

ВОЗРАСТ ЗОНАЛЬНОГО МЕТАМОРФИЗМА ПОРОД ВОРОНЦОВСКОЙ СЕРИИ ПО ДАННЫМ ДАТИРОВАНИЯ МОНАЦИТОВ МЕТОДОМ СИМЕ И ЭВОЛЮЦИЯ КОРЫ ВОСТОКА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ

К. А. Савко, В. В. Хиллер *, Н. С. Базиков, С. Л. Вотяков *

Воронежский государственный университет

**Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург*

Поступила в редакцию 27 февраля 2012 г.

Аннотация. По данным Th-U-Pb микрозондового датирования монацитов из палеопротерозойских метатерригенных пород воронцовской серии, занимающих огромную площадь между Сарматией и Волгоуралией, возраст зонального метаморфизма составляет для ставролитовой зоны: 2039 ± 26 млн лет, для мусковит-силлиманитовой – 2015 ± 14 млн лет, для силлиманит-калишпат-кордиеритовой – 2004 ± 19 млн лет. Эти результаты вместе с литературными данными дают основания пересмотреть эволюцию геологических событий в зоне сочленения Сарматии и Волгоуралии и предложить последовательность корообразующих процессов, зафиксированную в присутствующих здесь породных комплексах в палеопротерозое: 1 – накопление мощных толщ терригенных осадков воронцовской серии в интервале 2200–2100 млн лет; 2 – внедрение магматических масс основного и ультраосновного состава в неметаморфизованные породы воронцовской серии в период 2090–2060 млрд лет; 3 – внедрение гранитов S-типа комплекса на рубеже 2020 млн лет; 4 – высокотемпературный низкотемпературный зональный метаморфизм пород воронцовской серии 2004–2015 млн лет на завершающих стадиях коллизии; 5 – внедрение монцогранитов на востоке ВКМ около 1984 млн лет по завершении метаморфизма в постколлизивной обстановке внутриконтинентального растяжения.

Ключевые слова: химическое датирование, монацит, геодинамическая эволюция.

Abstract. According to the Th-U-Pb dating of monazites from paleoproterozoic metaterrigenous Vorontsovskaya series rocks, which occupy a huge area between Sarmatia and Volgouralia, the ages of zonal metamorphism are: 2039 ± 26 Ma for the staurolite zone, 2015 ± 14 Ma for the muscovite-sillimanite zone, 2004 ± 19 Ma for the sillimanite-potassium feldspar-cordierite zone. These results along with the literature data allow to have a different point of view at the geological events evolution at the shear zone of Sarmatia and Volgouralia and to propose the sequence of crust-forming processes, which sequence is preserved in the paleoproterozoic rock complexes presented here: 1 – the deposition of the thick layers of Vorontsovskaya series terrigenous sediments at the 2200–2100 Ma; 2 – the intrusion of mafic and ultramafic magmatic masses into the unmetamorphosed Vorontsovskaya series rocks at the 2090–2060 Ma; 3 – S-type complex granites intrusion at the 2020 Ma; 4 – high-temperature low-pressure zonal metamorphism of Vorontsovskaya series rocks at the final collision stages (2004–2015 Ma); 5 – the monzongranites intrusion at the east of VCM (ca. 1984 Ma) after the metamorphism in the post-collision settings of intracontinental stretching

Key words: chemical dating, monazite, geodynamical evolution

Введение

Исследование парагенезисов акцессорных, прежде всего, редкоземельных (REE) минералов при метаморфизме началось совсем недавно, причем интерес к ним обусловлен быстро развивающимися методами химического *in situ* (СИМЕ) и локального изотопного (SHRIMP) датирования метаморфических событий по монациту и другим редкоземельным минералам, которые могут содер-

жать в определенных количествах Th и U. Как широко распространенный акцессорный минерал метаморфических пород монацит является наиболее часто используемым минералом-геохронометром для датирования процессов метаморфизма, так как он характеризуется переменным составом, чутко реагирующим на изменение интенсивных и экстенсивных параметров. В монаците сохраняется геохронологическая информация о его кристаллизации или росте в результате метаморфических реакций с другими акцессорными редкоземельными и породообразующими минералами. Поэтому

© Савко К. А., Хиллер В. В., Базиков Н. С., Вотяков С. Л., 2012

он является идеальным геохронологическим сенсором метаморфических событий.

В 1990-х годах был разработан метод химического электронно-зондового датирования U-Th-содержащих минералов [1], популярность которого продолжает расти. Большое число публикаций посвящено применению этого метода для определения возраста этих минералов из различных геологических объектов [2–8 и многие другие]. Техника электронно-зондового анализа постоянно совершенствуется и уже сейчас позволяет измерение количеств Th, U и Pb в монаците с точностью, обеспечивающей получение прецизионных оценок возраста его кристаллизации [9, 10].

Геологическая ситуация и постановка задачи

Объектом настоящего исследования являются палеопротерозойские метатерригенные породы воронцовской серии, занимающие огромную пло-

щадь между двумя докембрийскими коровыми сегментами Восточно-Европейской платформы – Сарматией и Волгоуралией. Восточно-Воронежская провинция отделяет Сарматский сегмент докембрийской коры от Волго-Уральского сегмента Восточно-Европейской платформы. Площадь ее распространения составляет более 100000 км² при ширине до 300 км и длине свыше 600 км (рис. 1). С запада Восточно-Воронежская провинция ограничена Лосевско-Мамонским глубинным разломом, отделяющим ее от Липецко-Лосевского вулканогенного пояса, с юга – Варваринским выступом архейского фундамента (рис. 2). На востоке Балашовский блок, сложенный породами воронцовской серии, граничит с палеопротерозойскими структурами Волгоуралии – Терсинским поясом метаморфизованных вулканитов и Южноволжским супракrustальным комплексом [11].

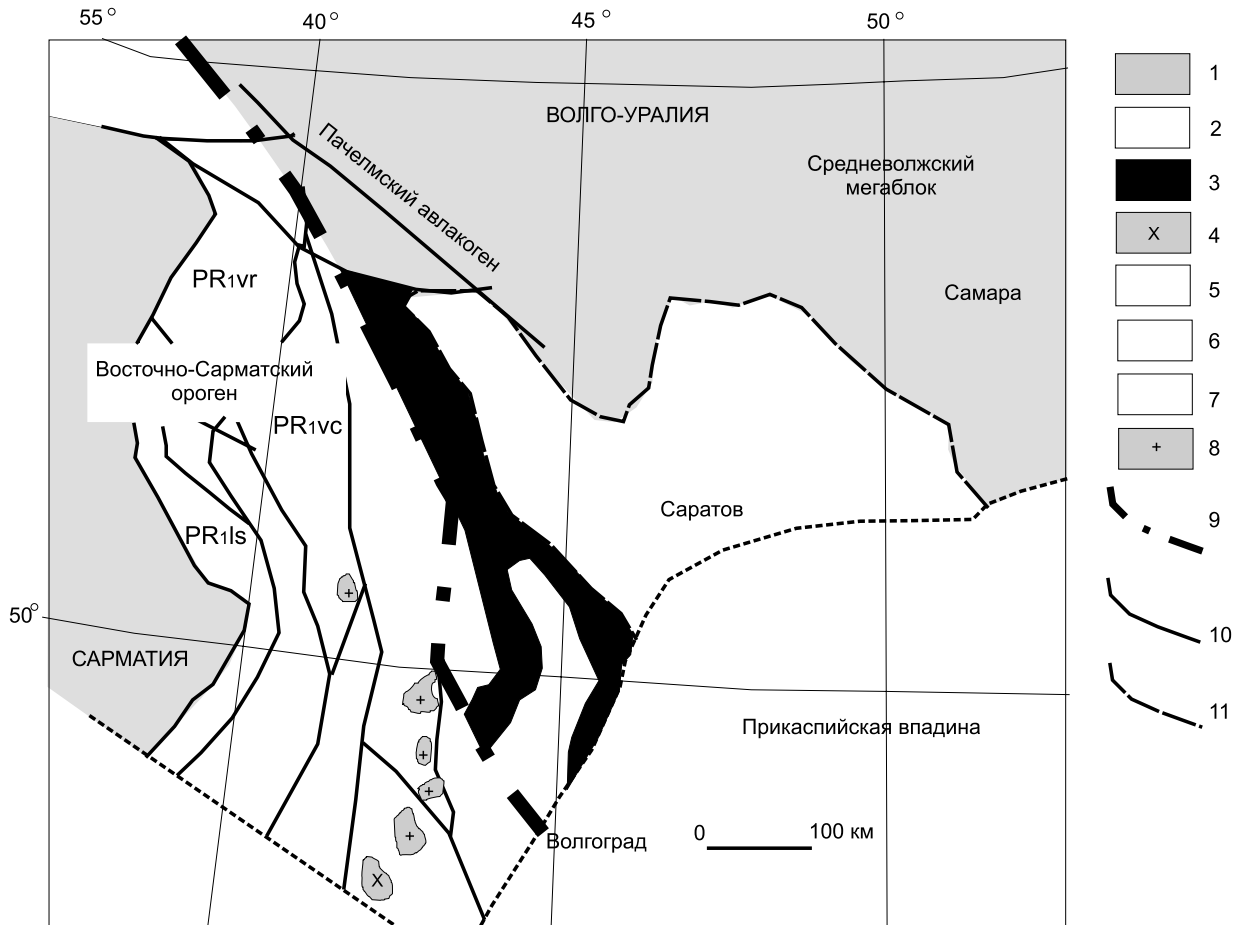


Рис. 1. Схематическая карта зоны сочленения Сарматии и Волго-Уралии (по [11], с изменениями): 1 – архейская кора; 2–8 – палеопротерозойские структурно-вещественные комплексы: 2 – южноволжский комплекс глиноземистых гнейсов, включая рахмановский комплекс анатектических гранитов, 3 – терсинский комплекс, 4 – гранитоиды Терсинского пояса, 5 – воронежская свита, лосевский и усманский комплексы нерасчлененные, 6 – донская серия гнейсов и павловский гранитоидный комплекс, 7 – воронцовская серия, 8 – бобровский комплекс гранитоидов; 9 – предполагаемая сутура (?) Сарматии и Волго-Уралии; 10 – главные зоны разломов; 11 – границы структурно-вещественных комплексов

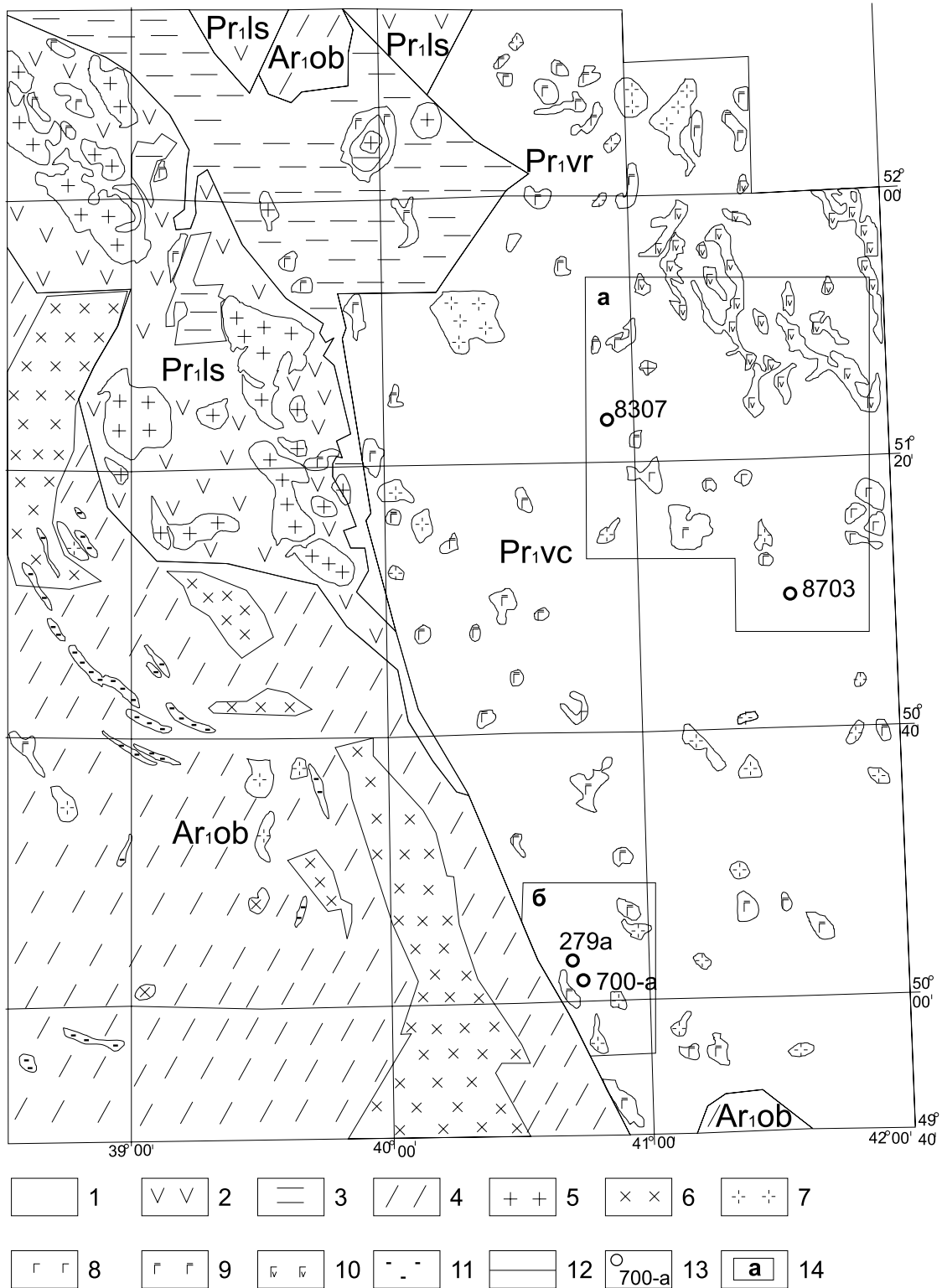


Рис. 2. Схематическая карта востока Воронежского кристаллического массива: 1 – метапесчаниково-сланцевые отложения воронцовской серии; 2 – вулканогенные породы лосевской серии; 3 – вулканомиктовые песчаники воронежской свиты; 4 – серые гнейсы (TTG) Россошанского блока и Варваринского выступа; 5 – гранитоиды усманского комплекса; 6 – граниты-мигматиты павловского комплекса; 7 – гранитоиды бобровского комплекса; 8 – нориты еланьского комплекса; 9 – основные и ультраосновные интрузии мамонского комплекса; 10 – габброиды новогольского комплекса; 11 – тела железистых кварцитов; 12 – геологические границы; 13 – местоположения скважин и их номера; 14 – площади картирования метаморфической зональности: а – Елань-Эртильская площадь, б – Мамонско-Подколдновская площадь

Мощность отложений по сейсмическим данным изменяется от 2–3 км в юго-западной части до 6–8 км в районе Новохоперского глубинного разлома. Литологически эта серия весьма однородна и представляет собой толщу метаморфизованных песчаниково-сланцевых флишоидных отложений. Нами в породах воронцовской серии не установлены вулканогенные образования. Несмотря на частые упоминания, что в ее разрезах до 10 % приходится на эффузивно-осадочные отложения [12, 13 и др.], нам не удалось найти петрографического и петрохимического описания таких пород, как в литературных источниках, так и в отчетах геологических производственных организаций. Скорее всего, за вулканогенные образования принимаются первично осадочные известково-силикатные породы [14], обогащенные кальцием и железом и обедненные алюминием, встречающиеся в виде прослоев мощностью от 0,2 до 1,0 м. Отсутствие вулканитов в разрезах воронцовской серии не позволяет получить оценки возраста ее формирования по магматическим цирконам.

Мощные толщи метаосадков воронцовской серии прорваны многочисленными интрузиями палеопротерозойского возраста: дифференцированными массивами дунит-перидотит-габброноритовой формации мамонского (2080 ± 20 млн лет [15]) и пироксенит-норит-диоритовой формации еланского комплексов (2060 ± 20 млн лет [15]), гранитоидами бобровского комплекса (2022 ± 8 млн лет [11]), габбро-долеритами трапповой формации новогольского комплексов (1805 ± 14 млн лет [16]) и дайками сиенитов артюшкинского комплекса.

Зональный метаморфизм пород Восточно-Воронежской провинции на отдельных участках изучен весьма детально: в пределах Елань-Эртильской (центральная часть структуры) и Мамонско-Подколдновской (юго-западная часть структуры) площадей [17–20]. Исходя из этого, на рассмотрении зонального метаморфизма в этой работе мы останавливаться не будем, только кратко охарактеризуем термодинамические режимы. В пределах Елань-Эртильской площади были закартированы гранатовая (430–480 °С), ставролитовая (490–520 °С), ставролит-силлиманитовая (520–560 °С) и мусковит-силлиманитовая зоны (560–600 °С) (рис. 3а). Условия наиболее высокотемпературной силлиманит-калишпат-кордиеритовой зоны здесь достигнуты не были. В пределах Мамонско-Подколдновской площади не установлены наиболее низкотемпературные метапелиты гранатовой зоны, но присутствуют самые высокометаморфизованные породы воронцовской серии – гра-

нат-силлиманит-кордиеритовые гнейсы (600–750 °С) (рис. 3б). Давления при метаморфизме изменяются от 3 кбар в гранатовой зоне до 5 кбар в силлиманит-калишпат-кордиеритовой.

U-Pb конкордантный изотопный возраст метаморфизма, определенный по монофракции циркона из кристаллических сланцев мусковит-силлиманитовой зоны, составляет 2104 ± 4 млн лет [11]. Таким образом, по этим данным процессы метаморфизма в воронцовской структуре предшествовали активному коллизионному магматизму и складчатости, что противоречит известным геодинамическим моделям развития докембрийских складчатых областей.

Для решения этой проблемы нами была предпринята попытка оценить возраст метаморфизма пород воронцовской серии по монациту. Монацит впервые появляется в верхах зеленосланцевой фации, и его интервал стабильности расширяется с увеличением температуры, включая гранулитовую фацию. Многочисленные реакционные структуры предполагают, что он образуется в гранатовой зоне при реакции бастнезита с апатитом и за счет частичного разложения REE содержащего хлорита [21]. В гранатовой и ставролитовой зонах монацит появляется за счет реакции алланита с апатитом и частичного распада REE содержащего апатита [21].

Предлагаемая работа является логическим продолжением изучения фазовых равновесий монацита и других REE минералов при метаморфизме метапелитов воронцовской серии, геохимии терригенных пород и гранитоидов востока Воронежского кристаллического массива (ВКМ) [21–23]. Цель настоящей статьи – оценить возраст метаморфизма пород воронцовской серии с помощью химического микрозондового Th-U-Pb датирования акцессорных монацитов из разных зон метаморфизма и интерпретировать полученные результаты в контексте геодинамической эволюции восточной окраины Сарматии в палеопротерозое.

Методика исследований

Все изученные образцы представляют собой керн скважин, детально описанный при проведении полевых работ. Из них были изготовлены прозрачно-полированные шлифы, изученные сначала оптически, а затем на растровом электронном микроскопе Jeol 6380 LV с энерго-дисперсионным анализатором INCA 250 (ВГУ). Для датирования метаморфизма Th-U-Pb методом на микрозонде Cameca SX 100 (ИГГ УРО РАН) нами были выбраны наиболее крупные зерна монацитов из образцов метапелитов разных зон метаморфизма: ставроли-

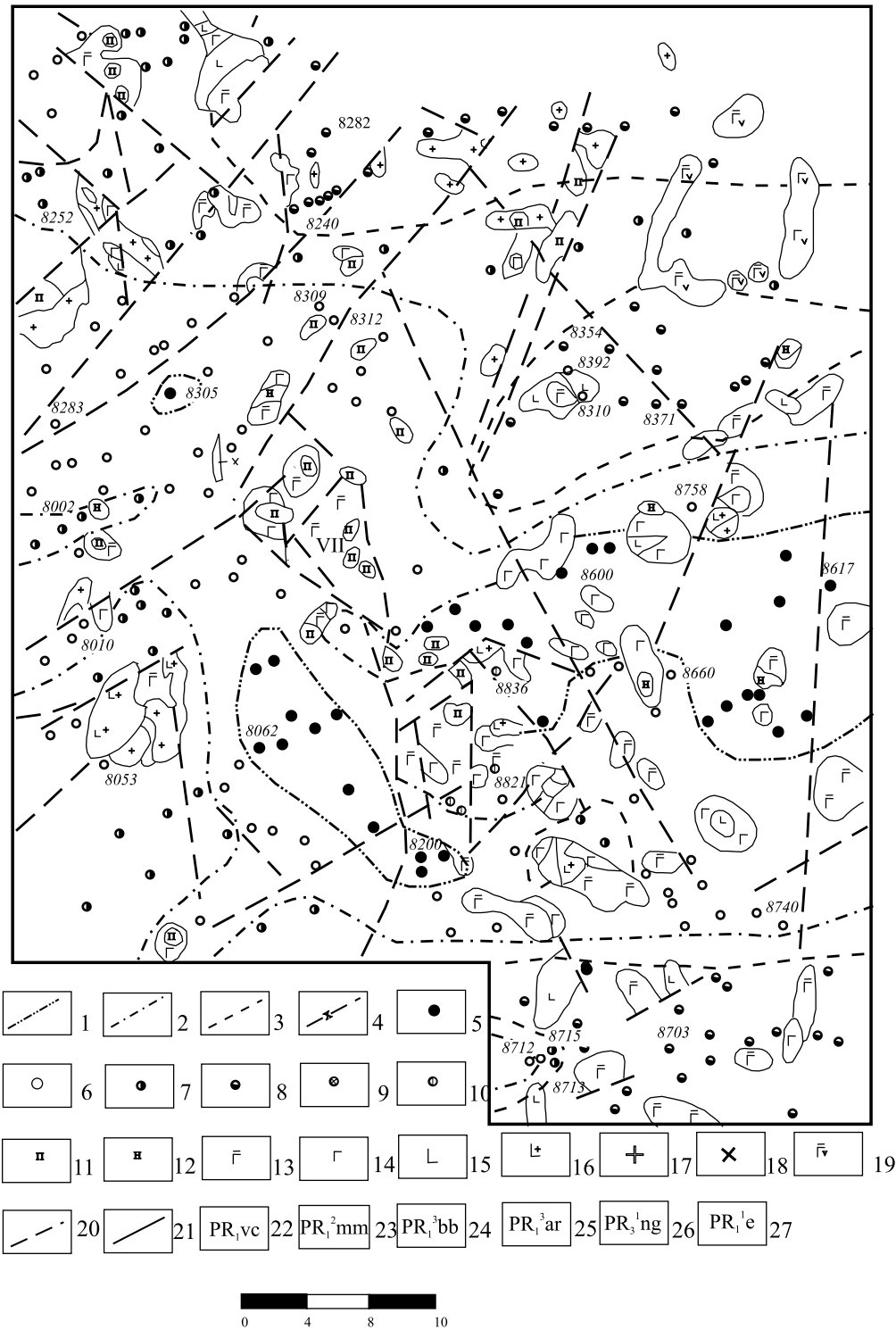


Рис. 3а. Карта метаморфической зональности воронцовской серии: в пределах Елань-Эртильской площади.

Изограды: 1 – ставролитовая, 2 – ставролит-силлиманитовая, 3 – силлиманитовая, 4 – силлиманит-калишпат-кордиеритовая. Точки отбора образцов, содержащих парагенезисы: 5 – гранатовой зоны, 6 – ставролитовой зоны, 7 – ставролит-силлиманитовой зоны, 8 – мусковит-силлиманитовой зоны, 9 – силлиманит-калишпат-кордиеритовой зоны, 10 – ксенолитов метapelитов в магматических породах. Интрузивные породы: мамонский комплекс: 11 – перидотиты, 12 – пироксениты, 13 – габбронориты; еланский комплекс: 14 – нориты, 15 – диориты; бобровский комплекс: 16 – гранодиориты, кварцевые диориты, 17 – граниты; артюшкинский комплекс: 18 – сиениты; новогольский комплекс: 19 – габбродолериты; 20 – разрывные нарушения; 21 – геологические границы. Индексы: 22 – воронцовской серии, 23 – мамонского комплекса, 24 – бобровского комплекса, 25 – артюшкинского комплекса, 26 – новогольского комплекса, 27 – еланского комплекса



Рис. 36. Карта метаморфической зональности воронцовской серии в пределах Мамонско-Подколдновской площади

товая зона (ставролитовый сланец: скв. 8307, гл. 358 м), мусковит-силлиманитовая зона (гранат-силлиманит-биотит-мусковитовый гнейс: скв. 8703 гл. 322 м), силлиманит-калишпат-кордиеритовая зона (гранат-кордиеритовые гнейсы: скв. 700а гл. 599 м; скв. 279а гл. 470,9 м). Местоположение скважин показано на рис. 2.

Поиск и идентификация зерен монацита в шлифах проводились по их BSE-изображениям и энергодисперсионным спектрам; элементное картирование зерен – на основе измерения интенсивности пика и фона. Пределы обнаружения ThO₂, UO₂ и PbO в монаците составляют 130, 60 и 53 ppm, соответственно (микронзонд Cameca SX 100, пять волновых спектрометров, стабилизированный температурный режим работы 20 ± 1 °C). Съемка проводилась при ускоряющем напряжении 15 кВ, ток пучка 240 нА. Время измерения интенсивности на пике для Th, U и Pb составляло по 400 с, для остальных элементов 10 с, на фоне – в два раза меньше. Общее время анализа одной точки – 15 мин, что оптимизировало условия эксперимента по величине отношения сигнал/шум и степени радиационного «выгорания» пробы под электронным пучком. Для каждого из анализируемых элементов подбирались параметры детектора и последовательность проведения измерений; при этом погрешности определения элементов составляли ΔTh/Th = 3,12–3,16, ΔU/U = 1,92–9,52, и ΔPb/Pb = 1,90–2,71 отн. %. Детальное описание методики анализа приведено в работе [8].

Расчет возраста монацитов проводился с использованием оригинальной [8] и модифицирован-

ной программы Isoplot 3.66 [24] в рамках двух альтернативных подходов: по единичным определениям содержаний U, Th, Pb в точке зерна минерала [2] из Th/Pb-U/Pb – псевдоизохроны [4].

Результаты химического Th-U-Pb датирования монацитов

Ставролитовая зона

Наиболее низкотемпературные монациты были изучены из сланцев ставролитовой зоны метаморфизма (обр. 8307/358) (рис. 3а). До изограды ставролита главным редкоземельным минералом является бастнезит, а монациты встречаются редко и имеют очень небольшие размеры до 5–10 мкм [21], поэтому получить по ним результаты химического датирования с удовлетворительной точностью очень сложно. Монацит из обр. 8307/358, выбранный для датирования, представлен удлинённым зерном неправильной формы размером около 20 мкм по длинной оси и шириной 5–10 мкм в ассоциации с биотитом и кварцем. Его количественный анализ был сделан в 10 точках (рис. 4). По составу зерно незонально. Содержания REE составляют: 28,67–29,47 мас. % Ce₂O₃, 13,81–14,30 мас. % La₂O₃, 13,13–13,64 мас. % Nd₂O₃, 3,18–3,46 мас. % Pr₂O₃, 2,00–2,24 мас. % Sm₂O₃ (табл. 1). В узком интервале находятся концентрации иттрия: 1,47–1,70 мас. % Y₂O₃. Содержания примесей ThO₂, UO₂ и PbO, невысокие (0,56–0,95; 0,58–0,79 и 0,28–0,34 мас. % соответственно), но вполне достаточные для расчета значений возраста кристаллизации монацита.

Таблица 1

Составы монацита из ставролитовой зоны метаморфизма (обр. 8307/358)

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ThO ₂	0,92	0,56	0,81	0,88	0,65	0,95	0,81	0,95	0,81	0,75
UO ₂	0,68	0,67	0,71	0,76	0,79	0,68	0,58	0,69	0,72	0,68
PbO	0,31	0,28	0,31	0,34	0,32	0,32	0,27	0,32	0,33	0,30
P ₂ O ₅	29,36	29,29	29,21	29,24	29,14	29,14	29,46	29,31	28,97	28,86
Ce ₂ O ₃	28,67	28,71	29,29	29,05	29,27	29,28	29,47	28,87	28,71	29,35
La ₂ O ₃	13,89	13,84	13,96	13,85	14,3	14,08	13,92	14,16	13,81	13,94
Nd ₂ O ₃	13,50	13,73	13,57	13,42	13,12	13,45	13,54	13,64	13,38	13,13
Pr ₂ O ₃	3,25	3,41	3,26	3,25	3,18	3,21	3,46	3,34	3,19	3,27
Sm ₂ O ₃	2,24	2,20	2,07	2,17	2,10	2,03	2,07	2,00	2,18	2,00
Gd ₂ O ₃	1,71	1,80	1,66	1,68	1,53	1,63	1,75	1,80	1,93	1,50
Dy ₂ O ₃	0,47	0,58	0,49	0,50	0,49	0,47	0,43	0,52	0,57	0,56
Eu ₂ O ₃	0,17	0,15	0,16	0,23	0,20	0,19	0,17	0,12	0,20	0,19
Y ₂ O ₃	1,60	1,59	1,63	1,68	1,70	1,56	1,47	1,50	1,64	1,64
SiO ₂	0,16	0,20	0,22	0,17	0,17	0,24	0,23	0,27	0,40	0,23
CaO	0,44	0,35	0,39	0,40	0,41	0,38	0,35	0,40	0,40	0,41
SrO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03
F	0,32	0,31	0,30	0,25	0,32	0,33	0,28	0,31	0,30	0,29
Сумма	97,70	97,66	98,03	97,86	97,71	97,93	98,26	98,21	97,56	97,13

Примечание: номера анализов в таблице соответствуют номерам точек на рис. 4.

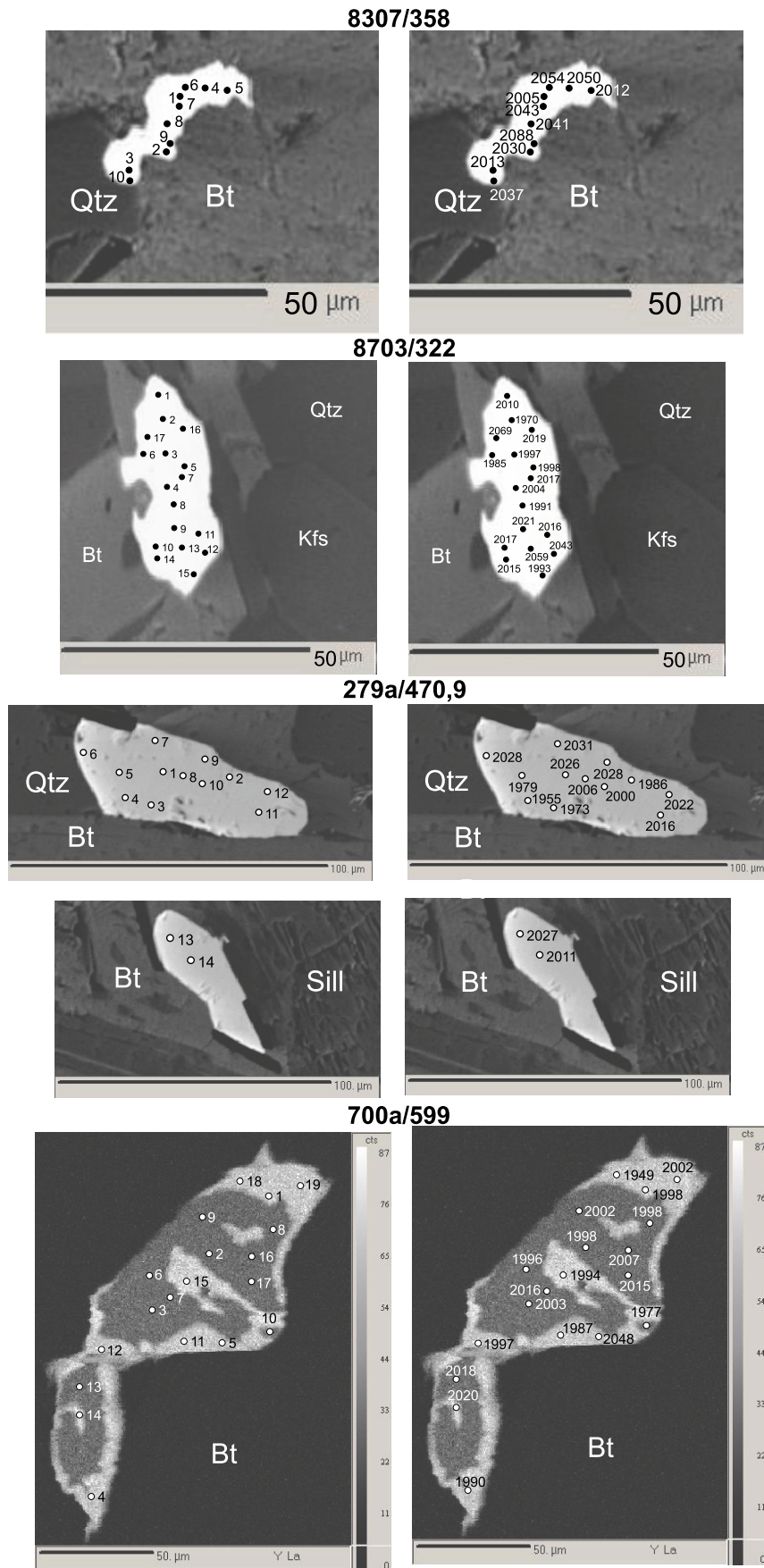


Рис. 4. Местоположения точек датирования монацитов и значения возрастов, полученных в этих точках

По определению содержаний U, Th, Pb в 10 точках были выполнены расчеты возраста монацита по методу Ж.-М. Монтеля с соавторами [2] получены значения в интервале от 2005 до 2088 млн лет (табл. 2, рис. 4), средневзвешенное значение – 2037 ± 50 млн лет, СКВО = 0,096 (рис. 5). При расчете средневзвешенного значения возраста по усовершенствованной методике [4] с помощью Th/Pb-U/Pb-диаграммы были получены близкие средневзвешенные оценки – $2039,5 \pm 26$ млн лет, СКВО = 0,38 (рис. 5).

Мусковит-силлиманитовая зона

Образец 8703/322 представляет собой гранат-силлиманит-биотит-мусковитовый гнейс, содержащий акцессорный монацит. Хотя монациты в мусковит-силлиманитовой зоне крупнее, чем в ставролитовой, зерен диаметром более 40 мкм нам

не встретилось. Выбранное для определения возраста зерно имеет удлинённую форму и размеры 15×40 мкм в тесной ассоциации с биотитом, кварцем и калиевым полевым шпатом. Для определения возраста по соотношениям U, Th и Pb это зерно было проанализировано в 17 точках (рис. 4). Концентрации REE составляют в мас. %: Ce_2O_3 – 26,76–28,68, La_2O_3 – 13,16–14,40, Nd_2O_3 – 12,90–13,80, Pr_2O_3 – 3,10–3,49, Sm_2O_3 – 2,05–2,35 (табл. 3). Зональности по иттрию не установлено, и его содержания (1,25–1,67 мас. % Y_2O_3) такие же, как в монаците из ставролитовой зоны. Содержания тория обнаруживают широкий интервал значений (1,92–4,16 мас. % ThO_2), но какая-либо закономерность в его распределении по зерну отсутствует. Сами концентрации ThO_2 в 2–4 раза выше, чем в монаците из ставролитовой зоны. Так же, как и в монацитах ставролитовой зоны, присутствует фтор в

Таблица 2

Концентрации тория, урана, свинца и значения возраста в точках анализа, рассчитанные по [2]

Точка	Содержание, ppm			Стандартное отклонение, ppm			Отн. погрешность (%)			Возраст	Ошибка
	ThO ₂	UO ₂	PbO	ThO ₂	UO ₂	PbO	ThO ₂	UO ₂	PbO		
<i>Ставролитовая зона</i>											
<i>8307/358</i>											
1	9186	6815	3095	330	96	77	3,59	1,41	2,49	2005	81
2	5607	6672	2775	234	96	74	4,17	1,44	2,67	2030	83
3	8082	7066	3097	300	97	77	3,71	1,37	2,49	2013	79
4	8797	7576	3408	319	100	79	3,63	1,32	2,32	2050	76
5	6543	7850	3224	258	101	78	3,94	1,29	2,42	2012	74
6	9502	6756	3197	339	96	78	3,57	1,42	2,44	2054	81
7	8094	5830	2732	300	92	75	3,71	1,58	2,75	2043	89
8	9502	6891	3219	339	97	78	3,57	1,41	2,42	2041	81
9	8121	7220	3299	301	98	79	3,71	1,36	2,39	2088	79
10	7504	6789	2997	283	96	75	3,77	1,41	2,50	2037	81
<i>Мусковит-силлиманитовая зона</i>											
<i>8703/322</i>											
1	37133	5384	5104	1165	87	93	3,14	1,62	1,82	2010	87
2	26498	4105	3646	842	82	82	3,18	2,00	2,25	1970	96
3	22394	3565	3162	719	80	78	3,21	2,24	2,47	1997	103
4	41625	6225	5767	1301	91	99	3,13	1,46	1,72	2004	83
5	19629	4298	3163	636	84	78	3,24	1,95	2,47	1998	98
6	28628	4410	3966	907	84	84	3,17	1,90	2,12	1985	94
7	35346	6742	5425	1111	94	96	3,14	1,39	1,77	2017	81
8	31478	5383	4553	993	88	89	3,15	1,63	1,95	1991	87
9	20533	4380	3315	663	84	79	3,23	1,92	2,38	2021	97
10	21275	4316	3352	685	83	79	3,22	1,92	2,36	2017	97
11	27254	4911	4082	865	86	85	3,17	1,75	2,08	2016	91
12	19170	4547	3292	623	85	79	3,25	1,87	2,40	2043	97
13	24415	5997	4302	780	92	87	3,19	1,53	2,02	2059	86
14	36463	5403	5065	1145	88	93	3,14	1,63	1,84	2015	87
15	21336	5979	3863	688	92	84	3,22	1,54	2,17	1993	85
16	22313	5632	3893	717	90	84	3,21	1,60	2,16	2019	88
17	20744	3842	3239	670	82	79	3,23	2,13	2,44	2069	103

Точка	Содержание, ppm			Стандартное отклонение, ppm			Отн. погрешность (%)			Возраст	Ошибка
	ThO ₂	UO ₂	PbO	ThO ₂	UO ₂	PbO	ThO ₂	UO ₂	PbO		
<i>Силлиманит-калишпат-кордиеритовая зона</i>											
<i>279a/470,9</i>											
1	29700	5663	4580	943	94	91	3,17	1,65	1,99	2026	88
2	29547	6987	4900	935	97	91	3,17	1,38	1,86	1986	80
3	31651	5875	4682	999	91	90	3,16	1,55	1,91	1973	84
4	30944	5995	4613	978	91	89	3,16	1,52	1,93	1955	83
5	31118	5546	4544	983	90	88	3,16	1,62	1,95	1979	86
6	29670	6998	5036	939	97	92	3,17	1,38	1,83	2028	80
7	34264	7618	5669	1078	100	98	3,15	1,31	1,73	2031	78
8	32877	6025	4930	1036	92	92	3,15	1,53	1,86	2006	84
9	29295	6411	4803	928	94	90	3,17	1,47	1,88	2028	83
10	30229	6215	4743	956	93	90	3,16	1,50	1,91	2000	84
11	29666	6247	4750	939	93	90	3,17	1,49	1,89	2016	84
12	31077	6554	4995	982	95	92	3,16	1,44	1,84	2022	82
13	29644	6929	5009	938	96	92	3,17	1,39	1,84	2027	81
14	29828	6927	4976	944	96	92	3,16	1,39	1,84	2011	80
<i>700a/599</i>											
1	34052	1292	3435	1072	67	78	3,15	5,20	2,26	1998	117
2	33779	6213	5052	1063	117	90	3,15	1,88	1,79	1998	86
3	34867	6271	5180	1096	118	91	3,14	1,87	1,75	2003	85
4	34279	2638	3886	1079	81	81	3,15	3,08	2,08	1990	105
5	32132	3572	4137	1014	91	84	3,16	2,55	2,04	2048	101
6	34827	6113	5105	1095	116	91	3,15	1,89	1,77	1996	86
7	35390	6157	5227	1112	117	91	3,14	1,90	1,75	2016	86
8	34292	5743	4940	1079	112	89	3,15	1,94	1,80	1998	87
9	32816	5395	4703	1034	108	88	3,15	2,01	1,87	2002	89
10	34295	5914	4938	1079	114	89	3,15	1,92	1,81	1977	86
11	31920	2341	3574	1007	78	79	3,15	3,32	2,21	1987	108
12	32642	1252	3294	1028	66	76	3,15	5,30	2,31	1997	118
13	37456	6785	5629	1175	123	93	3,14	1,81	1,66	2018	83
14	36610	4780	4884	1149	101	88	3,14	2,11	1,79	2020	91
15	34775	3356	4175	1093	87	82	3,14	2,60	1,97	1994	99
16	35042	6447	5269	1101	119	91	3,14	1,85	1,73	2007	84
17	35661	6250	5279	1120	117	91	3,14	1,87	1,72	2015	85
18	33623	2299	3632	1058	78	79	3,15	3,38	2,17	1949	106
19	32756	1663	3451	1032	72	77	3,15	4,32	2,24	2002	114

количестве 0,22–0,31 мас. %. Содержания UO₂ и PbO значительно ниже, чем ThO₂ (0,36–0,67 и 0,32–0,58) и также не обнаруживают закономерного распределения. Отметим, что в отдельных образцах из мусковит-силлиманитовой зоны в зернах монацита отмечаются узкие каймы, обогащенные иттрием.

По точечным определениям содержания U, Th, Pb в 17 точках выполнены расчеты возраста монацита из образца 8703/322 и получены значения в интервале от 1970 до 2069 млн лет, средневзвешенное значение 2013 ± 43 млн лет, СКВО = 0,073 (табл. 2 и рис. 4, рис. 5). При расчете значений возраста с помощью построения Th/Pb-U/Pb-диаграммы были получены близкие средневзвешенные

оценки с меньшей погрешностью 2014,9 ± 14 млн лет СКВО = 0,30 (рис. 5).

Силлиманит-калишпат-кордиеритовая зона

Химическое Th-U-Pb датирование монацитов было выполнено для двух образцов 700a/599 и 279a/470,9 гранат-силлиманит-кордиеритовых гнейсов. Монациты в самой высокотемпературной силлиманит-калишпат-кордиеритовой зоне имеют более крупные размеры, чем в других зонах.

В первом образце гранат-биотит-кордиерит-силлиманитового гнейса 700a/599 было выбрано крупное, удлиненное (50 × 100 мкм) зерно монацита (его изображение в рентгеновских лучах Y, U, Pb, Th представлено на рис. 6). Количественный

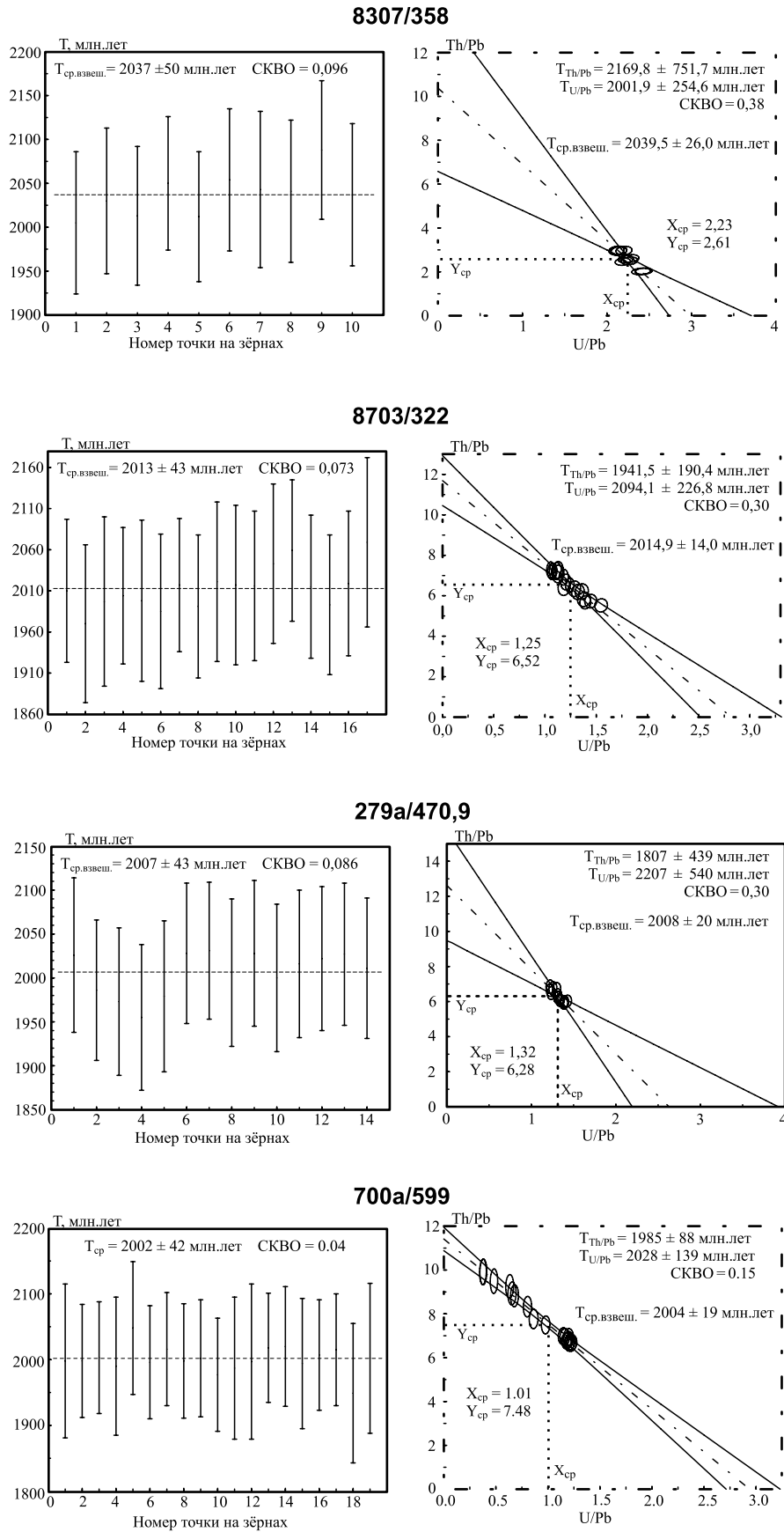


Рис. 5. Вариации значений возрастов монацитов, рассчитанных по единичным точкам, и величина средневзвешенного возраста по [2] и по графикам Th/Pb-U/Pb [4]

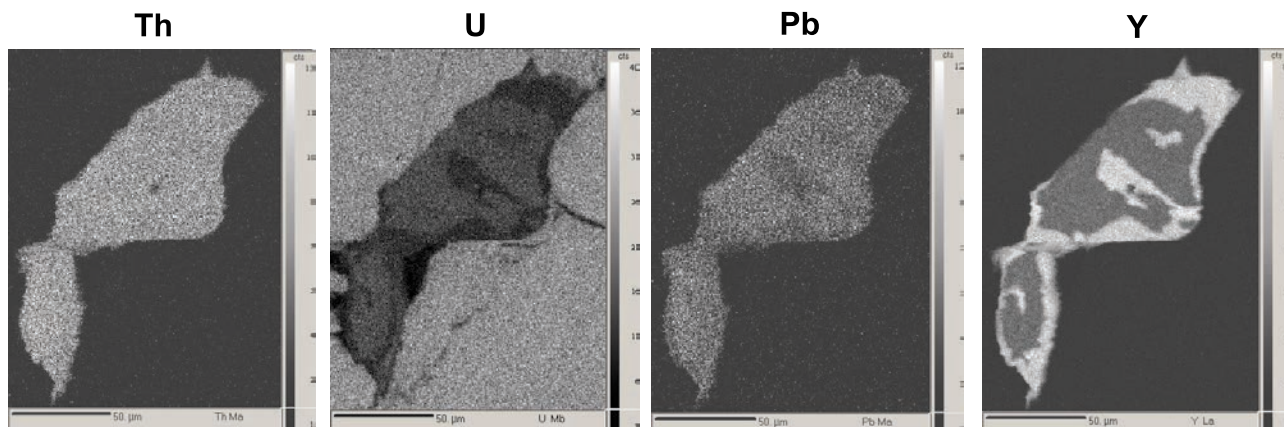


Рис. 6. Изображение в характеристическом рентгеновском излучении линий ThMa, UMβ, PbMa, YLa зерна монацита, обр. 700a/599

Таблица 3

Составы монацита из силлиманит-мусковитовой зоны метаморфизма (обр. 8703/322)

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ThO ₂	3,71	2,65	2,24	4,16	1,96	2,86	3,53	3,15	2,05	2,13
UO ₂	0,54	0,41	0,36	0,62	0,43	0,44	0,67	0,54	0,44	0,43
PbO	0,51	0,36	0,32	0,58	0,32	0,40	0,54	0,46	0,33	0,34
P ₂ O ₅	29,94	29,91	30,10	30,11	29,97	30,08	29,88	30,12	30,16	29,89
Ce ₂ O ₃	27,27	28,43	28,58	27,36	28,68	28,17	26,76	27,70	28,54	28,58
La ₂ O ₃	13,43	13,69	13,92	13,19	14,27	14,21	13,35	13,59	14,04	14,40
Nd ₂ O ₃	13,17	13,28	13,80	12,90	13,21	12,85	12,96	13,31	13,57	13,22
Pr ₂ O ₃	3,25	3,42	3,49	3,17	3,32	3,37	3,10	3,27	3,18	3,32
Sm ₂ O ₃	2,31	2,10	2,35	2,10	2,17	2,17	2,17	2,24	2,30	2,05
Gd ₂ O ₃	1,77	1,69	1,69	1,57	1,67	1,60	1,75	1,78	1,70	1,72
Dy ₂ O ₃	0,62	0,48	0,44	0,44	0,47	0,46	0,59	0,51	0,57	0,55
Eu ₂ O ₃	0,29	0,23	0,27	0,17	0,29	0,29	0,38	0,31	0,34	0,24
Y ₂ O ₃	1,67	1,48	1,41	1,61	1,40	1,25	1,66	1,57	1,47	1,42
SiO ₂	0,21	0,20	0,21	0,28	0,23	0,59	0,35	0,30	0,27	0,30
CaO	0,94	0,61	0,57	0,98	0,56	0,76	0,95	0,71	0,51	0,69
SrO	0,02	0,01	0,03	0,01	-	0,02	0,01	0,01	-	-
F	0,30	0,30	0,30	0,28	0,27	0,25	0,28	0,27	0,27	0,27
Сумма	99,94	99,25	100,08	99,53	99,20	99,77	98,92	99,82	99,76	99,55

Окончание табл. 3

	11	12	13	14	15	16	17
ThO ₂	2,73	1,92	2,44	3,65	2,13	2,23	2,07
UO ₂	0,49	0,45	0,60	0,54	0,60	0,56	0,38
PbO	0,41	0,33	0,43	0,51	0,39	0,39	0,32
P ₂ O ₅	29,78	29,94	29,96	30,02	29,75	29,56	29,81
Ce ₂ O ₃	28,04	28,62	27,68	27,38	28,04	28,18	28,14
La ₂ O ₃	13,66	14,03	13,34	13,16	13,53	13,67	13,94
Nd ₂ O ₃	13,24	13,28	13,27	13,15	13,24	13,14	13,39
Pr ₂ O ₃	3,24	3,28	3,35	3,17	3,29	3,20	3,17
Sm ₂ O ₃	2,24	2,16	2,26	2,27	2,15	2,09	2,32
Gd ₂ O ₃	1,71	1,79	1,67	1,74	1,87	1,89	1,84
Dy ₂ O ₃	0,54	0,57	0,57	0,57	0,59	0,56	0,51
Eu ₂ O ₃	0,26	0,35	0,24	0,28	0,32	0,37	0,31
Y ₂ O ₃	1,55	1,43	1,63	1,58	1,58	1,59	1,34
SiO ₂	0,36	0,27	0,35	0,35	0,35	0,31	0,38
CaO	0,66	0,52	0,69	0,87	0,65	0,66	0,60
SrO	0,01	0,01	0,01	0,00	0,02	0,01	0,02
F	0,28	0,28	0,27	0,22	0,31	0,29	0,21
Сумма	99,19	99,21	98,76	99,46	98,82	98,72	98,75

анализ состава зерна выполнен в 19 точках (табл. 4; рис. 4). Содержание Ce_2O_3 варьирует от 27,20 до 29,60, $La_2O_3 = 13,11-14,54$, $Nd_2O_3 = 12,24-13,03$, $Pr_2O_3 = 2,98-3,48$, $Sm_2O_3 = 1,55-1,82$ и $Y_2O_3 = 0,86-3,33$ мас. %. Содержания примесей ThO_2 , UO_2

и PbO невысокие (3,19–3,75, 0,13–0,68 и 0,33–0,56 мас. %, соответственно), $SiO_2 = 0,20-0,34$, $CaO = 0,68-0,96$ и $F = 0,22-0,31$ мас.%. В составе LREE (La-Sm) доля Ce составляет около 47-49 % при соотношении La/Nd от 1,06 до 1,17.

Таблица 4

Составы монацита из силлиманит-калишпат-кордиеритовой зоны метаморфизма (обр. 700a/599)

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ThO_2	3,41	3,38	3,49	3,43	3,21	3,48	3,54	3,43	3,28	3,43
UO_2	0,13	0,62	0,63	0,26	0,36	0,61	0,62	0,57	0,54	0,59
PbO	0,34	0,51	0,52	0,39	0,41	0,51	0,52	0,49	0,47	0,49
P_2O_5	29,65	29,60	29,57	29,74	29,58	29,79	29,50	29,36	29,38	29,28
Ce_2O_3	27,70	29,50	29,39	27,20	28,74	29,52	29,01	29,60	29,33	28,70
La_2O_3	13,38	14,62	14,29	13,11	14,11	14,22	14,14	14,54	14,50	13,98
Nd_2O_3	12,44	12,46	12,84	12,24	12,62	13,03	12,84	12,88	12,60	12,67
Pr_2O_3	3,22	3,23	3,32	2,98	3,22	3,43	3,36	3,23	3,46	3,48
Sm_2O_3	1,65	1,74	1,79	1,64	1,74	1,75	1,77	1,64	1,79	1,68
Gd_2O_3	1,46	1,11	1,12	1,44	1,31	1,18	1,11	1,03	1,01	1,11
Dy_2O_3	0,75	0,27	0,36	0,73	0,51	0,17	0,24	0,24	0,22	0,26
Eu_2O_3	0,18	0,29	0,28	0,21	0,27	0,29	0,31	0,28	0,25	0,29
Y_2O_3	3,31	0,91	0,93	3,33	1,61	0,96	0,97	0,91	0,86	0,94
SiO_2	0,20	0,21	0,23	0,21	0,28	0,26	0,33	0,27	0,26	0,32
CaO	0,75	0,89	0,83	0,81	0,72	0,83	0,88	0,80	0,86	0,87
SrO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
F	0,24	0,26	0,27	0,26	0,26	0,31	0,31	0,26	0,28	0,30
Сумма	98,81	99,60	99,85	97,98	98,97	100,33	99,43	99,53	99,08	98,38

Окончание табл. 4

№ точки	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ThO_2	3,19	3,26	3,75	3,66	3,48	3,50	3,57	3,36	3,28
UO_2	0,23	0,13	0,68	0,48	0,34	0,64	0,63	0,23	0,17
PbO	0,36	0,33	0,56	0,49	0,42	0,53	0,53	0,36	0,35
P_2O_5	29,79	29,84	29,34	29,88	29,54	29,27	29,26	29,55	29,40
Ce_2O_3	28,64	28,08	29,41	28,25	27,97	28,83	28,77	27,80	27,53
La_2O_3	14,03	13,70	14,15	13,71	13,87	14,41	14,12	13,67	13,11
Nd_2O_3	12,71	12,70	12,85	12,52	12,63	12,63	12,88	12,82	12,83
Pr_2O_3	3,21	3,05	3,17	3,20	3,23	3,31	3,44	3,16	3,19
Sm_2O_3	1,55	1,58	1,60	1,85	1,76	1,65	1,76	1,56	1,82
Gd_2O_3	1,43	1,57	1,30	1,49	1,44	1,20	1,04	1,53	1,79
Dy_2O_3	0,67	0,74	0,16	0,51	0,61	0,26	0,28	0,53	0,82
Eu_2O_3	0,22	0,28	0,34	0,30	0,30	0,32	0,29	0,30	0,22
Y_2O_3	2,30	3,12	0,99	2,24	3,03	0,93	0,97	3,14	3,33
SiO_2	0,25	0,24	0,34	0,23	0,26	0,32	0,34	0,26	0,30
CaO	0,68	0,68	0,96	0,86	0,80	0,94	0,87	0,81	0,75
SrO	–	–	–	–	–	–	–	–	–
F	0,25	0,29	0,25	0,28	0,24	0,26	0,28	0,24	0,22
Сумма	99,53	99,60	99,85	99,94	99,92	99,01	99,02	99,32	99,09

Монацит имеет зональное строение (рис. 6). Центральные и краевые части кристалла отчетливо различаются по содержанию иттрия и урана, но при этом содержание тория в них близкое. Концентрация иттрия в центральной зоне зерна достаточно высокая – 2,3–3,3 мас. % Y_2O_3 , а урана пониженная – 0,13–0,23 мас. % UO_2 . В зоне каймы кристал-

ла концентрация иттрия падает до 0,86–0,99 мас. % Y_2O_3 , а урана возрастает до 0,54–0,68 мас. % UO_2 .

Из точечных определений содержания U, Th, Pb были выполнены расчеты возраста монацита и получены значения в интервале от 1949 до 2048 млн лет (табл. 2), средневзвешенное значение –

2002 ± 42 млн лет, СКВО = 0,040 (см. табл. 2 и рис. 5). В высоко- и низкоиттриевых зонах точечные значения возрастов лежат в пределах погрешности измерений, и основания выделять по возрасту центральную и периферическую зоны отсутствуют.

Наличие для зерна монацита из образца 700a/599 значимой дисперсии содержаний Th и U позволяет выполнить изохронные построения. На Th/Pb-U/Pb-диаграмме (рис. 5) аналитические точки группируются в двух областях – около оси ординат и в центральной части диаграммы, вследствие чего построение изохроны и оценка возрастов представляются вполне корректными, а средневзвешенное значение возраста составляет 2004,3 ± 19 млн лет (СКВО = 0,15), что сопоставимо со сред-

невзвешенным значением 2002 ± 42 млн лет, определенным по точечным содержаниям U, Th, Pb.

В образце из силлиманит-кордиеритового гнейса 279a/470,9 было проанализировано два небольших зерна монацита. Более крупное удлиненное зерно размером 30 × 60 мкм в ассоциации в кварцем и биотитом было проанализировано в 12 точках, более мелкое (2 × 50 мкм) в контакте с силлиманитом и биотитом – еще в двух точках (рис. 4). В отличие от монацита из обр. 700a/599 четкой зональности по иттрию и урану не наблюдается. Содержания иттрия такие же, как и в центральных частях монацита из обр. 700a/599 (2,30–3,07 мас. % Y₂O₃) (табл. 5), а урана – как в краевых (0,55–0,70 мас. % UO₂). Близки и концентрации REE, тория и свинца.

Таблица 5

Составы монацита из силлиманит-калишпат-кордиеритовой зоны метаморфизма (обр. 279a/470,9)

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ThO ₂	2,97	2,95	3,17	3,09	3,11	2,97	3,43	3,29	2,93	3,02
UO ₂	0,57	0,70	0,59	0,60	0,55	0,70	0,76	0,60	0,64	0,62
PbO	0,46	0,49	0,47	0,46	0,45	0,50	0,57	0,49	0,48	0,47
P ₂ O ₅	30,35	29,41	29,80	30,10	29,73	30,12	29,80	30,00	29,96	30,07
Ce ₂ O ₃	27,07	27,05	27,85	27,71	27,90	28,54	28,12	27,70	27,32	27,95
La ₂ O ₃	12,47	12,56	13,31	12,81	12,97	13,53	13,44	13,14	12,86	13,24
Nd ₂ O ₃	13,26	12,63	12,50	12,96	13,14	12,29	13,04	12,90	12,85	12,89
Pr ₂ O ₃	3,22	3,11	3,10	3,25	3,33	3,32	3,15	3,18	3,25	3,22
Sm ₂ O ₃	2,41	2,04	1,99	2,18	2,26	1,71	2,18	1,98	2,03	2,01
Gd ₂ O ₃	2,07	1,77	1,62	1,98	1,95	1,46	1,61	1,99	1,99	1,66
Dy ₂ O ₃	0,89	0,73	0,80	0,70	0,79	0,67	0,45	0,78	0,79	0,68
Eu ₂ O ₃	0,05	0,12	0,11	0,02	0,00	0,02	0,17	0,11	0,08	0,16
Y ₂ O ₃	3,07	2,87	2,52	2,43	2,41	2,79	1,43	2,42	3,03	2,30
SiO ₂	0,13	0,75	0,19	0,19	0,17	0,16	0,28	0,25	0,21	0,25
CaO	0,77	0,95	0,90	0,83	0,89	0,88	0,88	0,92	0,81	0,84
SrO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
F	0,23	0,29	0,31	0,23	0,29	0,27	0,27	0,30	0,27	0,27
Сумма	99,99	98,41	99,20	99,54	99,95	99,93	99,59	100,07	99,50	99,67

Окончание табл. 5

№ точки	11	12	13	14
ThO ₂	2,97	3,11	2,96	2,98
UO ₂	0,62	0,66	0,69	0,69
PbO	0,47	0,50	0,50	0,50
P ₂ O ₅	30,38	30,42	30,04	30,04
Ce ₂ O ₃	27,22	27,80	27,84	27,76
La ₂ O ₃	12,60	13,17	13,19	13,27
Nd ₂ O ₃	12,84	12,88	12,86	13,04
Pr ₂ O ₃	3,20	3,38	3,24	3,29
Sm ₂ O ₃	2,20	1,98	2,07	2,19
Gd ₂ O ₃	2,12	1,69	1,84	1,73
Dy ₂ O ₃	0,91	0,75	0,78	0,75
Eu ₂ O ₃	0,16	0,00	0,07	0,05
Y ₂ O ₃	3,08	2,64	2,78	2,82
SiO ₂	0,18	0,20	0,13	0,17
CaO	0,83	0,85	0,77	0,79
SrO	–	–	–	–
F	0,29	0,26	0,30	0,27
Сумма	100,07	100,28	100,08	100,33

По точечным определениям содержания U, Th, Pb выполнены расчеты возраста монацита из образца 279a/480,9 и получены значения в интервале от 2024 до 2074 млн лет (табл. 2), средневзвешенное значение 2007 ± 43 млн лет, СКВО = 0,086 (рис. 5). При расчете возраста с помощью Th/Pb-U/Pb-диаграммы были получены близкие средневзвешенные оценки с меньшей погрешностью 2008 ± 20 млн лет (рис. 5), очень близкие к полученным значениям для монацита из обр. 700a/599 из той же силлиманит-калишпат-кордиеритовой зоны.

Химические критерии замкнутости системы монацитов

Известно, что перекристаллизация минерала при метасоматизме, его растворение-осаждение могут приводить к нарушению замкнутости U-Th-Pb-системы или ее полной переустановке (например, [25, 26]), что ограничивает возможности использования монацита в датировании. В литературе (см. например: [9, 27 и др.]) большое внимание уделяется поиску кристаллохимических критериев, в частности, особенностей распределения Y по зерну, как основы для выявления возрастной гетерогенности зерен монацитов и выделения кластеров разновозрастных данных. Несмотря на наличие большого числа публикаций по данной тематике, в особенности для монацитов из древних метаморфических комплексов, вопрос во многом остается дискуссионным и до настоящего времени.

В качестве показателя замкнутости системы был предложен параметр β равный отношению $(Ca + Si) / (Th + U + Pb + S)$ [7], который характеризует степень зарядовой компенсации гетеровалентных примесей тория, урана и серы (при ее наличии в монаците). Это отношение рассматривается как показатель замкнутости Th-U-Pb-системы минерала: последняя считалась замкнутой при условии полной зарядовой компенсации примесей по хаттонитовому и чералитовому типам (при близости β к 1). При высоких значениях β увеличивается разброс единичных значений возрастов и соответственно возрастает среднее квадратичное отклонение при расчете псевдоизохрон.

В проанализированных нами монацитах присутствие серы не зафиксировано, и параметр β изменяется от 1,0 до 1,33, причем монациты из высокотемпературных зон метаморфизма характеризуются значением этого параметра более близким к 1, чем из ставролитовой зоны. Коэффициент β практически одинаков для центральной части и каймы зонального кристалла из обр. 700a/599. Таким образом, в монаците из образца 700a/599 при ярко выраженной зональности по Y и U разли-

чий в изоморфизме по зонам не прослеживается. По содержанию F и значению параметра β зональность не проявлена.

В большинстве проанализированных монацитов имеется некоторый избыток ионов (Si+Ca) над (Th+U+Pb). Однако представляется, что в изучаемых монацитах он является следствием не вторичных преобразований минерала и нарушения замкнутости его Th-U-Pb-системы, а вхождения Si и Ca по другим схемам, в частности, при замещении ортофосфорной группировки кремнекислородной с компенсацией заряда ионами фтора – $PO_4^{3-} \rightarrow SiO_3^{2-} + F^-$ [10]. Это предположение подтверждается постоянным присутствием в монаците значительного (0,22–0,33 мас. %) количества фтора.

Обсуждение результатов

Наименее метаморфизованные породы ставролитовой зоны имеют несколько более древний возраст 2039 ± 26 млн лет, чем метапелиты мусковит-силлиманитовой (2015 ± 14 млн лет) и наиболее высокотемпературной силлиманит-калишпат-кордиеритовой зоны (2008 ± 20 и 2004 ± 18 млн лет). Тот факт, что мы получили практически одинаковые возраста для монацитов из образцов пород воронцовской серии, удаленных друг от друга почти на 300 км, подтверждает их надежность. Хотя все эти оценки для разных зон метаморфизма находятся в пределах ошибки измерений, тем не менее, можно утверждать, что метаморфизм терригенной толщи воронцовской серии имел место после внедрения огромного объема магм основного и ультраосновного состава еланского и мамонского комплексов в период 2060–2090 млн лет.

Полученные нами данные по возрасту метаморфизма пород воронцовской серии дают основания пересмотреть эволюцию геологических событий в зоне сочленения двух докембрийских коровых сегментов Восточно-Европейской платформы – Сарматии и Волгоуралии.

Конкордантный возраст кластогенных цирконов по четырем выборкам из биотит-мусковитовых гнейсов воронцовской серии из Воронежской параметрической скважины колеблется от 2129 ± 15 млн лет до 2208 ± 22 млн лет (SHRIMP II, ВСЕ-ГЕИ – неопубликованные данные А.В. Самсонова и А.Н. Ларионова). Таким образом, возраст метаморфизма 2104 ± 4 млн лет, определенный по монофракции цирконов [11] очень близок к оценкам возраста детритовых цирконов. Как описано во многих публикациях [28–32 и др.], проблема датирования возраста метаморфизма по цирконам заключается в сохранности либо самих детритовых

цирконов, либо ядер детритовых цирконов с рекристаллизованными каймами при метаморфизме амфиболитовой и гранулитовой фаций. В результате измеряемые U-Pb изотопные оценки возраста будут «смешанными» – более древними, чем действительный возраст метаморфизма. Практически все цирконы в породах воронцовской серии являются или детритовыми, или сохраняют детритовые ядра (например, рис. 7).

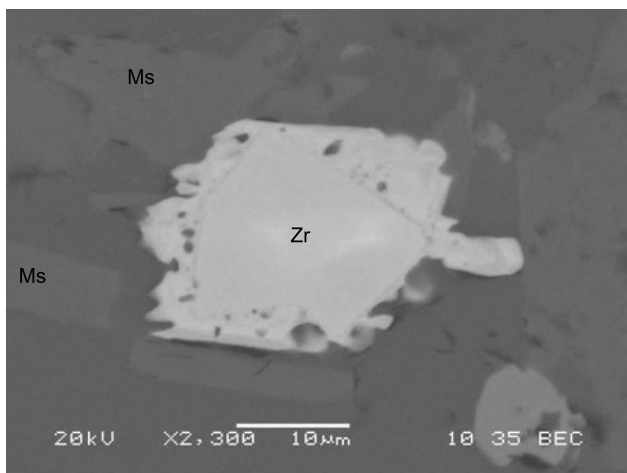


Рис. 7. Зональный кристалл циркона: в центральной части сохраняется детритовый циркон, обрастающий метаморфической каймой. Образец 8062/380 (метапесчаник воронцовской серии)

Метаосадки воронцовской серии характеризуются контрастными вариациями модельных возрастов TNd(DM) от 2,12 до 2,85 млрд лет, что указывает на их формирование за счет разрушения преимущественно ювенильных палеопротерозойских источников сноса [13]. Накопление мощных толщ терригенных осадков воронцовской серии происходило в интервале 2200–2100 млн лет за счет размыва континентальной коры Волгоуральского сегмента, представленной высокоглиноземистыми гранулитами южноволжского комплекса с продуктами анатектического плавления – гранитами с кордиеритом и гранатом рахмановского комплекса и основными метавулканитами и гранитами Терсинского мегакомплекса [11, 22]. В период 2060–2100 млн лет в неметаморфизованные или слабо метаморфизованные в зеленосланцевой фации мощные терригенные толщ воронцовской серии внедрялись огромные магматические массы основного и ультраосновного состава мамонского и еланского комплексов [15], которые к концу этого пика магматической активности становились все более кислыми (диориты).

Для последующего обсуждения особого рассмотрения заслуживают комплекс небольших по размерам интрузий лейкократовых гранитов S-типа востока ВКМ, объединяемые в единый бобровский комплекс, датированный в западной части структуры – 2022 ± 8 млн лет [11]. Помимо этой принятой оценки, существуют и другие данные, к примеру, конкордантные возрасты, определенные по циркону (SHRIMP II, ВСЕГЕИ), для гранитов Коршевского массива составляют 2050 ± 13 млн лет, для кварцевых диоритов Новомеловатской интрузии – 2052 ± 10 млн лет [33]. По мнению А.А. Щипанского с соавторами граниты бобровского комплекса являются синметаморфическими [13]. Все массивы гранитов находятся в областях высокотемпературного метаморфизма пород воронцовской серии – в пределах мусковит-силлиманитовой и силлиманит-калишпат-кордиеритовой зон ($560\text{--}750$ °C).

По последним данным гранитоиды в западной и восточной частях Воронцовской структуры отличаются по петрогеохимии – в восточной части они представлены монцогранитами и кварцевыми монцонитами с возрастом 1984 ± 20 млн лет, сформировавшимися в сухих условиях при давлениях менее 8 кбар, т.е. на уровнях средней или верхней коры в процессе дифференциации базитовой магмы [23]. Модельный возраст монцогранитов составляет ~2,3 млрд лет, что свидетельствует об очень короткой коровой предыстории этих пород и об отсутствии архейской коры в основании осадочно-метаморфической толщи воронцовской серии в восточной части структуры [23].

Таким образом, представляется, что высокотемпературный низкобарический (НТ/LP) зональный метаморфизм метаосадочных пород воронцовской серии имел место на завершающих стадиях коллизии, которая маркируется интрузиями гранитов бобровского комплекса в западной части структуры (2022 ± 8 млн лет) [11]. Внедрение монцогранитов и кварцевых монцонитов на востоке (1984 ± 20 млн лет) [23] происходило в завершении НТ/LP метаморфического события ($2004\text{--}2015$ млн), которое рассматривается как индикативное для обстановок внутриконтинентального растяжения, в том числе и при утонении литосферы на этапе распада коллизионного орогена [34, 35 и др.].

Завершает докембрийскую историю магматизма востока ВКМ внедрение интрузивных траппов новогольского комплекса [35] с возрастом 1805 ± 14 млн лет [16] уже в тафрогенный этап развития.

Выводы

Полученные результаты определения Th-U-Pb возраста по монацитам зонального HT/LP метаморфизма пород воронцовской серии востока ВКМ вместе с литературными данными позволили предложить последовательность корообразующих процессов, зафиксированную в присутствующих здесь породных комплексах.

1. Накопление мощных толщ терригенных осадков воронцовской серии происходило в интервале 2200–2100 млн лет за счет размыва континентальной коры Волгоуральского сегмента.

2. Внедрение магматических масс основного и ультраосновного состава в неметаморфизованные породы воронцовской серии в период 2090–2060 млрд лет.

3. Внедрение небольших интрузий лейкократовых гранитов S-типа бобровского комплекса на рубеже 2020 млн лет.

4. Высокотемпературный низкобарический (HT/LP) зональный метаморфизм терригенных пород воронцовской 2004–2015 млн лет на завершающих стадиях коллизии, близкий по возрасту и, по-видимому, связанный с генерацией гранитных магм бобровского комплекса.

5. Внедрение монцогранитов на востоке ВКМ около 1984 млн лет по завершении HT/LP метаморфизма в постколлизивной обстановке внутриконтинентального растяжения при утонении литосферы на этапе распада коллизивного орогена.

6. Внедрение интрузивных траппов новогольского комплекса с возрастом 1805 млн лет в платформенный этап развития.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 09-05-00513, 09-05-00821, 11-05-00035, 11-05-10034) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (госконтракт № 02.740.11.0727)

ЛИТЕРАТУРА

1. Suzuki K. Middle Precambrian provenance of Jurassic sandstone in the Mino Terrane, central Japan: Th-U-total Pb evidence from an electron microprobe monazite study / K. Suzuki, M. Adachi, T. Tanaka // *Sedim. Geol.* – 1991. – V. 75. – P. 141–147.
2. Montel J. M. Electron microprobe ages of monazite / J. M. Montel [et al.] // *Chemical Geology.* – 1996. – V. 131. – P. 37–53.
3. Rhede D. A three-dimensional method for calculating independent chemical U/Pb- and Th/Pb-ages of accessory

minerals / D. Rhede, L. Wendt, H.-J. Forster // *Chemical Geology.* – 1996. – V. 130. – P. 247–253.

4. Cocherie A. An improved U-Th-Pb age calculation for electron microprobe dating of monazite / A. Cocherie, F. Albarede // *Geoch. Cosmoch. Acta.* – 2001. – V. 65, № 24. – P. 4509–4522

5. Dahl P. S. Comparative isotopic and chemical geochronometry of monazite, with implications for U-Th-Pb dating by electron microprobe: An example from metamorphic rocks of the eastern Wyoming Craton (USA) / P. S. Dahl [et al.] // *Amer. Min.* – 2005. – V. 90. – P. 619–638.

6. Pyle J. M. Contributions to precision and accuracy of monazite microprobe ages / J. M. Pyle [et al.] // *Amer. Min.* – 2005. – V. 90. – P. 547–577.

7. Suzuki K. CHIME dating of monazite, xenotime, zircon and polycrase: Protocol, pitfalls and chemical criterion of possibly discordant age data / K. Suzuki, T. Kato // *Gondwana Research.* – 2008. – V. 14. – P. 569–586.

8. Вотяков С. Л. Химическое электронно-зондовое датирование минералов-концентраторов радиоактивных элементов: методические аспекты / С. Л. Вотяков [и др.] // *Литосфера.* – 2010. – № 4. – С. 94–115.

9. Williams M. L. Format and philosophy for collecting, compiling, and reporting microprobe monazite ages / W. L. Williams [et al.] // *Chemical Geology.* – 2006. – V. 225. – P. 1–15.

10. Williams M. L. Microprobe monazite geochronology: understanding geologic processes by integrating composition and chronology / M. L. Williams, M. J. Jercinovic, C. J. Hetherington // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* – 2007. – V. 35. – P. 137–175.

11. Бибикина Е. В. Зона сочленения Сарматии и Волго-Уралии: изотопно-геохронологическая характеристика супракратальных пород и гранитоидов / Е. В. Бибикина [и др.] // *Стратиграфия и геологическая корреляция.* – 2009. – № 6. – С. 3–16.

12. Лебедев И. П. Использование петрологических данных в стратиграфии метаморфических образований воронцовской серии ВКМ / И. П. Лебедев // *Петрология и металлогения магматических и метаморфических комплексов КМА и смежных районов.* – Воронеж : Изд-во ВГУ, 1983. – С. 83–90.

13. Щипанский А. А. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое / А. А. Щипанский [и др.] // *Геотектоника.* – 2007. – № 1. – С. 43–70.

14. Савко К. А. Зональность известково-силикатных метаморфических пород воронцовской серии востока Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко // *Изв. РАН. Серия: Геология.* – 1992. – № 2. – С. 27–38.

15. Чернышов Н. М. Новые данные о возрасте никеленосных дифференцированных плутонов Воронежского кристаллического массива / Н. М. Чернышов, А. Н. Пономаренко, Е. Н. Бартницкий // *ДАН УССР.* – 1990. – № 6. – С. 11–19.

16. Чернышов Н. М. Новые данные о возрасте габбро-долеритовых интрузивов трапповой формации Хоперского мегаблока ВКМ / Н. М. Чернышов [и др.] // *Доклады РАН.* – 2001. – Т. 380, № 5. – С. 1–3.

17. Савко К. А. Зональность минералов и прогрессивные метаморфические реакции в среднетемпературных метапелитах воронцовской серии (Воронежский кристаллический массив) / К. А. Савко // Изв. АН СССР. Серия: Геология. – 1990. – № 11. – С. 79–87.
18. Савко К. А. Низкотемпературные породы в метаморфической зональности воронцовской серии ВКМ / К. А. Савко // Геология и геофизика. – 1994. – № 3. – С. 50–59.
19. Савко К. А. Петрология и геоспидометрия метаморфических пород востока Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко, Ю. В. Герасимов // Труды НИИГ Воронеж. ун-та. – Воронеж, 2002. – Вып. 8. – 131 с.
20. Герасимов В. Ю. Геоспидометрия и температурная эволюция гранат-кордиеритовых метапелитов Воронежского кристаллического массива / В. Ю. Герасимов, К. А. Савко // Петрология. – 1995. – Т. 3. – № 6. – С. 563–577.
21. Савко К. А. Фазовые равновесия акцессорных редкоземельных минералов в метаморфических породах воронцовской серии, восток Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко, Н. С. Базиков // Вестн. Воронежского ун-та. Серия: Геология. – 2010. – № 1. – С. 102–120.
22. Савко К. А. Метатерригенные породы воронцовской серии Воронежского кристаллического массива: геохимия, особенности формирования и источники сноса / К. А. Савко, А. В. Самсонов, Н. С. Базиков // Вестн. Воронеж. ун-та. – Геология. – 2011. – № 1. – С. 70–94.
23. Савко К. А. Гранитоиды востока воронцовского кристаллического массива: геохимия, Th-U-Pb возраст и петрогенезис / К. А. Савко [и др.] // Вестн. Воронеж. ун-та. Серия: Геология. – 2011. – № 2, в печати.
24. Ludwig K. Users manual for ISOPLOT/EX, version 2. A geochronological toolkit for Microsoft Excel / K. Ludwig // Berkeley Geochronology Center: Spec. Pub. – 1999. – № 1a. – 120 p.
25. Hetherington C. L. Experimental metasomatism of monazite and xenotime: mineral stability, REE mobility and fluid composition / C. L. Hetherington, D. E. Harlov, B. Budzyń // Miner. Petrol. – 2010. – V. 99. – P. 165–184.
26. Harlov D. E. Partial high-grade alteration of monazite using alkali-bearing fluids: Experiment and nature / D. E. Harlov, C. L. Hetherington // Amer. Min. – 2010. – V. 95. – P. 1105–1108.
27. Goncalves P. Electron-microprobe age mapping of monazite / P. Goncalves, M. L. Williams, M. J. Jercinovic // Amer. Min. – 2005. – V. 90. – P. 578–585.
28. Hoskin P. W. O. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon / P. W. O. Hoskin, L. P. Black // J. Metam. Geol. – 2000. – V. 18. – P. 423–439.
29. Liu Y.-C. Geochronological and petrological constraints on Palaeoproterozoic granulite facies metamorphism in southeastern margin of the North China Craton / Y.-C. Liu [et al.] // J. Metam. Geol. – 2009. – V. 27. – P. 125–138.
30. Möller A. Polyphase zircon in ultrahigh-temperature granulites (Rogaland, SW Norway): constraints for Pb diffusion in zircon / A. Möller [et al.] // J. Metam. Geol. – 2002. – V. 20. – P. 727–740.
31. Peck W. H. Mechanism of metamorphic zircon growth in a granulite-facies quartzite, Adirondack Highlands, Grenville Province, New York / W. H. Peck [et al.] // Amer. Min. – 2010. – V. 95. – P. 1796–1806.
32. Левицкий В. И. Возраст и происхождение китойского месторождения силлиманитовых сланцев (восточная Сибирь) / В. И. Левицкий [и др.] // ДАН. – 2010. – Т. 431, № 3. – С. 386–391.
33. Кременецкий А. А. Воронежская параметрическая скважина – новый этап познания глубинного строения ВКМ / А. А. Кременецкий [и др.] // Разведка и охрана недр. – 2006. – № 9–10. – С. 109–116.
34. Eby G. N. Chemical subdivision of the A-type granulites: petrogenetic and tectonic implications / G. N. Eby // Geology. – 1992. – V. 20. – P. 641–644.
35. Bonin B. A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects / B. Bonin // Lithos. – 2007. – V. 97. – P. 1–29.
36. Савко К. А. Петрохимия габбродолеритов восточной части Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко, В. Л. Бочаров // Известия вузов, геология и разведка. – 1988. – № 7. – С. 42–51.

Воронежский государственный университет

*К. А. Савко, заведующий кафедрой полезных ископаемых и недропользования, доктор геолого-минералогических наук, профессор
ksavko@mail.ru*

*Институт геологии и геохимии ИГГ УрО РАН,
г. Екатеринбург*

*В. В. Хиллер, научный сотрудник ИГГ УРО РАН,
кандидат геолого-минералогических наук
hilvervit@mail.ru*

Voronezh State University

*K.A. Savko, the head of the chair of Mineral Resource,
Doctor of the Geological and Mineralogical Sciences,
Professor
ksavko@mail.ru*

*The Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural
Branch, Ekaterinburg*

*V. V. Khiller, research worker, Candidate of the Geo-
logical and Mineralogical Sciences
hilvervit@mail.ru*

Возраст зонального метаморфизма пород воронцовской серии по данным датирования монацитов методом...

*Воронежский государственный университет
Н. С. Базиков, аспирант кафедры полезных иско-
паемых и недропользования
nickolasss@yandex.ru*

*Voronezh State University
N. S. Bazikov, post-graduate student, the chair of
Mineral Resource
nickolasss@yandex.ru*

*Институт геологии и геохимии ИГГ УрО РАН,
г. Екатеринбург
С. Л. Вотяков, директор ИГГ УРО РАН, доктор
геолого-минералогических наук, академик РАН
director@igg.uran.ru*

*The Institute of Geology and Geochemistry, RAS Ural
Branch, Ekaterinburg
S. L. Votyakov, the head of The Institute, Doctor of the
Geological and Mineralogical Sciences, the Academi-
cian of RAS
director@igg.uran.ru*