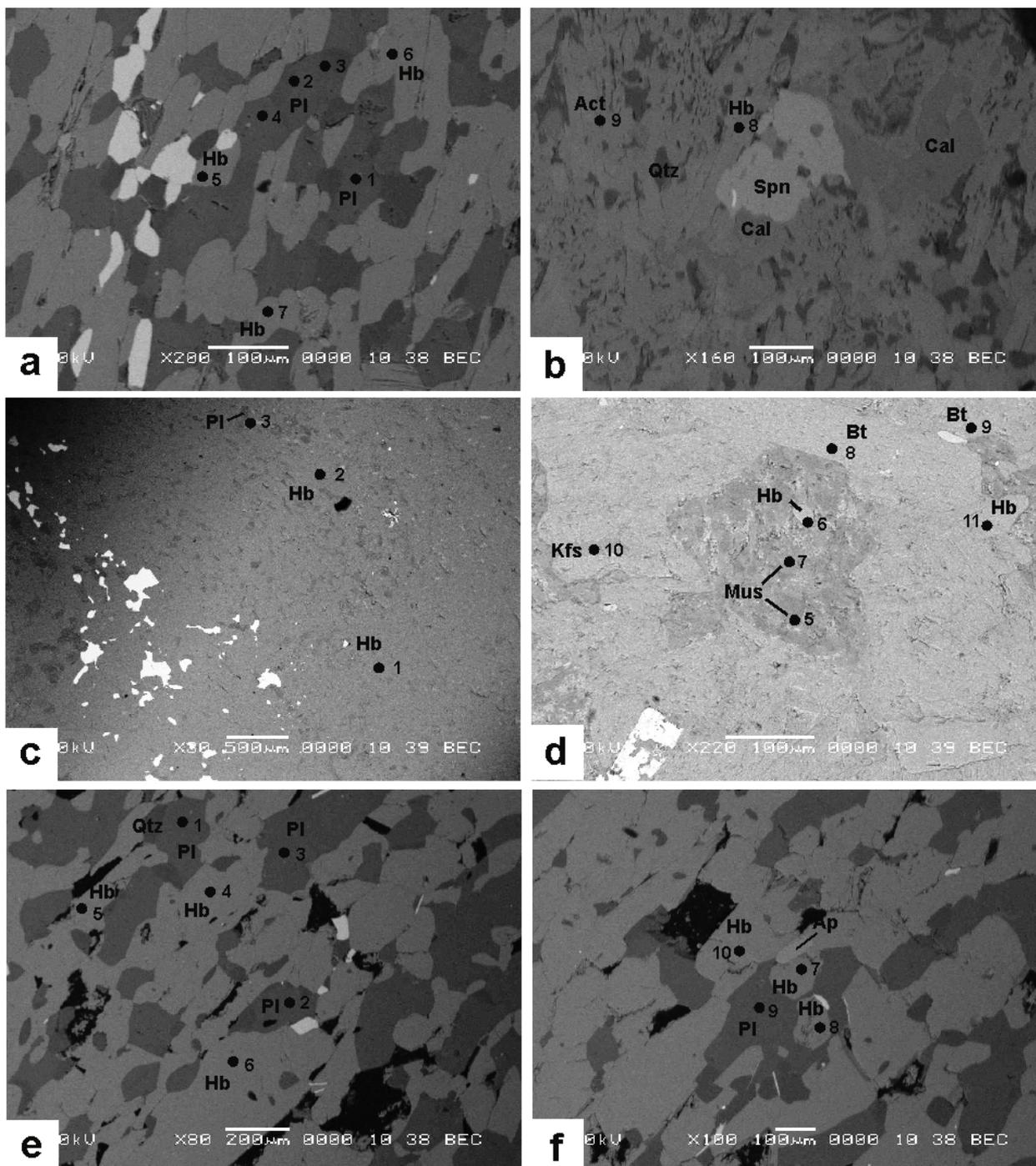


Рис. 6. Электронно-микроскопические снимки в отражённых электронах. Условные обозначения: *a, b* – обр.7543/219; *c, d* – обр.7562/396; *e, f* – обр.7562/483,3. Номера точек на рисунках соответствуют номерам микрозондовых анализов в эл. прил. 1, 2, 3, 4.

Гранаты присутствуют только в амфиболитах АС и имеют гроссуляр-альмандиновый состав ($Alm_{66-74}Grs_{16-19}Prp_{5-9}Sps_{3-5}$). Крупные зерна гранатов образуют порфиробласты размером от 0,5 до 2,5 мм и имеют ситовидное строение, выраженное в наличии многочисленных мелких включений других минералов. Гранаты характеризуются высокой железистостью (0,90–0,93), выраженная химическая зональность в них не проявлена (эл. прил. 5).

Метаморфизм

Формирование метаморфического комплекса палеопротерозойских пород, слагающих ТЯС, происходило в результате двух последовательных метаморфических событий. Первый этап связан с формированием горно-складчатого сооружения и имел региональный характер. Метаморфические процессы первого этапа характеризуются температурами от 350 до 560 °С и давлением 3,0–3,6 кбар [8], что

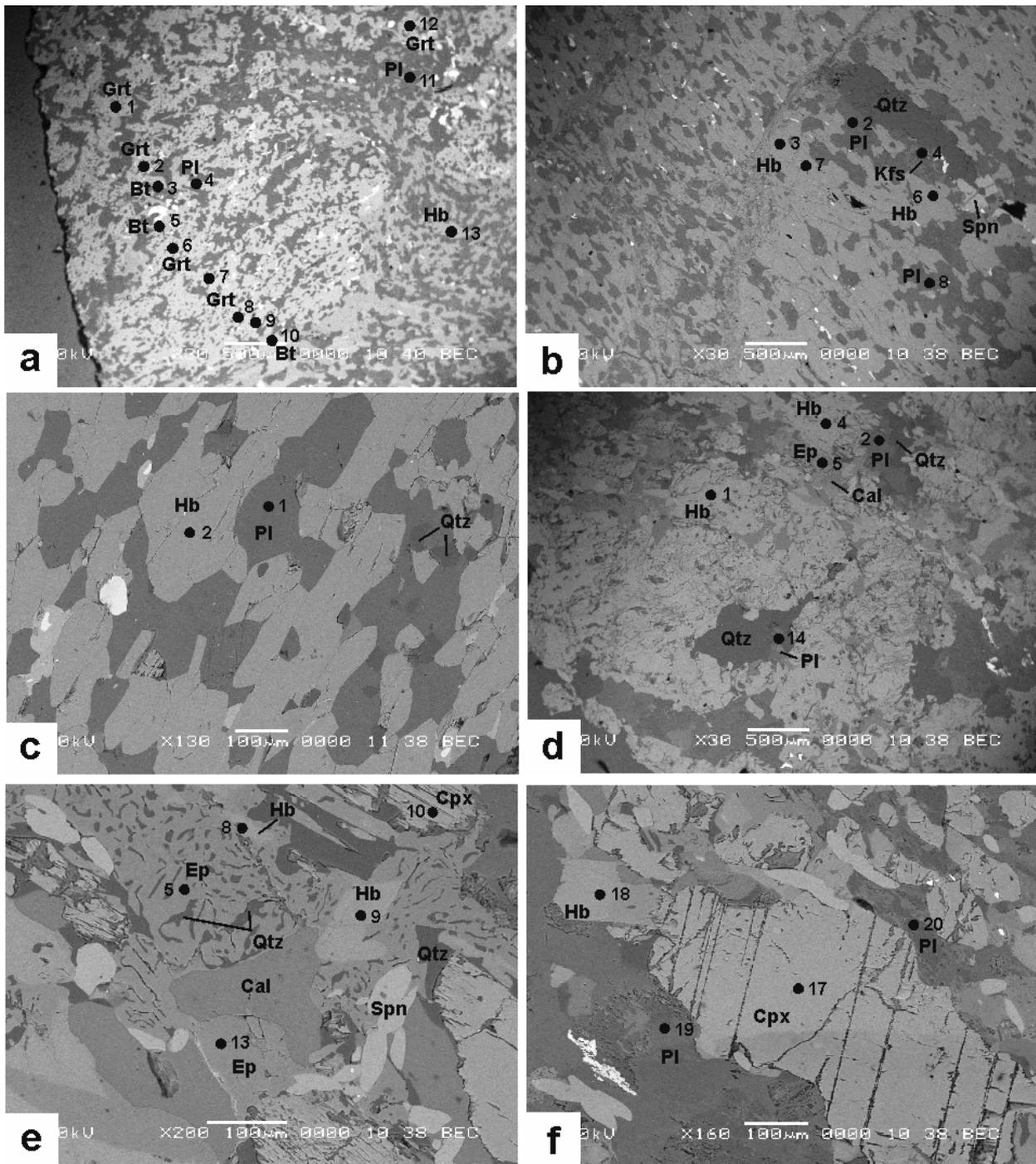


Рис. 7. Электронно-микроскопические снимки в отражённых электронах. Условные обозначения: а – обр.7523/341; б – обр. 7543/286; с – обр.7543/314; d, e, f – обр.7543/352. Номера точек на рисунках соответствуют номерам микрозондовых анализов в таблицах 1, 2, 3, 4, 5.

соответствует верхам зеленосланцевой – эпидот-амфиболитовой фаций. Второй, более поздний, этап метаморфизма носил локальный характер и приурочен к контактовым ореолам интрузий гранодиоритов, и характеризуется температурой 500–620°C при давлении до 2,1 кбар [9].

Для амфиболитов АС нами были определены температурные параметры метаморфизма по гранат-биотитовому термометру [15] (эл. прил. 6). Оценить

давление с помощью известных геобарометров для метабазальтов не удалось из-за редкой встречаемости парагенезисов, традиционно используемых для геобарометрии. Поэтому в основу выводов о параметрах давления положены данные, полученные для пород соседнего, Уколовского участка, расположенного юго-восточнее АС. Наблюдаемые там минеральные парагенезисы образовались при $T=650-800$ °С и давлений 4-6 кбар [3].

Петрогеохимическая характеристика

Составы метабазalts ТЯС и АС, а также архейских метабазalts Белгородско-Михайловского зеленокаменного пояса показаны на диаграмме TAS (рис. 8). Составы метабазalts ТЯС располагаются в области пород нормальной щелочности и занимают поле от пикробазalts до андезибазalts. К ним по кремнекислотности и щелочности близки амфиболиты АС, составы которых попадают преимущественно в поле базalts. Составы архейские метабазalts находятся в полях ультраосновных ($SiO_2 < 45$ мас.%), основных пород ($SiO_2 = 45-52$ мас. %) [16], часть из которых перекрывается с составами авильских и тим-ястребовских метабазalts. Для дискриминации составов метабазalts из различных

структур Курского мегаблока использована классификационная диаграмма $Zr/TiO_2 - Nb/Y$, учитывающая только отношения высокозарядных элементов (рис. 9). По значениям этих отношений тим-ястребовские и авильские метабазalts образуют перекрывающиеся поля в области субщелочных и щелочных базalts. Точки составов архейских метабазalts [16] образуют отдельное поле, вблизи границы полей андезибазalts и субщелочных базalts.

Для отнесения эффузивных пород к известково-щелочной или толеитовой петрохимической серии нами использованы диаграммы AFM [18]: $(Na_2O+K_2O) - FeO_{общ} - MgO$ (рис. 10) и Дженсена [19] (рис. 11).

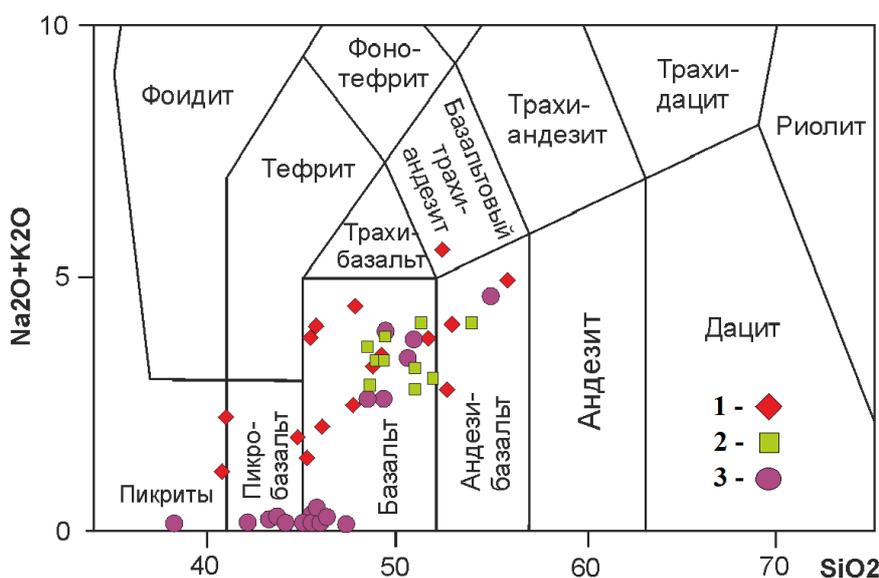


Рис. 8. Положение состава пород ТЯС и АС диаграмме TAS. Условные обозначения: 1 – метабазalts ТЯС, 2 – метабазalts АС, 3 – ультрабазальты-базальты Белгородско-Михайловского зеленокаменного пояса.

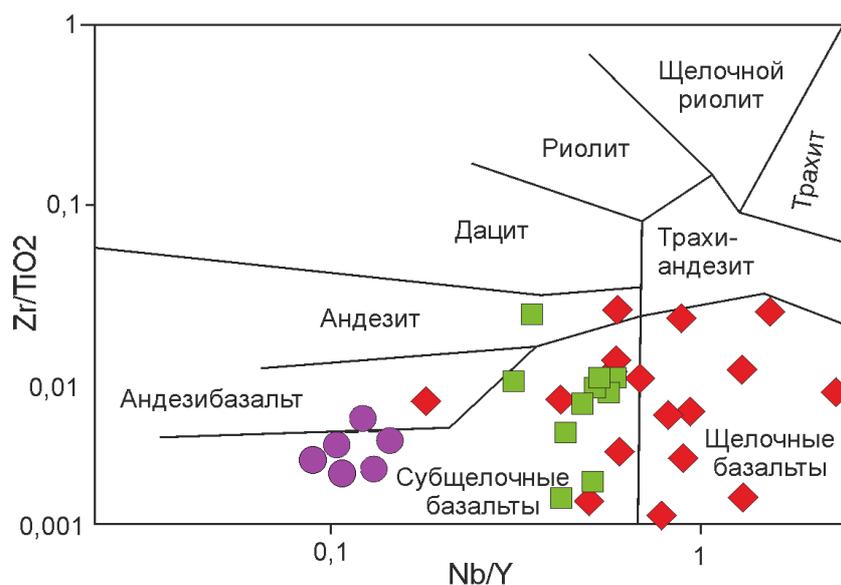


Рис. 9. Положение составов пород ТЯС и АС на классификационной диаграмме $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ [17]. Условные обозначения см. рис. 8.

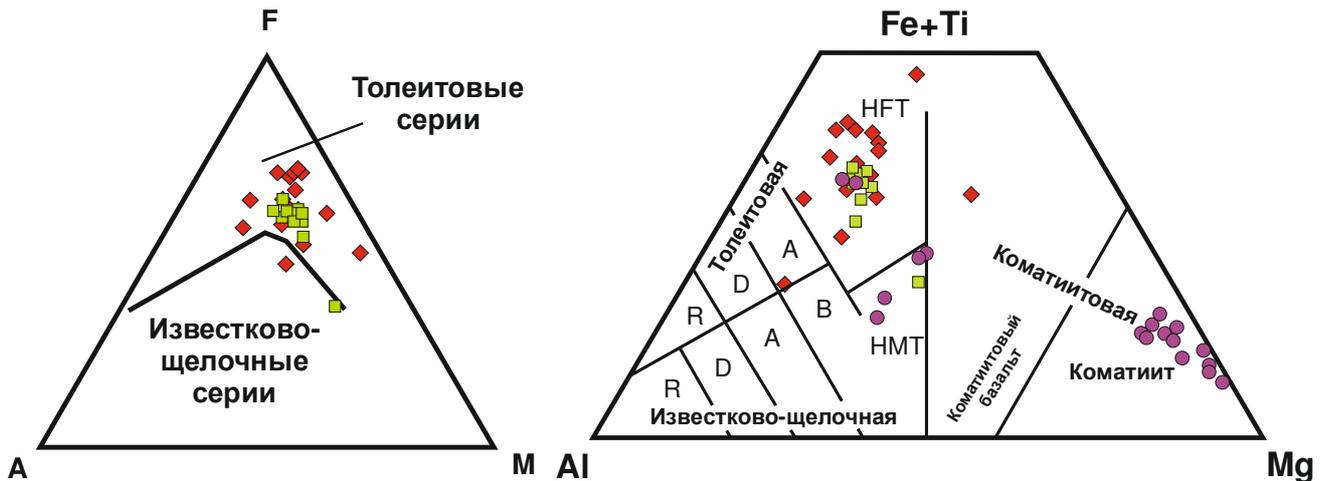


Рис. 10. Положение составов метабазитов Тим-Ястребовской и Авильской структур на треугольной диаграмме AFM [18]. Условные обозначения см. на рис. 8.

Рис. 11. Метабазиты Тим-Ястребовской и Авильской структур на треугольной диаграмме Дженсена [19]. Условные обозначения см. на рис. 8.

Как видно, большинство точек составов на обеих треугольных диаграммах попали в поля толейтовой серии. На диаграмме Al-(Fe+Ti)-Mg большинство метабазитов ТЯС и АС соответствуют высокожелезистым базальтам.

Для всех пород наблюдается явное преобладание натрия над калием $Na_2O/K_2O = 1,2-23,6$ (тим-ястребовские метабазиты), $1,2-12,7$ (авильские метабазиты) (эл. прил. 7). По этому отношению большинство образцов относятся к калиево-натриевой и натриевой серии. По индексу насыщенности глиноземом (ASI) большинство образцов умеренно глинозёмистые ($0,27 < ASI < 1,0$). Также метабазиты обеих структур характеризуются высокой железистостью: $X_{Fe} = 0,5-0,8$ (тим-ястребовские) и $0,4-0,7$ (авильские). По содержанию TiO_2 среди метабазитов ТЯС выделяются две группы, с нормальной и высокой титанистостью ($> 2,5$ мас. %).

По распределению РЗЭ высокожелезистые метабазиты ТЯС характеризуются 5–200 кратным превышением хондритового уровня и значительным обогащением лёгкими РЗЭ относительно тяжелых – $(La/Yb)_N = 2,5-25,0$, $(La/Sm)_N = 1,6-5,1$, $(Sm/Yb)_N = 1,9-6,0$, $(Gd/Yb)_N$ (эл. прил. 8), при отсутствии выраженных европиевых аномалий $Eu/Eu^* = 0,8-1,2$ (рис. 12а). По отношению $(Gd/Yb)_N$, среди метабазитов выделяются две группы со значениями меньше 2,5 (1,1–1,9) и больше 2,5 (2,6–4,0). Высокие отношения гадолиния к иттербию свидетельствуют о глубинном источнике магмогенерации и характерны для высокотитанистых метабазитов ($TiO_2 > 2,5$). На мультиэлементной диаграмме (рис. 12б) характерными чертами описываемых пород является большой разброс содержаний крупноионных элементов Rb, Ba, U, Th, положительная Y и отрицательные Zr, Sr аномалии.

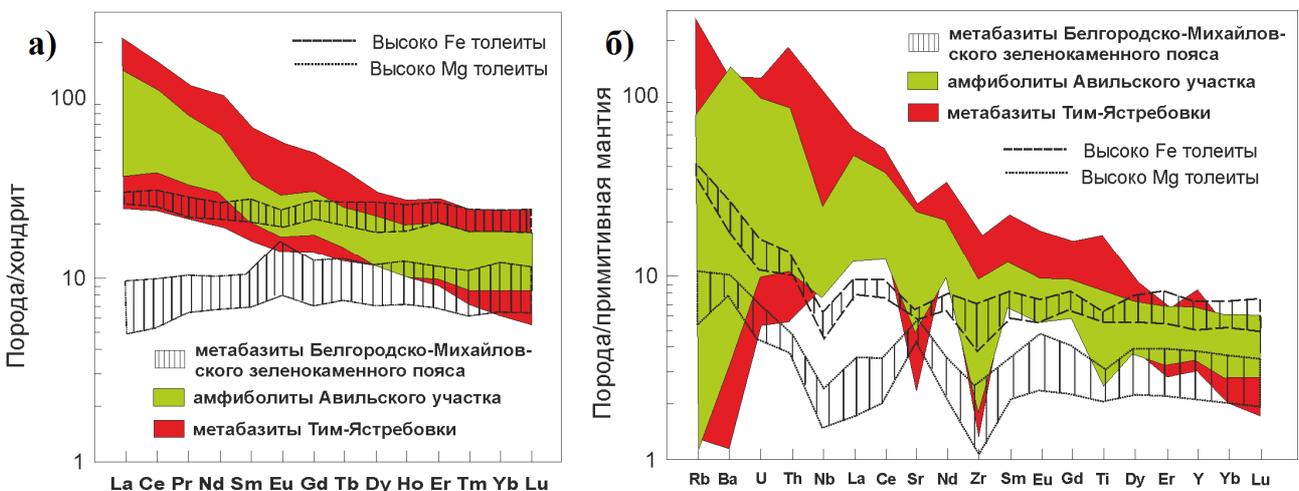


Рис. 12. Нормированные к хондриту (а) [20] и примитивной мантии (б) [21] распределения редкоземельных и редких элементов в метабазитах ТЯС и АС и в высокожелезистых и высокомагнезиальных толейтах Белгородско-Михайловского зеленокаменного пояса.

Высокожелезистые метабазиты АС, так же как и Тим-Ястребовской характеризуются резко дифференцированным спектром распределения РЗЭ с преобладанием легких РЗЭ относительно тяжелых ($(La/Yb)_N=2,3-16,4$, $(La/Sm)_N=1,4-4,2$, $(Sm/Yb)_N=1,5-3,9$, $(Gd/Yb)_N=1,3-2,5$, и отсутствием европиевых аномалий $Eu/Eu^*=0,8-1,0$ (эл. прил. 8). Характер распределения редких элементов в метабазитах обеих структур очень сходен (рис. 12б).

В отличие от метабазитов АС и ТЯС, архейские высокомагнезиальные и высокожелезистые толеиты по распределению РЗЭ характеризуются 5–30 кратным превышением хондритового уровня и незначительным обогащением тяжелыми лантаноидами относительно легких (высокомагнезиальные толеиты) – $(La/Yb)_N=0,4-1,1$, $(La/Sm)_N=0,5-1,1$, $(Sm/Yb)_N=0,9-1,1$, $(Gd/Yb)_N=1,1-1,2$, при отсутствии европиевых аномалий, за исключением единичных образцов, и практически нефракционированным спектром рас-

пределения РЗЭ для высокожелезистых толеитов ($(La/Yb)_N=1,2-1,4$, $(La/Sm)_N=1,1-1,3$, $(Sm/Yb)_N=1,1$, $(Gd/Yb)_N=1,1-1,2$, $Eu/Eu^*=0,9$. На мультиэлементной диаграмме (рис. 12б) характерными чертами архейских пород являются обогащенность крупноионными литофилами Rb, Ba, U, Th, и отрицательные Nb и Zr аномалии [16].

Большинство точек на дискриминантных диаграммах Th-Hf/3-Ta [22] и La/10-Y/15-Nb/8 [23] попадают в поля континентальных базальтов (рис. 13).

Составы метабазитов обеих структур попадают в поле обогащенного мантийного источника на диаграмме Th/Yb-Ta/Yb (Pearce, 1983) (рис. 14). Эти данные согласуются с имеющимися представлениями о современных континентальных рифтах, для которых на всех стадиях развития, вплоть до разрыва континентальной коры, мантийный источник их магмогенерации остается недеплетированным [25, 26].

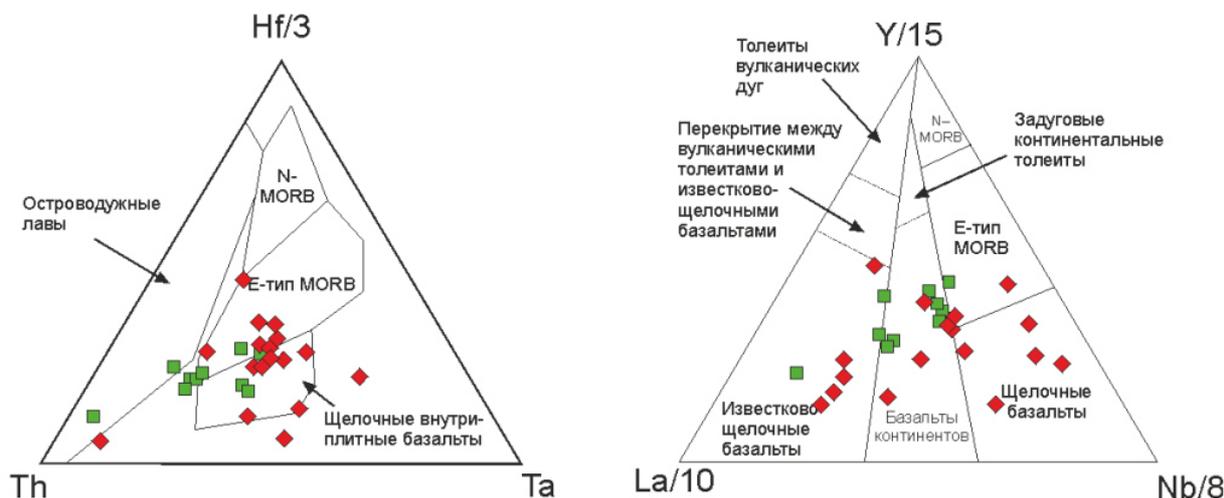


Рис. 13. Генетическая типизация метабазитов на диаграммах Th-Hf/3-Ta и La/10-Y/15-Nb/8. Условные обозначения см. рис. 8.

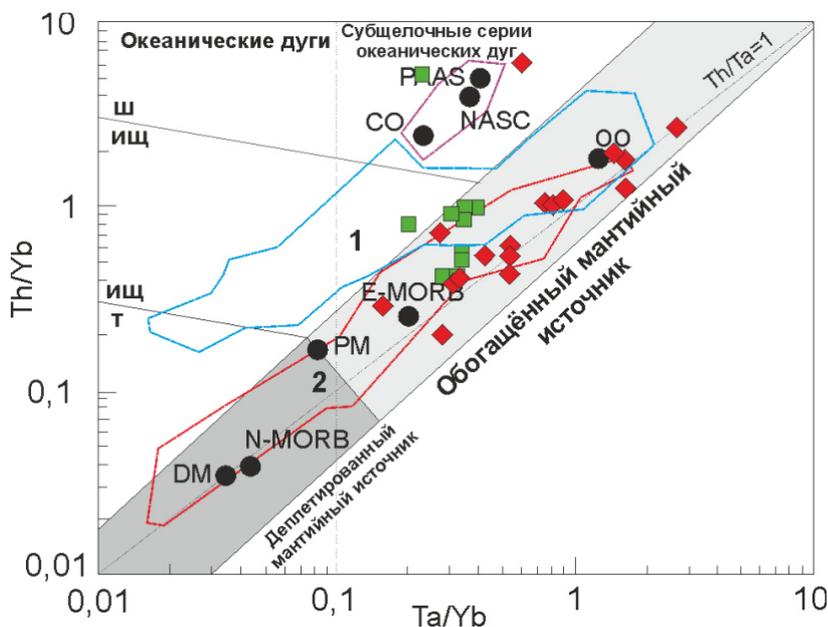


Рис. 14. Положение метабазитов ТЯС и АС на диаграмме Th/Yb-Ta/Yb [24]: 1 – базальтоиды островных дуг, 2 – базальтоиды Эфиопского и Красноморского рифтов, OO – базальты океанических островов, NASC – североамериканский глинистый сланец, PAAS – постархейский австралийский сланец, CO – субдуцируемые осадки, PM – примитивная мантия, DM – деплетированная мантия. Условные обозначения метабазитов см. рис. 8.

Высокие отношения $(La/Yb)_n$, $(La/Sm)_n$ и $(Gd/Yb)_n$ свидетельствует либо о недеплетированности источника мантийного расплава, либо о невысокой степени плавления (частичное плавление) гранатосодержащего протолита при образовании первичного расплава [27]. Предполагаемое изменение состава мантийного субстрата метабазитов приведено на вариационной диаграмме $(Yb/Sm)_N - (Ce/Sm)_N$, показывающей частичное плавление шпинелевого и гранатового лерцолита (рис. 15). Из диаграммы видно, что составы метабазитов образуют два поля: вблизи трендов плавления шпинелевого и гранатового лерцолита. В поле гранатового лерцолита попадают составы высокотитанистых метабазитов с отношением $(Gd/Yb)_n > 2,5$.

Интерпретация полученных данных

Результаты минералого-петрографического изучения метабазитов ТЯС и АС позволяют сделать вывод об их близком составе. Отличия, связанные с появлением граната и резким уменьшением количества

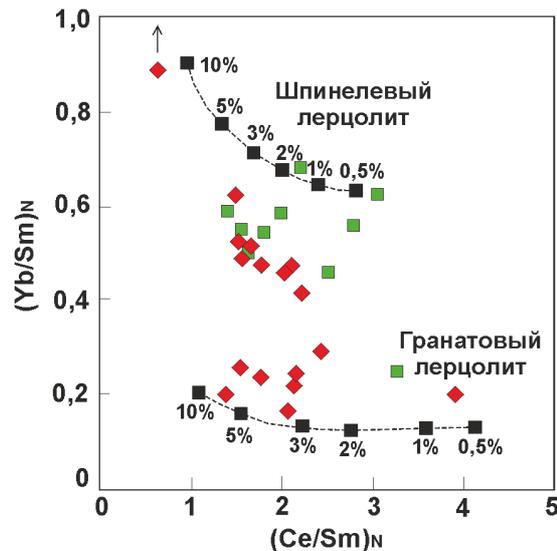


Рис. 15. Вариационная диаграмма $(Yb/Sm)_N - (Ce/Sm)_N$ для метабазитов ТЯС и АС. Условные обозначения см. рис. 8.

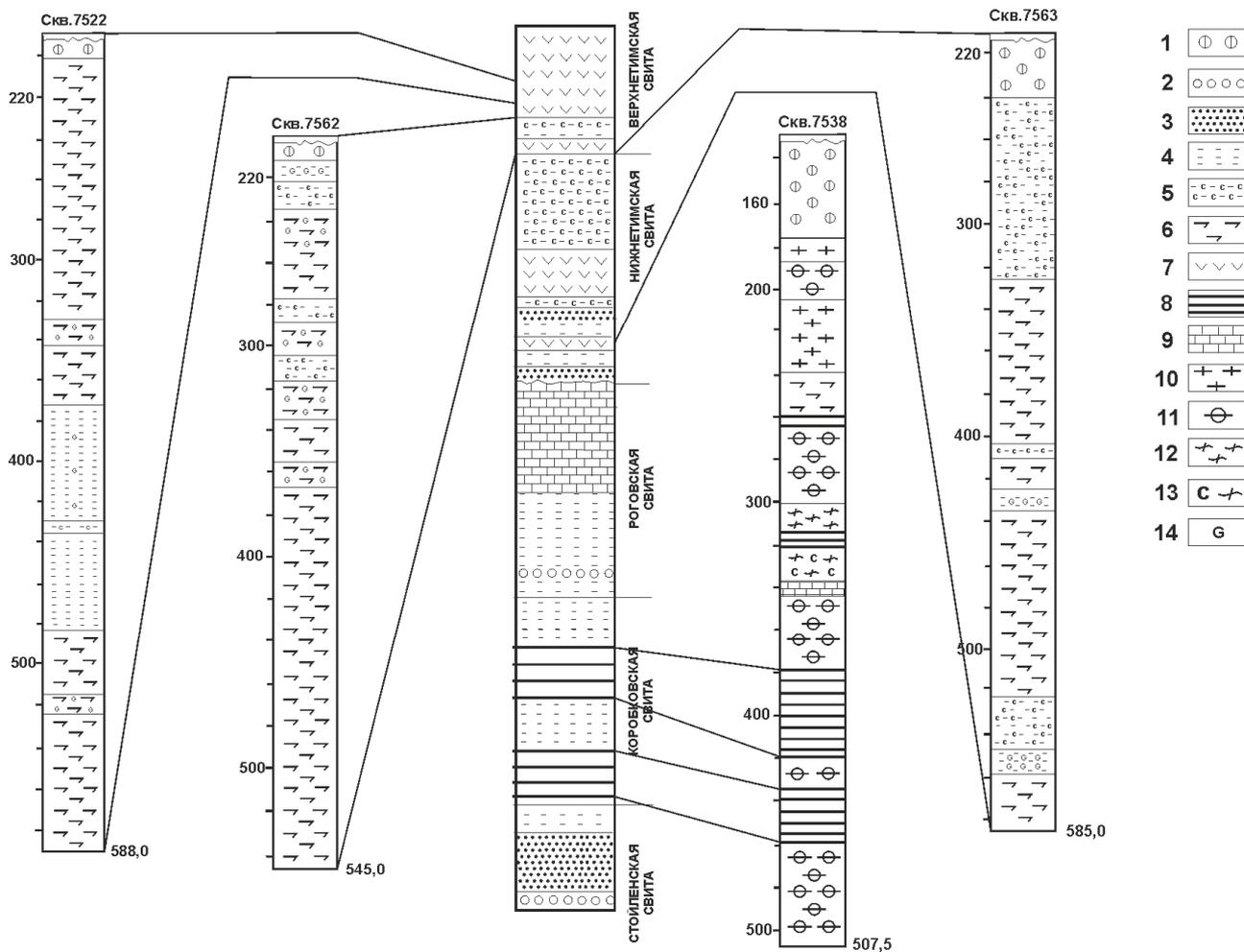


Рис. 16. Корреляция геологических разрезов Авильского (7522, 7562, 7563) и Уколовского (7538) участков с обобщенным геологическим разрезом палеопротерозойских отложений Тим-Ястребовской структуры. Условные обозначения: 1 – кора выветривания, 2 – конгломераты, 3 – метапесчаники, 4 – сланцы, 5 – углеродсодержащие сланцы, 6 – амфиболиты, 7 – вулканиты (преимущественно основного и среднего состава), 8 – силикатно-магнетитовые кварциты, 9 – доломиты, известняки и карбонатные прослои с диопсидом, 10 – амфиболовые и амфибол-биотитовые гнейсы, 11 – гранат-биотитовые и биотит-гранатовые гнейсы, 12 – биотитовые гнейсы, 13 – графитовые гнейсы с силлиманитом.

эпидота, обусловлены лишь разной степенью метаморфизма. Наиболее вероятной причиной увеличения степени метаморфизма пород в Авильской структуре послужило увеличение теплового потока при вязких деформациях и складчатости на восточной окраине Сарматии на рубеже около 2070 млн. лет в результате коллизии Сарматии и Волгоуралии [28].

Метабазиты обеих структур также близки по содержаниям и соотношениям петрогенных окислов и характеру распределения РЗЭ и редких элементов, подтверждающих их рифтогенный генезис.

Источником метабазитов являлась обогащенная литосферная мантия. Меньшая глубина магмогенерации авильских и части тимских метабазитов (шпинелевый источник – глубина 30–40 км) может быть объяснена моделью, при которой с развитием рифтовой системы происходит углубление источников магмогенерации (гранатовый источник – более 70 км). Данная модель согласуется с пространственным положением тим-ястребовских метабазитов. Так эффузивы, имеющие менее глубокий источник (в поле шпинелевого лерцолита), приурочены к нижнетимской, а более глубокий (в поле гранатового лерцолита) – к верхнетимской подсвите.

Корреляция геологических разрезов

Нами была проведена корреляция геологических разрезов по скважинам в соседних Авильской и Уколовской синформах с обобщенным геологическим разрезом палеопротерозойских отложений Тим-Ястребовской структуры. Как видно на рис. 16 на Уколовском участке скважиной 7538 были вскрыты интенсивно метаморфизованные породы, представленные гнейсами, в том числе графитовыми, железистыми кварцитами, амфиболитами. Хемогенные породы железисто-кремнистой формации коробковской свиты в ТЯС согласно залегают на терригенных отложениях стойленской свиты. Они делятся на четыре толщи (подсвиты): нижнюю железорудную, нижнюю сланцевую, верхнюю железорудную и верхнюю сланцевую. Точно так же на четыре толщи делятся более высоктемпературные породы ЖКФ, только вместо внутрирудных сланцев в Уколовской синформе присутствуют «внутрирудные» гнейсы (рис. 16). Подстилается нижняя железорудная толща силлиманит-гранатовыми гнейсами, которые являются эквивалентами глиноземистых сланцев стойленской свиты в ТЯС. Скважины Авильского участка (7522, 7562, 7563) вскрывают преимущественно амфиболиты, переслаивающиеся с пачками сланцев, обогащенных углеродистым веществом, которые коррелируются с углеродистыми сланцами и метабазами тимской свиты. Отметим, что в разрезах неоархейских метабазитов михайловской серии углеродистые сланцы встречаются крайне редко.

Выводы

Метабазиты АС превращены в амфиболиты и отличаются от тим-ястребовских метабазальтов более высокой степенью регионального метаморфизма, пиковые параметры которого достигают 650–700 °С и 5 кбар. Причиной более высокотемпературного метаморфизма послужило увеличение теплового потока при вязких деформациях и складчатости в результате коллизионных процессов на восточной границе Курского блока и Волго-Донского орогена (Лосевский и Воронцовский террейны), при сочленении архейских континентов Сарматии и Волгоуралии.

Сходство строения геологических разрезов курской и оскольской серий в Тим-Ястребовской, Уколовской и Авильской структурах, если «снять» метаморфические изменения в последних, также подтверждает синхронность формирования тимских и авильских метабазитов.

Установлено фактически одинаковое распределение редких и редкоземельных элементов в метабазалятах Тим-Ястребовской и амфиболитов Авильской структур, контрастно отличающееся от неоархейских метабазитов. Это свидетельствует о едином обогащенном мантийном источнике и синхронности формирования метабазитов Авильской и Тим-Ястребовской структур в палеопротерозое, возможно в единой структуре, которая впоследствии в результате тектонических движений и эрозии была фрагментирована.

ЛИТЕРАТУРА

1. Щеголев, И. Н. Железорудные месторождения докембрия и методы их изучения / И. Н. Щеголев. – М.: Недра. – 1985. – 196 с.
2. Савко, К. А. Фаялит-грюнерит-магнетит-кварцевые породы железистой формации ВКМ: фазовые равновесия и условия метаморфизма / К. А. Савко // Петрология, 1994. – Т. 2. – № 5. – С. 540–550.
3. Лебедев, И. П. О генезисе гнейсов Шатиловско-Шаталовской рудоносной зоны КМА / И. П. Лебедев, О. А. Бологова // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер.: Геология. – 2002. – № 2. – С. 125–133.
4. Савко, К. А. Физико-химические параметры метаморфизма элизитов центральной части Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко // Вестн. Воронеж. гос. ун-та Сер.: Геология. – 1999. – № 8. – С. 73–81.
5. Fonarev, V. I. Exsolution textures of orthopyroxene and clinopyroxene in high-grade BIF of the Voronezh Crystalline Massif: evidence of ultrahigh-temperature metamorphism / V. I. Fonarev, S. M. Pilugin, K. A. Savko, M. A. Novikova // J. metamorphic Geol., 2006. – V. 24. – P. 135–151.
6. Балашов, Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов / Ю. А. Балашов. – М.: Наука. – 1976. – 286 с.
7. Чернышов, Н. М. Модель геодинамического развития Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии / Н. М. Чернышов, В. М. Ненахов, И. П. Лебедев [и др.] // Геотектоника, 1997. – № 3. – С. 21–30.
8. Савко, К. А. Зональный метаморфизм и петрология метапелитов Тим-Ястребовской структуры, Воронежский кристаллический массив / К. А. Савко, Т. Н. Полякова // Петрология, 2001. – Т. 9. – № 6. – С. 593–611.
9. Полякова, Т. Н. Петрология метапелитов и силикатно-карбонатных пород Тим-Ястребовской структуры (Воронеж-

- ский кристаллический массив) / Т. Н. Полякова, К. А. Савко, В. Ю. Скрябин // Труды НИИ Геологии ВГУ. – 2006. – Вып.35. – Воронеж : Изд-во Воронеж. гос. ун-та. – 125 с.
10. Холин, В. М. Геология, геодинамика и металлогеническая оценка раннепротерозойских структур КМА : автореф. дисс. ... канд. геол.-мин. наук / В. М. Холин. – Воронеж. – 2001. – 24 с.
11. Савко, К. А. Палеопротерозойские гранитоиды Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива: геохимия, геохронология и источники расплавов / К. А. Савко, Н. С. Базиков, Е. Н. Козлова, А. В. Самсонов // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Геология. – 2014. – № 2. – С. 56–78.
12. Polyakova, T. N. Evolutions of Early Proterozoic metamorphism within Tim-Yastrebovskaya Paleorift, Voronezh Crystalline Massif, East-European Platform: metapelite systematics, phase equilibrium and P-T conditions / T. N. Polyakova, K. A. Savko, V. Yu. Skryabin // H. Thomas (Ed.) Metamorphism and Crustal Evolution, published by Atlantic Publishers and Distributors. – New Delhi. 2005. – P. 26 – 72.
13. Савко, К. А. Геохимическая эволюция железисто-кремнистых формаций Воронежского кристаллического массива в раннем докембрии: источники вещества и геохронологические ограничения / К. А. Савко, Н. С. Базиков, Г. В. Артеменко // Стратиграфия. Геол. корреляция, 2015. – Т. 23. – № 5. – С. 3–21.
14. Leake, B. E. Nomenclature of amphiboles. Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association Commission on New Minerals and Mineral Names / B. E. Leake, A. R. Woolley, and 20 members of the Subcommittee on Amphiboles // Eur. J. Mineral., 1997. – V. 9. – P. 623–651.
15. Perchuk, L. L. Derivation of thermodynamically consistent system of geothermometers and geobarometers for metamorphic and magmatic rocks / L. L. Perchuk // Progress in metamorphic and magmatic petrology (Ed.) – Cambridge University Press., 1990. – P. 93–112.
16. Рыборак, М. В. Петрогенезис коматиит-толеитовой ассоциации позднearerхейских зеленокаменных поясов Курского блока Сарматии / М. В. Рыборак, А. Ю. Альбеков // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер.: Геология. – 2015. – № 1. – С. 53–60.
17. Winchester, J. A. Chemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile element / J. A. Winchester, P. A. Floyd // Chemical Geology, 1977. – Vol. 20. – P. 325–343.
18. Irvine, T. N. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks / T. N. Irvine, W. R. A. Baragar // Canadian Journal of Earth Sciences, 1971. – V. 8. – P. 523–548.
19. Jensen, L. S. A new cation plot for classifying subalkalic volcanic rocks / L. S. Jensen // Ontario Div. Mines. Misc. Pap., 1976. – 66 p.
20. Palme, H. Cosmochemical estimates of mantle composition / H. Palme, H. St. C. O'Neill // Treatise on Geochemistry. – Elsevier Ltd. – 2003. – V. 2. – P. 1–38.
21. Sun, S.-S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / S.-S. Sun, W. F. McDonough [In: Saunders, A. D., Norry, M. J. Eds., Magmatism in Ocean Basins. Geol. Soc. Spec. Publ.]. – London. – 1989. – P. 313–345.
22. Wood, D. A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province / D. A. Wood // Earth and Planetary Science Letters., 1980. – V. 50. – P. 11–30.
23. Cabanis, B. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: un outil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus del mélange et/ou de contamination crustale / B. Cabanis, M. Lecolle // C. R. Acad. Sci. Paris., 1989. – V. 309. – P. 2023–2029.
24. Pearce, J. A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins / J. A. Pearce // Continental basalts and mantle xenoliths: Papers prepared for a UK Volcanic studies group meeting at the University of Leicester. – Nantwich: Shiva. – 1983. – P. 230–249.
25. Магматические горные породы: эволюция магматизма в истории Земли / О. А. Богатиков [и др.]; под ред. О. А. Богатикова – М.: Наука. – 1987. – Т. 6. – 438 с.
26. Фролова, Т. И. Магматические формации современных геотектонических обстановок / Т. И. Фролова, И. А. Бурикова. – М.: Изд-во МГУ. – 1997. – 320 с.
27. Мартынов, Ю. А. Основы магматической геохимии / Ю. А. Мартынов. – Владивосток : Дальнаука. – 2010. – 228 с.
28. Савко, К. А. Метаморфическая зональность восточной части Воронежского кристаллического массива: возраст, условия и геодинамическая обстановка формирования / К. А. Савко, А. В. Самсонов, Е. Б. Сальникова, А. В. Котов, Н. С. Базиков // Петрология, 2015. – Т. 23. – № 6. – С. 607–623.

Воронежский государственный университет

Савко Константин Аркадьевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, заведующий кафедрой полезных ископаемых и недропользования
E-mail: ksavko@geol.vsu.ru; Тел.: 8-915-544-21-64

Цыбуляев С. В. магистрант кафедры полезных ископаемых и недропользования
E-mail: stsybulyaev@bk.ru; Тел.: 8-930-408-88-91

Кориш Екатерина Хафисовна, научный сотрудник
E-mail: korish_k@rambler.ru
Тел.: +7 (473) 220-8-626

Voronezh State University

Savko K. A., Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Head of the Mineral Resource Department
E-mail: ksavko@geol.vsu.ru
Tel.: 8-915-544-21-64

Tsybulyaev S. V., Student of the Mineral Resource Department
E-mail: stsybulyaev@bk.ru
Tel.: 8-930-408-88-91

Korish E. H., research worker
E-mail: korish_k@rambler.ru
Tel.: +7 (473) 220-86-26

Приложение 1

Химический состав и кристаллохимические формулы полевых шпатов

№ образца	3105/305,3						4312/419,2				7543/314,0	
	Kfs-4	Pl-6	Pl-7	Pl-8	Pl-13	Pl-15	Pl-5	Pl-9	Kfs-14	Pl-15	Pl-1	
SiO ₂	62,81	56,6	57,77	58,57	58,21	56,1	56,17	58,86	62,31	58,73	57,05	
TiO ₂	0,35	-	-	-	-	-	-	0,21	0,16	-	-	
Al ₂ O ₃	19,61	28,02	26,86	26,83	26,61	28,56	27,03	25,66	18,05	25,68	28,14	
FeO	0,88	-	-	0,18	-	0,22	0,23	0,13	0,75	0,33	0,2	
MgO	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
CaO	1,3	9,31	8,66	8,34	7,69	10,64	8,58	7,23	-	6,5	9,38	
Na ₂ O	1,88	5,96	7,15	7,03	7,02	5,73	6,82	7,73	0,15	8,02	6,62	
K ₂ O	11,83	0,56	-	0,1	0,33	-	0,18	0,09	15,62	0,27	-	
Сумма	98,8	100,5	100,4	101	99,85	101,3	99,01	99,91	97,03	99,53	101,4	
Si	2,93	2,53	2,57	2,59	2,60	2,49	2,53	2,62	2,98	2,62	2,52	
Ti	0,01	-	-	-	-	-	-	0,01	0,01	-	-	
Al	1,08	1,48	1,41	1,40	1,40	1,50	1,44	1,35	1,02	1,35	1,46	
ΣR ^{IV}	4,02	4,01	3,98	3,99	4	3,99	3,97	3,98	4,01	3,97	3,98	
Fe	0,03	-	-	0,01	-	0,01	0,01	-	0,03	0,01	0,01	
Mg	0,01	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ca	0,06	0,45	0,41	0,40	0,37	0,51	0,41	0,35	-	0,31	0,44	
Na	0,17	0,52	0,62	0,60	0,61	0,49	0,60	0,67	0,01	0,69	0,57	
K	0,70	0,03	0,00	0,01	0,02	-	0,01	0,01	0,95	0,02	-	
ΣR ^{VI}	0,97	1,00	1,03	1,02	1	1,01	1,03	1,03	0,99	1,03	1,02	
An	0,07	0,45	0,40	0,39	0,37	0,53	0,41	0,34	-	0,30	0,44	
Ab	0,18	0,52	0,60	0,60	0,61	0,47	0,58	0,66	0,01	0,68	0,56	
Ort	0,75	0,03	-	0,01	0,02	-	0,01	0,01	0,99	0,02	-	

Продолжение приложения 1

№ образца	4318/518,6			7543/219,0				7543/352,0				
	Pl-1	Pl-2	Pl-4	Pl-1	Pl-2	Pl-3	Pl-4	Pl-2	Pl-14	Pl-19	Pl-20	
SiO ₂	62,9	64,18	63,52	59,56	61,4	58,24	55,55	55,42	55,18	55,92	67,01	
TiO ₂	-	-	-	-	-	-	0,19	-	-	-	-	
Al ₂ O ₃	22,82	22,31	22,97	26,89	24,82	27,06	28,34	29,01	25,77	27,45	19,72	
FeO	-	-	-	0,24	0,2	-	-	-	1,1	0,28	0,4	
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	0,14	-	-	
CaO	3,95	3,53	3,83	9,57	7,32	9,85	11,6	10,76	8,53	9,49	0,36	
Na ₂ O	9,41	9,95	9,83	5,79	6,61	5,37	4,93	5,61	6,7	6,12	11,68	
K ₂ O	0,09	-	-	0,13	0,21	-	-	-	0,21	-	0,27	
Сумма	99,18	99,98	100,1	102,2	100,6	100,5	100,6	100,8	97,63	99,26	99,44	
Si	2,80	2,83	2,79	2,63	2,75	2,62	2,50	2,47	2,53	2,53	2,94	
Ti	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-	-	
Al	1,20	1,16	1,19	1,40	1,31	1,44	1,50	1,53	1,39	1,46	1,02	
ΣR ^{IV}	4	3,99	3,98	4,03	4,06	4,06	4,01	4	3,92	3,99	3,96	
Fe	-	-	-	0,01	0,01	-	-	-	0,04	0,01	0,01	
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	
Ca	0,19	0,17	0,18	0,45	0,35	0,47	0,56	0,51	0,42	0,46	0,02	
Na	0,81	0,85	0,84	0,50	0,57	0,47	0,43	0,49	0,60	0,54	0,99	
K	0,01	-	-	0,01	0,01	-	-	-	0,01	-	0,02	
ΣR ^{VI}	1,01	1,02	1,02	0,97	0,94	0,94	0,99	1	1,08	1,01	1,04	
An	0,19	0,16	0,18	0,47	0,37	0,50	0,57	0,51	0,41	0,46	0,03	
Ab	0,81	0,84	0,82	0,52	0,61	0,50	0,43	0,49	0,58	0,54	0,95	
Ort	0,01	-	-	0,01	0,01	-	-	-	0,01	-	0,02	

Окончание приложения 1

№ образца	7543/286,0			7523/341,0		7562/396,0		7562/483,3			
	Pl-2	Kfs-4	Pl-8	Pl-4	Pl-11	Pl-3	Kfs-10	Pl-1	Pl-2	Pl-3	Pl-9
SiO ₂	67,63	56,95	62,81	58,43	60,9	48,39	63,72	61,57	60,75	62,19	62,7
TiO ₂	-	0,29	-	-	-	-	0,69	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	20,51	16,72	23,28	22,97	25,91	35,53	18,17	24,4	24,18	24,07	23,55
FeO	0,15	-	0,21	0,88	0,18	0,19	0,62	-	-	-	-
MnO	-	-	-	-	-	-	-	0,21	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	0,65	0,97	4,49	5,89	6,63	18,3	-	6,85	7,35	6,43	6,08
Na ₂ O	11,93	0,3	9,26	8,26	7,92	1,43	0,39	7,02	7,12	7,56	7,43
K ₂ O	0,09	13,45	0,41	0,16	-	-	15,37	-	-	-	0,11
Сумма	101,0	88,68	100,5	97,21	101,5	104,1	98,96	100,1	99,40	100,3	99,87
Si	2,92	2,98	2,76	2,69	2,67	2,15	2,99	2,76	2,74	2,77	2,81
Ti	-	0,01	-	-	-	-	0,02	-	-	-	-
Al	1,04	1,03	1,21	1,24	1,34	1,86	1,00	1,29	1,28	1,27	1,24
ΣR ^{IV}	3,96	4,02	3,97	3,93	4,01	4,01	4,01	4,05	4,02	4,04	4,05
Fe	0,01	-	0,01	0,03	0,01	0,01	0,02	0,00	-	-	-
Mn	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ca	0,03	0,05	0,21	0,29	0,31	0,87	-	0,33	0,35	0,31	0,29
Na	1,00	0,03	0,79	0,74	0,67	0,12	0,04	0,61	0,62	0,65	0,65
K	-	0,90	0,02	0,01	-	-	0,92	-	-	-	0,01
ΣR ^{VI}	1,04	0,98	1,03	1,07	0,99	1	0,98	0,95	0,97	0,96	0,95
An	0,03	0,06	0,21	0,28	0,32	0,88	-	0,35	0,36	0,32	0,31
Ab	0,97	0,03	0,77	0,71	0,68	0,12	0,04	0,65	0,64	0,68	0,68
Ort	-	0,91	0,02	0,01	-	-	0,96	-	-	-	0,01

Приложение 2

Химический состав и кристаллохимические формулы амфиболов

№ образца	4312/419,2				4318/518,6		7523/341,0	7543/314,0	7543/286,0			
	Hb-2	Hb-3	Hb-6	Hb-12	Hb-6	Hb-10	Hb-13	Hb-2	Hb-3	Hb-6	Hb-7	
SiO ₂	41,92	44,61	44,6	40,76	41,89	41,59	40,33	45,17	44,68	44,11	45,65	
TiO ₂	0,8	0,36	0,49	0,46	0,89	0,54	1,2	1,45	0,97	1,51	1,34	
Al ₂ O ₃	13,9	12,2	12,25	14,02	10,06	11,92	11,53	9,91	9,66	10,41	8,66	
FeO	16,59	16,85	17,48	16,18	27,16	26,16	22,48	19,47	18,24	18,64	18,84	
MnO	0,36	0,42	0,25	0,32	0,62	0,38	-	0,35	0,41	0,25	0,46	
MgO	9,63	10,93	10,6	9	4,26	3,95	6,25	8,95	9,24	8,78	9,43	
CaO	10,52	10,38	9,66	10,3	10,61	11,03	10,85	11,76	11,24	11,33	11,18	
Na ₂ O	1,79	1,23	1,16	1,72	1,63	1,16	1,59	1,15	1	1,08	0,91	
K ₂ O	0,2	0,19	0,12	0,12	0,79	0,64	0,78	0,51	0,51	0,54	0,38	
Сумма	95,72	97,16	96,6	92,89	97,92	97,38	95,01	98,72	96,09	96,65	96,86	
Si	6,233	6,444	6,440	6,245	6,483	6,427	6,322	6,684	6,732	6,637	6,816	
Al ^{IV}	1,767	1,556	1,560	1,755	1,517	1,573	1,678	1,316	1,268	1,363	1,184	
ΣT	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	
Al ^{VI}	0,668	0,521	0,524	0,777	0,318	0,597	0,452	0,412	0,447	0,483	0,340	
Ti	0,089	0,039	0,053	0,053	0,104	0,063	0,141	0,161	0,110	0,171	0,150	
Fe ^{III}	1,015	1,365	1,595	0,956	0,829	0,725	0,661	0,428	0,565	0,467	0,630	
Fe ^{II}	1,047	0,670	0,516	1,117	2,686	2,655	2,286	1,981	1,733	1,878	1,722	
Mn	0,045	0,051	0,031	0,042	0,081	0,050	0,000	0,044	0,052	0,032	0,058	
Mg	2,135	2,354	2,282	2,056	0,983	0,910	1,461	1,974	2,076	1,969	2,099	
ΣC	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	
Ca	1,676	1,606	1,494	1,691	1,759	1,826	1,822	1,864	1,814	1,826	1,788	
Na	0,324	0,344	0,325	0,309	0,241	0,174	0,178	0,136	0,186	0,174	0,212	
ΣB	2,000	1,951	1,819	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	
Na	0,192	-	-	0,202	0,248	0,173	0,305	0,194	0,106	0,141	0,052	
K	0,038	0,035	0,022	0,023	0,156	0,126	0,156	0,096	0,098	0,104	0,072	
ΣA	0,230	0,035	0,022	0,225	0,404	0,300	0,461	0,290	0,205	0,245	0,124	
X _{Mg}	0,67	0,78	0,82	0,65	0,27	0,26	0,39	0,5	0,54	0,51	0,55	

Продолжение приложения 2

№ образца	7543/352,0					7543/219,0				
	Нб-1	Нб-4	Нб-8	Нб-9	Нб-18	Нб-5	Нб-6	Нб-7	Нб-8	Аст-9
SiO ₂	42,77	45,16	44,19	44,66	43,43	47,68	49,75	49,65	49,8	49,91
TiO ₂	1,02	0,21	0,37	0,45	0,53	0,92	0,75	1,08	0,42	0,23
Al ₂ O ₃	10,85	10,18	10,41	9,02	10,47	9,23	7,14	8,06	6,15	4,48
Cr ₂ O ₃	-	-	-	0,21	-	-	0,16	-	-	-
FeO	22,53	22,57	21,54	21,03	21,44	17,21	15,84	17,02	15,6	13,4
MnO	0,38	0,39	-	0,39	0,38	0,3	-	-	0,49	0,34
MgO	6,23	6,89	7,17	7,71	6,9	9,46	10,89	10,03	10,17	11,38
CaO	11,89	11,67	12,11	11,62	11,82	11,44	11,48	11,5	11,87	11,95
Na ₂ O	1,19	0,9	0,89	0,74	1,18	0,97	0,5	1	0,63	0,5
K ₂ O	0,58	0,48	0,53	0,32	0,55	0,47	0,32	0,55	0,28	0,12
Сумма	97,44	98,46	97,22	96,15	96,7	97,68	96,83	98,89	95,41	92,31
Si	6,559	6,764	6,724	6,814	6,665	7,044	7,322	7,228	7,475	7,658
Al ^{IV}	1,441	1,236	1,276	1,186	1,335	0,956	0,678	0,772	0,525	0,342
ΣТ	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al ^{VI}	0,520	0,561	0,591	0,436	0,559	0,651	0,560	0,610	0,563	0,468
Ti	0,118	0,024	0,042	0,052	0,061	0,102	0,083	0,118	0,047	0,027
Cr	-	-	-	0,025	-	-	0,019	-	-	-
Fe ^{III}	0,312	0,528	0,287	0,542	0,307	0,113	0,111	-	-	-
Fe ^{II}	2,577	2,298	2,453	2,141	2,444	2,013	1,838	2,072	1,958	1,719
Mn	0,049	0,049	-	0,050	0,049	0,038	-	-	0,062	0,044
Mg	1,424	1,539	1,626	1,754	1,579	2,083	2,389	2,177	2,276	2,603
ΣС	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	4,977	4,906	4,860
Ca	1,953	1,873	1,974	1,899	1,943	1,811	1,810	1,793	1,909	1,964
Na	0,047	0,127	0,026	0,101	0,057	0,189	0,143	0,207	0,091	0,036
ΣВ	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	1,953	2,000	2,000	2,000
Na	0,307	0,134	0,237	0,118	0,295	0,088	-	0,076	0,092	0,113
K	0,113	0,092	0,103	0,062	0,108	0,089	0,060	0,102	0,054	0,023
ΣА	0,421	0,226	0,339	0,181	0,402	0,177	0,060	0,178	0,146	0,136
X _{Mg}	0,36	0,40	0,40	0,45	0,39	0,51	0,57	0,51	0,54	0,6

Окончание приложения 2

№ образца	7562/396,0				7562/483,3					
	Нб-1	Нб-2	Нб-6	Нб-11	Нб-4	Нб-5	Нб-6	Нб-7	Нб-8	Нб-10
SiO ₂	44,12	45,99	41,58	44,53	46,15	45,39	46,86	48,13	48,15	47,9
TiO ₂	1,37	0,59	0,59	1,01	0,46	1,02	1,26	0,79	0,48	0,93
Al ₂ O ₃	12,65	12,24	14,52	11,75	7,74	10,04	9,16	9,55	9,16	8,66
Cr ₂ O ₃	0,29	-	-	0,27	1,25	0,44	-	-	-	-
FeO	13,44	13,16	14,29	12,48	16,34	18,6	18,38	17,8	18,24	17,27
MnO	0,27	-	0,22	0,25	-	-	0,51	-	0,31	0,34
MgO	11,93	12,61	10,61	12,48	9,07	8,25	9,06	8,89	9,03	8,92
CaO	12,44	12,02	12,21	11,97	10,85	11,01	10,89	11,25	11,45	11,22
Na ₂ O	1,12	1,21	1,32	1,2	1,2	0,98	1,15	1,34	1,19	0,74
K ₂ O	0,83	0,71	1,11	0,58	0,37	0,48	0,35	0,28	0,28	0,54
Сумма	98,46	98,53	96,45	96,52	93,43	96,21	97,62	98,03	98,29	96,52
Si	6,406	6,594	6,207	6,534	7,154	6,846	6,930	7,096	7,090	7,171
Al ^{IV}	1,594	1,406	1,793	1,466	0,846	1,154	1,070	0,904	0,910	0,829
ΣТ	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000	8,000
Al ^{VI}	0,570	0,663	0,761	0,565	0,568	0,631	0,526	0,756	0,680	0,699
Ti	0,150	0,064	0,066	0,111	0,054	0,116	0,140	0,088	0,053	0,105
Cr	0,033	-	-	0,031	0,153	0,052	-	-	-	-
Fe ^{III}	0,353	0,456	0,401	0,434	-	0,302	0,418	-	0,119	0,003
Fe ^{II}	1,279	1,122	1,383	1,097	2,118	2,044	1,855	2,194	2,127	2,159
Mn	0,033	-	0,028	0,031	-	-	0,064	-	0,039	0,043
Mg	2,582	2,696	2,361	2,730	2,096	1,855	1,997	1,954	1,982	1,991
ΣС	5,000	5,000	5,000	5,000	4,990	5,000	5,000	4,992	5,000	5,000
Ca	1,935	1,846	1,953	1,882	1,802	1,779	1,725	1,777	1,806	1,800
Na	0,065	0,154	0,047	0,118	0,198	0,221	0,275	0,223	0,194	0,200
ΣВ	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
Na	0,250	0,183	0,335	0,223	0,163	0,066	0,055	0,160	0,146	0,014
K	0,154	0,130	0,211	0,109	0,073	0,092	0,066	0,053	0,053	0,103
ΣА	0,404	0,313	0,546	0,331	0,236	0,158	0,121	0,213	0,199	0,118
X _{Mg}	0,67	0,71	0,63	0,71	0,5	0,48	0,52	0,47	0,48	0,48

Химический состав и кристаллохимические формулы биотитов

№ образца	4318/518,6			7523/341,0			7562/396,0	
№ анализа	Bt-7	Bt-9	Bt-12	Bt-3	Bt-5	Bt-10	Bt-8	Bt-9
SiO ₂	33,49	34,91	33,22	34,39	33,66	34,2	36,84	36,26
TiO ₂	2,73	2,68	2,95	4,89	4,31	4,62	2,23	1,78
Al ₂ O ₃	15,32	15,52	14,14	15,24	15,1	15,74	16,38	16,77
FeO	30,25	28,63	28,18	26,75	26,6	27,37	14,41	15,37
MnO	-	0,16	-	-	-	-	0,2	-
MgO	5,51	6,05	5,46	6,48	6,84	7,61	15,51	14,79
CaO	0,17	-	-	-	0,16	-	-	-
Na ₂ O	0,27	0,24	0,26	1,13	-	0,18	0,52	0,41
K ₂ O	8,62	8,89	8,46	9,38	7,96	8,03	9,19	7,93
Сумма	96,36	97,08	92,67	98,26	94,63	97,75	95,28	93,55
Si	2,71	2,79	2,80	2,69	2,76	2,71	2,78	2,81
Ti	0,17	0,16	0,19	0,29	0,27	0,28	0,13	0,10
Al ^{IV}	1,12	1,05	1,01	1,02	0,97	1,01	1,09	1,09
ΣR ^{IV}	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Al ^{VI}	0,35	0,41	0,39	0,39	0,5	0,46	0,37	0,45
Fe	2,05	1,91	1,98	1,75	1,82	1,81	0,91	1,00
Mn	-	0,01	-	-	-	-	0,01	-
Mg	0,66	0,72	0,68	0,76	0,84	0,90	1,75	1,71
ΣR ^{VI}	3,06	3,04	3,05	2,89	3,16	3,16	3,03	3,16
Ca	0,01	-	-	-	0,01	-	-	0,00
Na	0,04	0,04	0,04	0,17	-	0,03	0,08	0,06
K	0,89	0,91	0,91	0,94	0,83	0,81	0,89	0,78
ΣR ^{VIII}	0,94	0,95	0,95	1,11	0,84	0,84	0,97	0,84
OH	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
X _{Mg}	0,25	0,27	0,26	0,30	0,31	0,33	0,65	0,63
Sd	18,11	25,19	21,02	9,86	21,17	16,22	11,52	16,60
East	5,88	9,44	7,27	4,26	9,71	8,05	21,82	28,51
Ann	57,37	47,55	53,29	59,96	47,38	50,62	23,03	20,20
Phl	18,64	17,83	18,42	25,92	21,74	25,11	43,62	34,69

Химический состав и кристаллохимические формулы пироксенов

№ образца	3105/305,3						3105/305,3			7543/352,0	
	Срх-1	Срх-2	Срх-3	Срх-5	Срх-1	Срх-16	Орх-9	Орх-12	Орх-17	Срх-10	Срх-17
SiO ₂	50,19	49,97	52,04	51,46	52,1	52,01	52,3	53,76	51,94	50,72	50,63
TiO ₂	0,55	0,2	0,29	0,18	0,22	0,38	0,21	0,28	0	0	0
Al ₂ O ₃	2,31	1,25	0,85	1,12	0,62	0,99	0,25	2,29	0,28	0,24	0,61
FeO	17,42	19,63	15,85	14,1	13,29	12,37	29,93	25,8	30,15	17,84	18,33
MnO	0,29	0,41	0,43	0,37	0,49	0,32	0,56	0,7	0,89	0,45	0,74
MgO	8,61	7,32	9,4	11,28	12,14	12,33	17,26	14,89	17,19	7,44	7,2
CaO	21,59	21,43	21,96	21,39	21,87	21,03	1,08	1,95	1,13	22,55	22,26
Na ₂ O	0,55	0,21	-	0,32	0,41	0,3	-	0,3	-	-	0,23
K ₂ O	-	-	0,08	-	-	-	-	0,23	-	-	-
Сумма	101,52	100,42	100,91	100,22	101,14	99,9	101,59	100,2	101,58	99,23	99,99
Si	1,91	1,95	1,99	1,95	1,95	1,97	1,99	2,07	1,98	2,00	1,98
Al ^{IV}	0,09	0,05	0,01	0,05	0,03	0,03	0,01		0,01	0,00	0,02
ΣR ^{IV}	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,07	1,99	2,00	2,00
Ti	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-
Al ^{VI}	0,01	0,01	0,03	-	-0,02	0,01	-	0,10	-	0,01	0,01
Fe ³⁺	0,09	0,05	-	0,05	0,09	0,01	-	0,00	0,03	-	0,03
Fe ²⁺	0,47	0,59	0,51	0,39	0,33	0,38	0,95	0,83	0,93	0,59	0,57
Mn	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
Mg	0,49	0,43	0,54	0,64	0,68	0,70	0,98	0,85	0,98	0,44	0,42
Ca	0,88	0,89	0,90	0,87	0,88	0,85	0,04	0,08	0,05	0,95	0,93
Na	0,04	0,02	-	0,02	0,03	0,02	-	0,02	-	-	0,02
K	-	-	-	-	-	-	-	0,01	-	-	-
ΣR ^{VI}	2,01	2,01	2,00	1,99	2,02	1,99	2	1,92	2,02	2,01	2,00
X _{Fe}	0,49	0,59	0,49	0,39	0,34	0,36	0,50	0,50	0,50	0,58	0,59
En	25,28	21,55	27,39	32,44	34,5	35,67	49,11	47,78	48,78	21,94	21,24
Fs	29,17	33,11	26,62	23,35	20,84	20,6	48,68	47,72	48,92	30,27	31,57
Wo	45,55	45,34	45,99	44,21	44,66	43,73	2,21	4,5	2,3	47,79	47,19

Химический состав и кристаллохимические формулы гранатов

№ образца	7523/341,0						
№ анализа	Grt-1	Grt-2	Grt-6	Grt-7	Grt-8	Grt-9	Grt-12
SiO ₂	37,69	38,46	34,88	38,17	36,71	36,09	35,68
TiO ₂	0	0	0,19	0,28	0	0	0
Al ₂ O ₃	20,93	21,41	19,86	21,04	20,8	20,24	20,29
Cr ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0	0,78
FeO	33,19	35,42	31,38	33,97	33,38	31,73	32,81
MnO	1,83	1,97	2,02	1,84	1,61	1,54	1,58
MgO	1,94	1,36	1,77	1,8	2,14	1,83	1,86
CaO	6,07	6,03	6,93	6,43	6,13	6,15	5,99
Na ₂ O	0	0	0	0	0	0	0
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0
Сумма	101,65	104,65	97,03	103,53	100,77	97,58	98,99
Si	2,99	2,98	2,89	2,97	2,93	2,98	2,91
Al ^{IV}	0,01	0,02	0,11	0,03	0,07	0,02	0,09
ΣR^{IV}	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00
Al ^{VI}	1,94	1,93	1,83	1,90	1,89	1,95	1,86
Ti	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00
Fe ³⁺	0,08	0,10	0,24	0,09	0,18	0,08	0,18
ΣR^{VI}	2,02	2,03	2,08	2,01	2,07	2,03	2,04
Fe ²⁺	2,12	2,19	1,93	2,12	2,04	2,10	2,05
Mn	0,12	0,13	0,14	0,12	0,11	0,11	0,11
Mg	0,23	0,16	0,22	0,21	0,25	0,22	0,23
Ca	0,51	0,50	0,62	0,54	0,52	0,54	0,52
ΣR^{VIII}	2,98	2,98	2,91	2,99	2,92	2,97	2,91
X _{Fe}	0,91	0,93	0,91	0,91	0,90	0,91	0,91
grs	16,58	15,97	18,80	17,15	16,34	17,48	16,04
alm	71,64	74,42	68,79	71,81	71,25	71,35	72,02
sps	4,11	4,34	4,86	4,06	3,72	3,61	3,75
prp	7,67	5,27	7,53	6,99	8,69	7,56	7,77

Температурные условия метаморфизма метабазитов Авильской структуры

№ образца	Геотермометр		T °C при 5 кбар
7523/341	Grt (1)	Bt (3)	670
		Bt (5)	657
		Bt (10)	641
	Grt (2)	Bt (3)	588
		Bt (5)	577
		Bt (10)	565
	Grt (6)	Bt (3)	681
		Bt (5)	677
		Bt (10)	651
	Grt (7)	Bt (3)	650
		Bt (5)	637
		Bt (10)	622
	Grt (8)	Bt (3)	703
		Bt (5)	688
		Bt (10)	671
	Grt (9)	Bt (3)	668
		Bt (5)	655
		Bt (10)	639
	Grt (12)	Bt (3)	674
		Bt (5)	661
		Bt (10)	645

Примечание: в скобках – номера точек анализов на рис. 4а

Приложение 7

Составы метабазитов Тим-Ястребовской и Авильской структур

№ образца	3105/ 305,3	3105/ 315,6	3105/ 438,3	3119/ 186,8	3119/ 212,5	3121/ 253,5	3127/ 220,0	3132/ 285,0	3132/ 334,8
SiO ₂	49,3	49,4	41,9	46,7	53,6	48,5	52,4	53,5	46,0
TiO ₂	1,85	1,82	3,45	3,09	0,63	1,41	1,62	2,38	3,24
Al ₂ O ₃	13,7	14,2	8,64	13,0	18,6	13,6	12,9	10,8	13,5
FeOt	14,9	14,1	24,8	17,8	8,38	16,8	14,9	15,5	16,2
MnO	0,21	0,22	0,27	0,23	0,08	0,23	0,16	0,12	0,15
MgO	6,46	6,13	7,54	5,34	6,53	6,04	6,57	3,84	5,63
CaO	9,07	9,59	9,18	10,20	6,09	9,87	5,88	9,39	8,23
Na ₂ O	2,98	3,13	1,73	1,93	0,39	2,35	2,05	2,50	1,96
K ₂ O	0,41	0,38	0,53	0,18	3,67	0,28	1,77	0,23	0,56
P ₂ O ₅	0,20	0,19	0,35	0,36	0,06	0,15	0,19	0,49	0,35
S _{общ}	0,10	0,05	0,83	0,07	0,15	0,03	<0,02	<0,02	0,37
ППП	0,62	0,64	0,33	0,65	1,52	0,64	1,27	0,97	1,46
сумма	99,78	99,79	99,58	99,83	99,75	99,81	99,61	99,75	97,68
Na ₂ O/K ₂ O	7,27	8,24	3,26	10,72	0,11	8,39	1,16	10,87	3,50
ASI	0,64	0,70	0,27	0,56	1,41	0,59	0,60	0,56	0,62
X _{Fe}	0,70	0,70	0,77	0,77	0,60	0,74	0,69	0,80	0,74

Продолжение приложения 7

№ образца	3132/ 362,4	3669/ 312,0	4051/ 248,2	4052/ 327,9	4312/ 419,4	4312/ 500,4	4318/ 518,6	7563/ 343,0	7563/ 363,6
SiO ₂	46,4	45,7	48,6	41,5	46,2	52,9	56,9	49,2	48,3
TiO ₂	3,07	1,07	3,52	1,52	1,52	1,7	2,34	1,3	1,5
Al ₂ O ₃	12,1	14,4	11,6	9,39	18,1	16,1	11,2	14,3	14,3
FeOt	17,4	15,9	14,7	16,8	12,9	12,5	14,1	14,9	16,0
MnO	0,17	0,22	0,13	0,21	0,22	0,12	0,26	0,26	0,25
MgO	6,09	8,71	6,47	15,5	7,97	3,71	3,17	6,0	5,6
CaO	9,83	11,0	10,5	11,0	6,37	5,75	5,72	8,9	9,1
Na ₂ O	2,89	1,40	4,24	1,05	3,13	3,38	3,2	2,9	2,8
K ₂ O	1,18	0,52	0,18	0,17	0,67	2,45	1,72	0,94	0,74
P ₂ O ₅	0,32	0,10	0,22	0,20	0,20	0,55	0,65	0,18	0,18
S _{общ}	<0,02	0,02	0,03	0,06	0,01	0,02	0,02	0,11	0,13
ППП	0,21	0,80	0,39	2,13	2,45	0,37	0,12	0,83	0,77
сумма	99,68	99,80	100,58	99,55	99,70	99,59	99,36	99,8	99,8
Na ₂ O/K ₂ O	2,45	2,69	23,56	6,18	4,67	1,38	1,86	3,02	3,82
ASI	0,51	0,59	0,55	0,29	0,87	1,00	0,65	0,68	0,66
X _{Fe}	0,74	0,65	0,69	0,52	0,62	0,77	0,82	0,71	0,74

Окончание приложения 7

№ образца	7563/ 481,0	7562/ 345,0	7562/ 386,0	7562/ 430,0	7543/ 229,0	7543/ 281,0	7543/ 329,0	7543/ 348,0
SiO ₂	51,2	53,8	50,9	50,9	48,9	49,2	51,9	48,4
TiO ₂	1,4	0,53	0,92	0,99	1,8	1,7	1,4	1,4
Al ₂ O ₃	13,9	12,6	14,1	13,7	13,8	13,4	12,7	13,2
FeOt	14,6	8,6	11,8	13,6	14,7	14,4	13,7	14,2
MnO	0,22	0,14	0,18	0,19	0,21	0,19	0,19	0,21
MgO	5,5	11,6	6,8	6,7	6,0	6,7	6,0	6,8
CaO	8,0	7,5	10,9	10,0	10,1	10,0	10,0	11,7
Na ₂ O	2,9	2,7	1,7	2,5	2,8	2,6	2,7	2,5
K ₂ O	1,2	1,3	1,4	0,20	0,50	0,64	0,27	0,36
P ₂ O ₅	0,16	0,18	0,14	0,10	0,14	0,16	0,12	0,11
S _{общ}	0,06	0,01	0,16	0,07	0,03	0,06	0,05	0,06
ППП	1,32	1,11	1,45	0,78	0,56	0,64	0,98	1,27
сумма	100,3	100,1	100,5	99,8	99,6	99,6	100,0	100,3
Na ₂ O/K ₂ O	2,47	2,06	1,23	12,68	5,72	4,13	9,86	6,81
ASI	0,69	0,62	0,76	0,68	0,66	0,63	0,64	0,63
X _{Fe}	0,73	0,42	0,64	0,67	0,71	0,68	0,70	0,68

Содержание редких и редкоземельных элементов в метаботитах Тим-Ястребовской и Авильской структур

№ образца	3105/ 305.3	3105/ 315.6	3105/ 438.3	3119/ 186.8	3119/ 212.5	3127/ 220	3132/ 285	3132/ 334.8
Li	9,35	25,5	3,96	28,7	15,8	29,9	113	14,9
Be	0,89	1,20	0,73	3,50	1,02	0,86	2,96	0,92
Sc	36,7	38,1	27,4	24,2	38,2	29,4	22,5	34,7
V	300	158	517	60,3	269	272	114	337
Cr	84,6	129	28,8	10,6	121	164	122	480
Co	50,7	53,1	63,0	23,0	45,8	47,7	22,0	96,3
Ni	55,5	126	75,1	2,19	116	83,3	75,4	602
Cu	52,5	72,9	124	11,7	36,2	55,8	37,5	403
Zn	94,9	81,8	112	142	97,9	133	149	89,2
Ga	20,8	17,3	19,2	22,3	17,4	20,9	26,0	20,7
Rb	0,84	58,3	2,00	55,9	6,30	81,7	223	14,9
Sr	214	226	758	354	272	218	92,3	130
Y	35,1	26,0	14,1	84,5	24,8	25,4	13,1	24,0
Zr	174	108	15,2	565	131	43,1	118	192
Nb	21,0	11,3	11,3	76,4	15,1	15,5	12,2	57,2
Mo	0,96	0,57	0,63	2,16	0,97	0,44	4,51	1,76
Cs	0,02	3,35	0,06	5,21	0,40	1,97	63,1	1,31
Ba	17,5	878	107	457	225	304	723	207
La	16,3	12,5	33,5	15,8	44,1	13,0	41,1	31,5
Ce	37,1	28,2	78,9	42,9	87,6	30,5	77,0	73,3
Pr	4,74	3,79	10,1	5,65	9,36	4,03	9,38	9,20
Nd	21,3	16,9	44,6	26,1	33,3	18,2	38,4	39,2
Sm	5,15	4,57	9,44	6,70	5,61	4,70	7,89	8,57
Eu	1,70	1,45	2,88	2,13	1,38	1,56	2,31	2,51
Gd	5,63	5,34	8,57	7,47	4,14	5,26	7,98	7,91
Tb	0,89	0,84	1,23	1,20	0,59	0,86	1,15	1,17
Dy	5,33	4,88	5,89	7,01	2,93	5,14	6,23	6,00
Ho	1,08	1,00	1,00	1,42	0,54	1,06	1,20	1,11
Er	3,10	2,97	2,42	4,16	1,42	3,08	3,27	2,95
Tm	0,42	0,40	0,28	0,56	0,20	0,42	0,40	0,37
Yb	2,72	2,66	1,76	3,76	1,24	2,72	2,59	2,28
Lu	0,40	0,38	0,23	0,56	0,19	0,40	0,34	0,31
Hf	4,70	2,98	0,82	12,0	3,56	1,00	3,28	5,05
Ta	1,46	0,74	0,94	5,58	0,98	1,14	1,56	4,36
W	0,44	0,62	1,40	0,61	0,74	0,50	0,44	0,98
Tl	0,01	0,47	0,01	0,16	0,05	0,20	2,12	0,16
Pb	1,60	4,48	2,17	4,66	8,50	2,90	12,8	3,52
Bi	0,01	0,04	0,02	0,04	0,12	< ПО	0,22	0,82
Th	1,60	1,88	0,78	7,22	1,30	1,48	15,7	1,77
U	0,40	0,75	0,13	1,67	0,38	0,26	2,58	0,50
∑REE	105,8	85,9	200,9	125,4	192,7	90,9	199,2	186,3
Eu/Eu*	0,97	0,90	0,98	0,92	0,88	0,96	0,89	0,93
(Gd/Yb) _n	1,71	1,66	4,04	1,64	2,75	1,60	2,55	2,87
(La/Yb) _n	4,29	3,38	13,7	3,01	25,5	3,43	11,4	9,91
(La/Sm) _n	2,04	1,77	2,30	1,52	5,08	1,79	3,36	2,37
(Sm/Yb) _n	2,10	1,90	5,97	1,98	5,01	1,92	3,38	4,18

Продолжение приложения 8

№ образца	3132/ 362.4	3669/ 312.0	4051/ 248.2	4052/ 327.9	4312/ 419.4	4312/ 500.4	4318/ 518,6	7563/ 343	7563/ 363,6
Li	9,7	13,0	25,5	57,6	7,52	6,00	10,3	39,0	27,6
Be	0,49	2,21	0,88	1,61	0,99	0,41	2,59	1,13	1,40
Sc	40,1	24,7	23,3	31,8	37,5	50,1	27,5	33,9	38,5
V	273	399	202	433	243	277	294	290	338
Cr	311	316	977	420	123	63,9	260	158	122
Co	64,1	51,7	99,3	68,7	47,7	54,5	45,8	52,8	59,8
Ni	148	225	687	226	99,9	53,0	159	94,3	81,1
Cu	10,2	129	196	181	99,3	30,0	63,3	63,1	112
Zn	124	110	120	229	99,0	82,2	123	105	117
Ga	14,7	22,3	16,2	36,7	18,2	18,9	24,8	16,4	17,5
Rb	9,4	23,2	1,80	216	7,72	1,79	21,7	31,7	24,8
Sr	155	466	47,4	428	214	224	453	328	192
Y	14,8	25,2	14,1	33,5	26,7	33,5	29,9	25,8	30
Zr	41,8	214	89,0	20,7	119	94,7	195	95,6	106
Nb	7,48	39,1	12,9	44,0	18,2	6,21	37,5	13,7	16,6
Mo	0,32	1,98	14,9	1,32	0,99	1,09	0,94	0,50	0,77
Cs	0,39	0,61	0,28	9,10	0,96	0,03	0,42	11,4	2,61
Ba	106	399	7,95	699	293	54,5	408	294	353
La	22,0	5,46	9,19	10,9	15,2	16,5	62,1	23,5	13,9
Ce	61,7	13,8	25,3	27,8	36,7	39,6	142	45,4	34,4
Pr	8,30	1,89	3,73	3,91	4,54	5,04	17,6	4,93	4,41
Nd	37,6	8,42	17,6	18,4	19,1	21,3	73,3	19,8	19,6
Sm	8,75	2,29	4,42	4,43	4,30	4,79	16,1	4,07	4,79
Eu	2,72	0,75	1,74	1,62	1,40	1,61	4,12	1,30	1,44
Gd	8,30	2,74	4,38	4,32	4,79	5,25	17,0	4,65	5,50
Tb	1,21	0,44	0,63	0,61	0,74	0,80	2,62	0,71	0,86
Dy	6,55	2,74	3,15	3,25	4,42	4,76	14,9	4,40	5,29
Ho	1,19	0,59	0,57	0,61	0,89	0,94	2,96	0,88	1,07
Er	3,13	1,68	1,40	1,64	2,60	2,73	8,48	2,70	3,23
Tm	0,38	0,24	0,17	0,20	0,36	0,39	1,16	0,37	0,43
Yb	2,32	1,56	0,99	1,28	2,26	2,45	7,46	2,57	2,94
Lu	0,32	0,24	0,13	0,18	0,34	0,37	1,13	0,38	0,42
Hf	1,26	5,65	2,31	1,07	3,27	2,77	5,11	2,71	3,05
Ta	0,66	2,61	0,85	3,52	1,18	0,39	2,40	0,89	1,08
W	0,18	0,78	1,06	0,62	0,80	0,23	0,44	1,31	0,68
Tl	0,02	0,11	0,01	0,48	0,08	0,01	0,06	0,38	0,17
Pb	9,87	4,98	0,94	4,05	5,93	2,37	3,43	5,86	4,95
Bi	0,02	0,02	0,23	0,04	0,05	0,04	0,02	0,04	0,03
Th	0,47	2,83	1,06	3,39	1,25	0,71	2,95	2,26	2,94
U	0,12	0,73	0,27	0,59	0,53	0,18	0,48	0,54	0,67
∑REE	164,5	42,8	73,3	79,2	97,7	106,5	371,0	115,8	98,4
Eu/Eu*	0,97	0,92	1,21	1,13	0,94	0,98	0,76	0,91	0,86
(Gd/Yb) _n	2,96	1,45	3,67	2,78	1,75	1,77	1,89	1,50	1,55
(La/Yb) _n	6,80	2,51	6,67	6,10	4,83	4,82	5,98	6,58	3,41
(La/Sm) _n	1,62	1,54	1,34	1,59	2,29	2,22	2,49	3,74	1,88
(Sm/Yb) _n	4,18	1,62	4,97	3,83	2,11	2,17	2,40	1,76	1,81

№ образца	7563/ 481	7562/ 345	7562/ 386	7562/ 430	7543/ 229	7543/ 281	7543/ 329	7543/ 348
Li	30,2	13,8	7,21	6,96	9,80	12,8	8,45	9,10
Be	1,16	1,35	0,72	0,76	1,36	1,08	1,04	0,90
Sc	35,2	26,7	31,7	40,2	37,3	36,2	40,2	39,8
V	305	185	221	267	351	335	303	304
Cr	127	1012	262	84,8	112	109	140	138
Co	54,7	50,1	51,5	59,4	54,8	53,4	56,8	59,9
Ni	82,6	320	108	86,1	79,5	87,1	94,6	110
Cu	46,3	8,37	24,6	88,3	62,9	60,8	68,2	88,5
Zn	112	72,7	78,2	91,9	108	104	101	96,9
Ga	16,5	15,2	13,5	16,9	18,5	18,3	18,2	16,5
Rb	42,1	40,7	46,6	0,75	11,8	18,3	4,14	6,72
Sr	154	469	107	103	245	220	208	194
Y	26,9	15,5	19,9	21,9	28,1	26,5	25,7	22,0
Zr	101	99,6	60,1	71,2	97,1	30,9	51,7	20,3
Nb	15,4	5,35	11,0	6,73	13,3	13,3	11,1	9,15
Mo	0,50	0,44	0,69	0,39	0,56	0,44	0,40	0,34
Cs	4,99	1,71	1,97	0,03	0,80	1,42	0,26	0,48
Ba	459	920	539	22,7	123	156	80,1	100
La	14,5	31,1	19,4	13,0	25,6	12,2	8,18	9,61
Ce	32,9	63,3	35,9	26,8	51,9	29,5	21,9	22,2
Pr	4,09	7,00	3,79	3,11	5,94	3,88	3,05	2,95
Nd	17,3	27,0	14,4	12,9	25,5	18,3	14,5	13,7
Sm	4,10	4,81	2,92	2,97	5,14	4,48	3,87	3,49
Eu	1,19	1,25	0,94	0,98	1,53	1,57	1,32	1,19
Gd	4,76	4,09	3,40	3,65	5,65	5,34	4,68	4,16
Tb	0,74	0,53	0,53	0,59	0,83	0,82	0,75	0,65
Dy	4,56	2,82	3,38	3,79	5,05	4,84	4,72	3,95
Ho	0,95	0,54	0,69	0,78	1,00	0,96	0,95	0,79
Er	2,85	1,55	2,07	2,36	2,94	2,79	2,79	2,36
Tm	0,39	0,21	0,29	0,33	0,39	0,38	0,38	0,32
Yb	2,70	1,36	2,04	2,27	2,68	2,52	2,56	2,15
Lu	0,38	0,20	0,30	0,33	0,38	0,36	0,37	0,30
Hf	2,85	2,70	1,70	2,10	2,86	1,32	1,86	0,99
Ta	0,94	0,32	0,61	0,46	0,91	0,84	0,80	0,62
W	0,63	0,13	0,64	0,33	0,21	2,31	0,33	0,34
Tl	0,25	0,32	0,10	< ПО	0,03	0,04	0,01	0,02
Pb	4,51	8,32	2,06	2,83	1,55	1,18	1,60	1,47
Bi	0,02	0,04	0,02	0,03	< ПО	< ПО	0,02	0,02
Th	2,68	6,93	1,90	1,84	1,45	1,20	1,09	0,89
U	0,61	1,91	0,62	0,42	0,34	0,29	0,28	0,20
∑REE	91,4	145,8	90,0	73,8	134,5	88,0	70,0	67,8
Eu/Eu*	0,83	0,86	0,91	0,91	0,87	0,98	0,95	0,96
(Gd/Yb) _n	1,46	2,49	1,38	1,33	1,75	1,75	1,51	1,60
(La/Yb) _n	3,86	16,4	6,84	4,12	6,87	3,48	2,29	3,21
(La/Sm) _n	2,29	4,18	4,30	2,83	3,22	1,76	1,36	1,78
(Sm/Yb) _n	1,69	3,93	1,59	1,45	2,14	1,97	1,68	1,80