

ИТТРИЕВЫЕ МОНАЦИТЫ КУРСКО-БЕСЕДИНСКОГО ГРАНУЛИТОВОГО БЛОКА ВОРОНЕЖСКОГО КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МАССИВА: ТЕТРАД ЭФФЕКТ ФРАКЦИОНИРОВАНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В МЕТАОСАДОЧНЫХ ПОРОДАХ?

С. М. Пилюгин, А. Н. Конилов*

Воронежский государственный университет

*Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

Поступила в редакцию 1 марта 2013 г.

Аннотация. Богатые иттрием монациты были обнаружены в высокотемпературных метапелитовых гранулитах Курско-Бесединского блока Воронежского кристаллического массива. Они представлены мелкими включениями в породообразующих алюмосиликатах и практически всегда встречаются в виде сростков с ксенотимом. (Y)-монациты содержат до 8,5 мас. % Y_2O_3 и до 4,5 мас. % Gd_2O_3 , что является аномальным для областей гранулитового метаморфизма. При нормировании по хондриту содержаний LREE в (Y)-монацитах фиксируется положительная цериевая аномалия или, возможно, первая тетрада M-типа.

Ключевые слова: (Y)-монацит, цериевая аномалия, тетрад эффект, мезоархей, Курско-Бесединский гранулитовый блок, высокотемпературный метаморфизм.

Abstract. Rich yttrium monazite have been found in high-metapelitic granulites Kursk Besedino block of the Voronezh crystalline massif. They are small inclusions in rock-forming aluminosilicates and almost always occur as intergrowths with xenotime. (Y)-monazite contains up to 8.5 wt. % Y_2O_3 and up to 4.5 wt. % Gd_2O_3 , which is abnormal for granulite facies metamorphism. When normalizing chondrite LREE contents of elements in the (Y)-monazite fixed positive cerium anomaly or the first book M-type.

Key words: (Y)-monazite, cerium anomaly, tetrad effect, Mesoarchean, Kursk-Besedino granulite block, ultrahigh-temperature metamorphism

Курско-Бесединский блок (КББ), локализованный в центральной части Курской магнитной аномалии, является одним из двух гранулитовых блоков Воронежского кристаллического массива (ВКМ) (рис. 1). Он сложен архейскими породами, метаморфизованными в условиях гранулитовой фации (магнетитовые кварциты, глиноземистые железистые породы, метабазиты, метаультрабазиты и метапелиты), сохранившимися в виде реликтов среди мигматитов и гнейсов нерасчлененного обоянского комплекса, регрессивно перекристаллизованных преимущественно в амфиболитовой фации. Мезоархейский возраст (3277 ± 33 млн лет) пород гранулитового блока подтвержден U–Pb изохронным методом по циркону из разгнейсованного плагиогранита [1], прорывавшего магнетитовые кварциты.

В магнетитовых кварцитах региона ранее нами были обнаружены уникальные орто- и клинопи-

роксены со структурами распада, позволившие впервые определить ультравысокие температуры пикового метаморфизма пород оцениваемые ≥ 1000 °C [5].

Ассоциирующие с этими породами метапелиты после интенсивных ретроградных процессов не сохранили классических минералогических свидетельств (например, сапфирин-кварцевых парагенезисов) такого метаморфизма. Однако в них нами были обнаружены полевые шпаты со структурами распада, свидетельствующими о высоких температурах кристаллизации (960–1050 °C) [2], а также зафиксирован ряд высокотемпературных парагенезисов; например, контактирующие зерна низкоцинковой (< 3 мас. % ZnO) шпинели с кварцем и высокоглиноземистый (до 8 мас. % Al_2O_3) ортопироксен.

Изученные породные ассоциации метапелитов, как правило, содержат минералы-аксессуары (циркон, монацит, ксенотим), позволяющие при отсутствии каких-либо других минеральных сенсоров определить температуру, а также в некоторых слу-

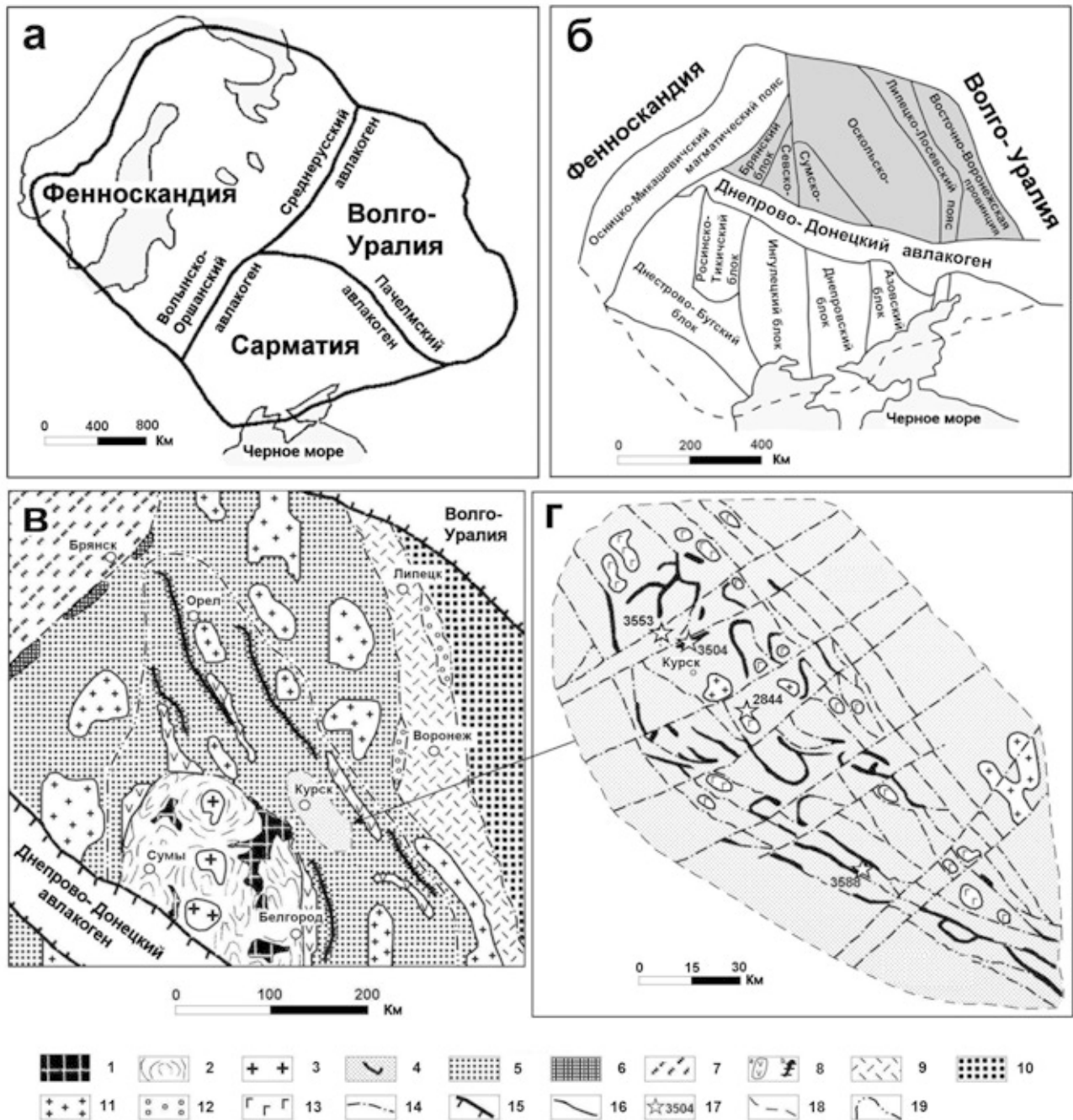


Рис. 1. а – три кристаллических сегмента Восточно-Европейского кратона [6]; б – кристаллические домены Сарматии [16]. Воронежский кристаллический массив (ВКМ) выделен темным цветом; в – схема геологического строения Воронежского кристаллического массива (по [16] с некоторыми изменениями); г – Курско-Бесединский блок ВКМ (район исследования). 1–6 – Архей: (1) зеленокаменные пояса; (2) тоналит-трондьемитовые гнейсы и гранитоиды; (3) поздние и посттектонические гранитоиды; (4) высокотемпературные метаморфические комплексы с железистыми формациями; (5) полиметаморфические образования обоянского комплекса (мигматиты и гнейсы с подчиненным количеством метабазитов), регрессивно метаморфизованные в амфиболитовой фации; (6) мафитовые интрузии (по геофизическим данным). 7–13 – Палеопротерозой: (7) гранулиты с возрастом 2.1 млрд лет; (8) вулканогенно-осадочные формации, в том числе: а) вулканогенные и осадочные породы и б) железисто-кремнистые формации; (9) метаморфизованные вулканоплутонические комплексы; (10) метаморфизованный терригенно-осадочный флишиодный комплекс; (11) поздние и посттектонические щелочные и полевошпатовые лейкократовые гранитоиды; (12) полимиктовые конгломераты, осадочно-вулканогенные и терригенные породы; (13) метагабброиды. 14 – Зоны глубинных разломов. 15 – Надвиговые зоны. 16 – Геологические границы. 17 – Местоположение скважин. 18 – Границы Курско-Бесединского блока. 19 – Район Курской магнитной аномалии

чаях и возраст метаморфических процессов. Ранее нами уже предпринимались попытки определения температуры метаморфизма по химическим составам монацит-ксенотимовых сростаний [3] и возраста метаморфизма методом CHIME [4]. Несмотря на столь детальное описание вещественного состава, физико-химических параметров метаморфизма метапелитовых гранулитов КББ ВКМ, редкоземельная (REE) минерализация в них до настоящего времени не была изучена. Настоящая работа призвана устранить этот пробел.

Нами были изучены акцессорные минералы из разрезов 5 скважин метапелитовых гранулитов КББ ВКМ. Метапелиты представлены гнейсами и мигматизированными гнейсами светло-серой и серой окраски, массивными или неяснополосчатыми, среднетоннозернистыми. Структура гранобластовая, лепидогранобластовая, порфиробластовая (за счет граната, достигающего размеров порядка 1 см) с признаками плавления. Основные минеральные ассоциации метапелитов: Qtz¹+Grt+Kfs+Crld+Sil+Spl+Bt+Mag (иногда с Pl, Plm, Py) и Qtz+Grt+Kfs+Opx+Spl+Crld+Bt+Py+Mag. Всего было исследовано 11 образцов (в среднем по 40 иногда до 120 анализов для каждого образца).

Отобранные образцы (керна скважин) исследовались в прозрачно-полированных шлифах и аншлифах на электронных микроскопах – Jeol 6380 LV, Jeol 6510 LV (ВГУ), CamScan 2300 (ИЭМ РАН). Состав акцессорных REE - содержащих минералов определялся с помощью энергодисперсионных анализаторов INCA 250, INCA 450, Bruker AXS. Условия анализа: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток зонда 1–10 нА, диаметр зонда (локальность анализа) 1–5 мкм, время набора рентгеновских спектров – 100 сек. Точность анализов систематически контролировалась по природным и синтетическим эталонам. В ряде случаев использовались низкие (10 кВ) ускоряющие напряжения с фокусировкой электронного пучка в области порядка 50 нм.

При детальном изучении пород в них были установлены следующие REE-содержащие минеральные фазы: 1) монацит; 2) ксенотим; 3) циркон; 4) REE апатит; 5) хаттонит; 6) чералит.

Монацит является наиболее распространенным акцессорным минералом в метапелитовых гранулитах Курско-Бесединского блока ВКМ. Монациты представлены зернами округлой овальной и вытянутой формы размером от 10–20 до 200 мкм (рис. 2а). Они встречаются преимущественно как

включения в различных метаморфических минералах – чаще всего в гранате, плагиоклазе, шинели. В некоторых случаях наблюдаются монациты мозаично-блокового строения, обусловленного вариациями концентраций урана, тория и свинца в пределах зерен (рис. 2б).

Ксенотимы представлены мелкими (до 50 мкм) кристаллами округлой формы, локализующимися в породообразующих силикатах (в основном в гранате) и часто образующими сростания с монацитами (рис. 2в).

Цирконы встречаются, как в виде отдельных зерен в матрице, так и принимают участие в реакционных структурах вместе с монацитом, ксенотимом и рутилом. В ходе исследования были обнаружены неоднородные многофазные зерна цирконов, замещенные в краевых частях цирколитом, а также зерна циркона содержащие мельчайшие включения уранинита (рис. 2г). Содержания REE в цирконах низкие (на уровне 100 ppm) и фиксируются только методами волнового рентгеноспектрального анализа.

REE апатит был обнаружен только в одном из образцов метапелитов в ассоциации с монацитом. По составу апатит фторхлористый с микро-концентрациями (ppm) редких земель.

Хаттонитовую и чералитовую минеральные фазы удалось идентифицировать только в каймах по крупным (50–100 мкм) кристаллам монацита (рис. 2д). В одном из образцов (скв. 3555 глубина 260 м.) были обнаружены необычные REE минералы представленные твердофазными растворами хаттонита и ксенотима. В кристаллах наблюдались выделения галенита (рис. 2е).

Наиболее представительные химические составы изученных REE минералов представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, монациты в сростаниях с ксенотимами характеризуются высокими концентрациями иттрия (от 5,87 до 8,5 мас.% Y₂O₃) и гадолиния (от 2,59 до 4,5 мас.% Gd₂O₃) при низких содержаниях лантана и церия (от 5,53 до 7,5 мас.% La₂O₃; от 18,25 до 20,2 мас.% Ce₂O₃) (табл. 1). Указанные значения являются аномальными для монацитов, и ранее были описаны только в высокотемпературных метаморфических породах Богемского массива [10]. Различия химических составов монацитов в сростках и в индивидуальных зернах хорошо иллюстрируется диаграммами составов в системах координат: Gd₂O₃/Y₂O₃ и La₂O₃/Ce₂O₃ (рис. 3; рис. 4). Отметим, что для сравнительного анализа нами были заимствованы составы монацитов из ряда типичных объектов докембрий-

¹ Символы минералов по [11]

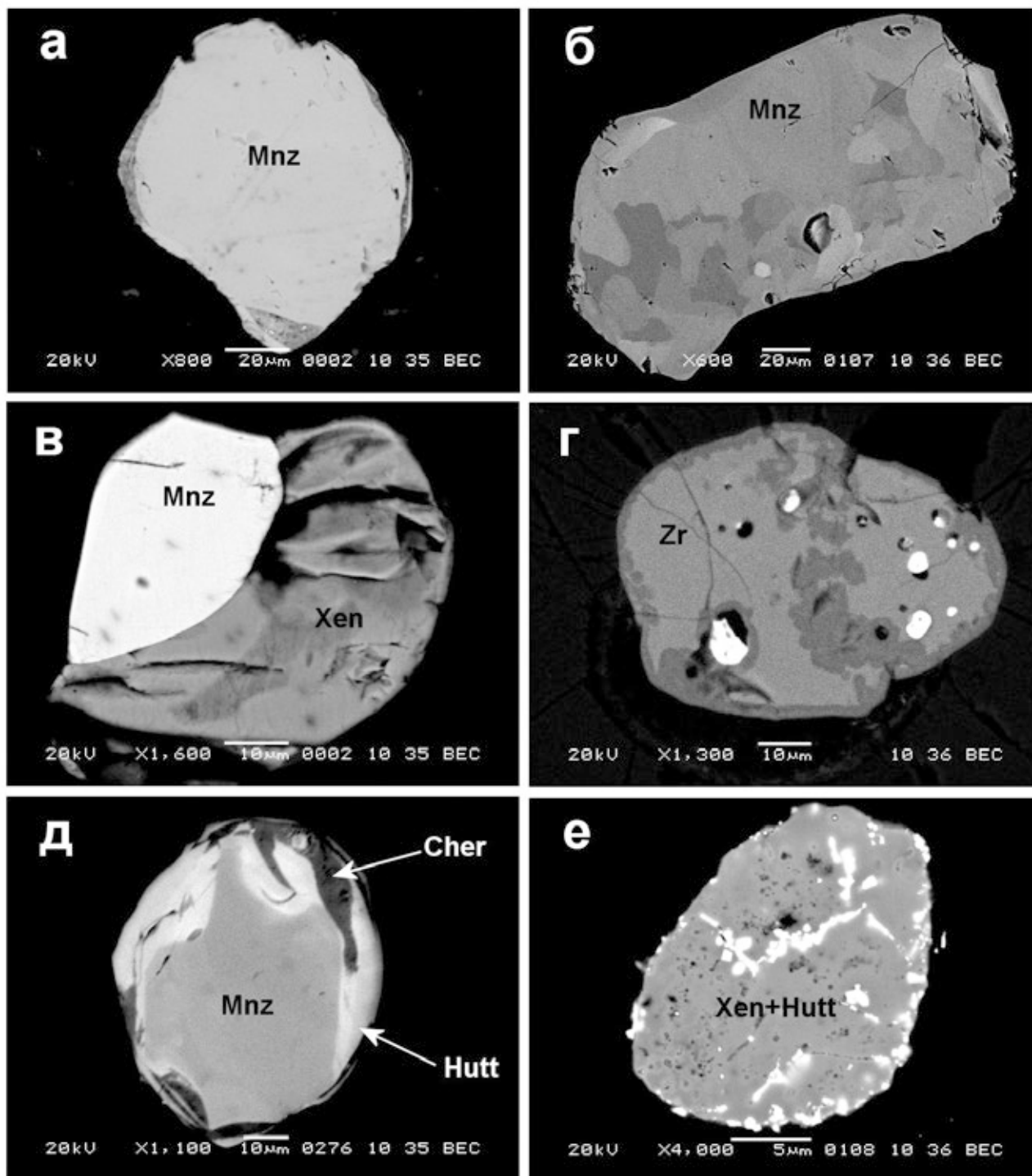


Рис. 2. Основные типы REE-минерализации в высокотемпературных метапелитах КББ ВКМ: а – округлое зерно монацита (Mnz); б – монацит мозаично-блокового строения; в – сросток монацита и ксенотима (Xen); г – округлое зерно циркона (Zr) по краям и в центре цирколитизированное (затемненные участки) и содержащее включения уранинита (белые пятна); д – монацит с каймами хаттонита (Hutt) и чералита (Cher); е – зерно твердого раствора хаттонита и ксенотима, содержащее включения галенита (белые пятна)

Таблица 1
Химические составы REE-минералов из высокотемпературных метapelитовых гранулитов Курско-Бесединского блока ВКМ

Образец	3554-167						3554-143					3555-206			
	Монацит			Ксенотим			Монацит	Монацит				Хаттонит	Чералит		
Минерал	Сросток с ксенотимом						Сросток с ксенотимом монацитом	Сросток с ксенотимом, рутилом и цирконом	Индивидуальное зерно					Хаттонит+	Ксенотим
Характеристика	Сросток с ксенотимом						Сросток с ксенотимом монацитом	Сросток с ксенотимом, рутилом и цирконом	Индивидуальное зерно					Хаттонит	Чералит
Номер анализа	2	3	4	13	18	7	7	7	14	17	18	19	5	34	5
La ₂ O ₃	6,77	6,14	5,93	5,53	7,42	< п. ч.	< п. ч.	6,28	14,39	16,18	16,48	16,21	8,05	4,64	< п. ч.
Ce ₂ O ₃	20,11	18,96	17,93	18,87	19,85	< п. ч.	< п. ч.	18,25	26,64	29,02	28,86	29,93	23,27	13,58	< п. ч.
Pr ₂ O ₃	1,99	2,57	2,52	2,33	2,04	< п. ч.	< п. ч.	2,68	2,85	2,33	2,73	2,15	3,48	1,75	< п. ч.
Nd ₂ O ₃	13,11	13,98	14,07	13,6	12,64	0,81	0,81	12,99	11,32	10,41	11,64	11,46	13,07	6,91	< п. ч.
Sm ₂ O ₃	2,87	2,54	4,13	3,54	3,21	1,19	1,19	3,37	1,39	1,71	1,93	1,2	1,83	< п. ч.	< п. ч.
Eu ₂ O ₃	< п. ч.*	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.
Gd ₂ O ₃	3,89	4,51	4,22	4,52	3,48	3,18	3,18	3,44	1,33	1,55	1,42	1,59	0,73	< п. ч.	1,76
Dy ₂ O ₃	1,56	2,34	2,24	2,47	2,25	7,18	7,18	2,66	1,29	0,7	0,96	0,97	0,47	< п. ч.	4,71
Er ₂ O ₃	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	3,39	3,39	< п. ч.	0,73	0,04	< п. ч.	0,99	0,42	< п. ч.	2,11
Y ₂ O ₃	7,38	7,71	8,56	7,88	7,51	45,81	45,81	6,03	< п. ч.	< п. ч.	0,53	< п. ч.	0,31	0,45	17,25
ThO ₂	5,01	5,3	4,5	4,35	5,43	< п. ч.	< п. ч.	5,06	5,44	4,04	4,1	2,95	18,62	25,22	42,83
UO ₂	1,88	1,33	1,85	2,17	1,17	1,37	1,37	2,74	1,32	0,52	0,57	0,08	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.
PbO	1,52	1,45	1,48	1,69	2,2	0,57	0,57	2,01	1,12	0,53	0,08	0,61	2,59	1,77	1,1
P ₂ O ₅	31,18	29,61	30,25	30,34	29,94	34,28	34,28	27,83	29,9	29,72	28,05	29,8	21,86	18,79	5,21
SiO ₂	0,4	0,46	0,41	0,38	0,4	< п. ч.	< п. ч.	0,13	0,8	0,5	0,36	0,4	4,25	5,52	18,24
CaO	1,79	2,01	1,72	1,75	1,4	0,2	0,2	1,86	1,15	1,04	0,8	0,93	0,55	9,55	0,75
Сумма	99,45	98,87	99,39	99,06	98,41	97,98	97,98	96,85	99,67	100,3	98,51	99,27	99,5	88,18	93,96

* - содержание элемента ниже порога чувствительности аналитического оборудования

ского гранулитового метаморфизма: Брянского блока ВКМ, метаморфических комплексов Исуа (Гренландия) [18] и Левизиан (Шотландия) [18], а также высокотемпературного комплекса Напиер (Антарктика) [8] (табл. 2).

Очевидно, что составы монацитов в сростаниях заметно обособляются от составов индивидуальных зерен: в системе координат Gd_2O_3 - Y_2O_3 фиксируется две области высоко иттриевых составов (рис. 3). Еще более четкое разделение на области существования составов наблюдаются в системе координат La_2O_3 - Ce_2O_3 . Причем, область составов высоко иттриевых монацитов имеет существенное смещение по отношению к «нормальному» распределению La/Ce в монацитах (рис. 4).

Такого рода смещения в распределении редкоземельных элементов могут быть следствием тетрад эффекта.

Тетрад эффект фракционирования REE – это нарушение формы спектра нормированных по хондриту содержаний редкоземельных элементов. Он выражается в разделении спектра на 4 группы (тетрады) с образованием зигзагообразной кривой: La-Ce-Pr-Nd, Pm-Sm-Eu-Gd, Gd-Tb-Dy-Ho и Er-Tm-Yb-Lu. Для каждой тетрады в спектре редких земель образуются небольшие изгибы, границы которых проходят между Nd и Sm, по Gd и между Ho и Er. Вторую тетраду (Pm-Gd) не учитывают в связи с минимумом европия и отсутствием прометия в земных условиях.

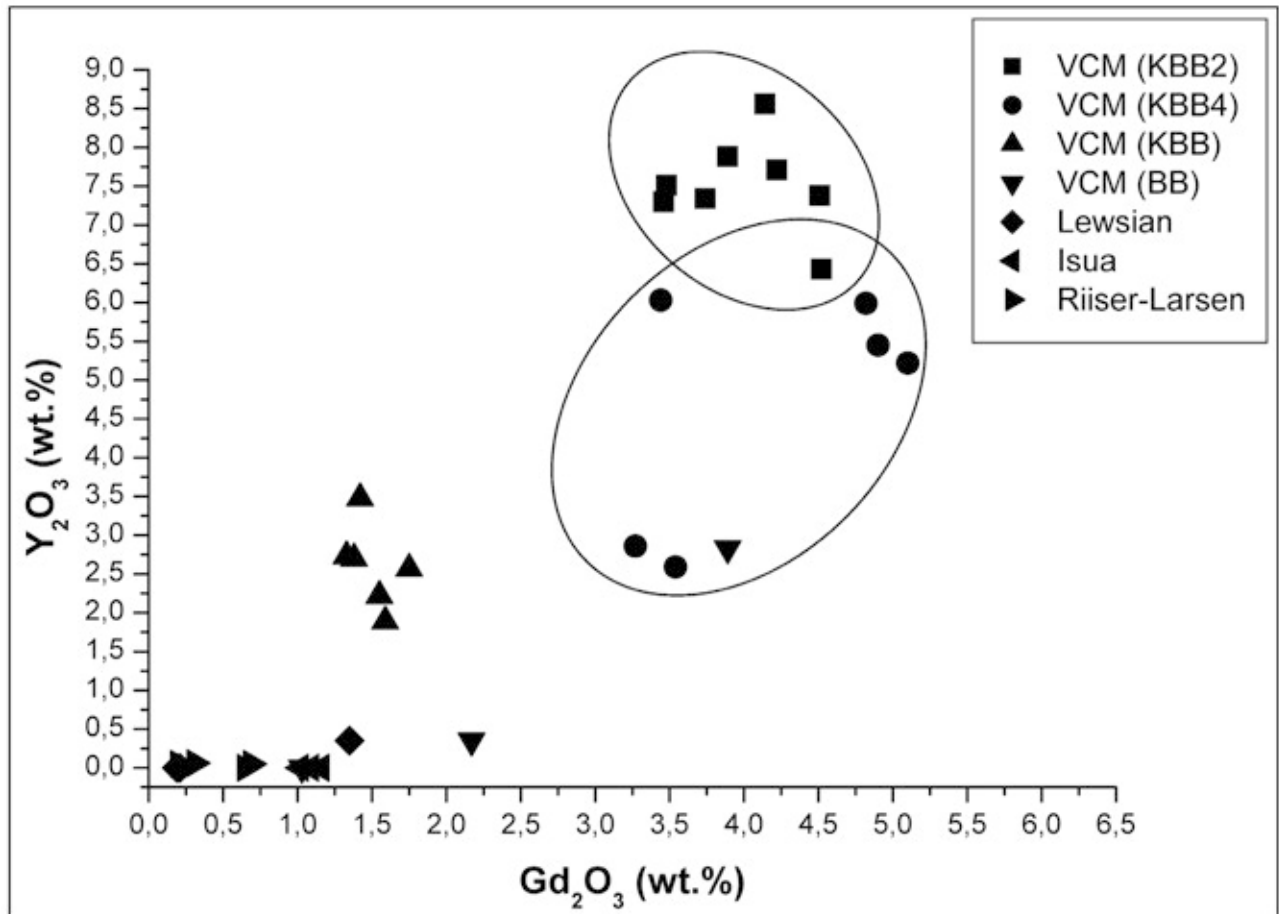


Рис. 3. Диаграмма составов монацитов из различных регионов проявления докембрийского гранулитового метаморфизма в координатах Gd_2O_3 - Y_2O_3 . Условные обозначения: КВВ2, КВВ4 – монацитовые сростания с ксенотимами (Курско-Бесединский блок); КВВ – индивидуальные зерна монацитов (Курско-Бесединский блок); ВВ – монациты из Брянского гранулитового блока; Lewisian – монациты Левизианского гранулитового пояса (Шотландия); Isua – монациты из метаморфических комплексов Исуа (Гренландия); Riiser-Larsen – монациты из высокотемпературных пород комплекса Напиер (Восточная Антарктика). Овалами выделены области иттриевых монацитов

Таблица 2

Химические составы монацитов из различных регионов проявления докембрийского гранулитового метаморфизма

Провинция	Брянский гранулитовый блок ВКМ**		Левизиан (Шотландия)***		Исуа (Гренландия)***		Комплекс Напиер (Антарктика)****						
	Монацит		Монацит		Монацит		Монацит						
Контакт	Индивидуальные зерна		Индивидуальные зерна		Индивидуальные зерна		Индивидуальные зерна						
Номер анализа	2В-7	3В-6	4В-2	М1-17	М5-D	М4-1	М1	М2	М1-17	М2-22	М3-27	М4-28	М5-32
La ₂ O ₃	12,55	16,04	13,78	15,29	14,81	13,56	15,3	15,33	14,36	14,93	13,59	14,23	15,17
Ce ₂ O ₃	28,08	31,78	30,45	31,21	33,46	29,89	29,05	29,16	32,37	31,96	32,33	32,37	32,2
Pr ₂ O ₃	2,62	2,96	2,66	3,57	3,8	3,42	3,39	3,48	2,98	2,97	3,17	3,14	2,99
Nd ₂ O ₃	12,48	11,72	12,63	13,84	15	11,9	15,07	14,68	10,78	11,52	11,3	11,23	11,64
Sm ₂ O ₃	2,48	0,54	2,03	2,02	1,45	0,86	2,63	2,57	0,97	1,69	0,85	1,09	1,71
Eu ₂ O ₃	1,38	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	0,31	0,28	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.
Gd ₂ O ₃	3,89	1,03	2,17	1,35	0,19	0,21	1,16	1,02	0,25	0,65	0,2	0,31	0,69
Dy ₂ O ₃	0,82	< п. ч.	0,7	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	0,74	0,13	0,13	0,15	0,13
Er ₂ O ₃	< п. ч.*	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.
Y ₂ O ₃	2,83	< п. ч.	0,35	0,35	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	< п. ч.	0,05	0,06	0,05
ThO ₂	2,25	1,93	2,61	1,65	< п. ч.	9,02	1,66	1,87	7,31	5,85	7,92	7,06	5,96
UO ₂	0,26	0,58	0,28	0,36	0,23	0,23	0,17	0,24	0,61	0,39	0,34	0,68	0,53
PbO	0,25	0,38	0,33	0,36	0,12	1,15	0,3	0,42	0,41	0,54	0,9	0,59	0,24
P ₂ O ₅	28,75	29,59	30,77	30,69	29,22	27,09	27,43	27,15	30,07	29,85	29,25	30,1	30,48
SiO ₂	0,29	0,44	0,54	0,1	0,27	0,71	0,22	0,35	1,19	0,78	1,19	0,92	0,62
CaO	0,73	0,56	0,69	0,57	0,2	1,47	0,41	0,58	1,3	1,07	1,3	1,32	1,16
Сумма	102,82	98,46	100,57	101,27	98,75	99,88	97,1	97,11	103,05	102,35	102,53	103,23	103,4

* – содержание элемента ниже порога чувствительности аналитического оборудования;

** – авторские данные;

*** – химические составы заимствованы у [18];

**** – химические составы заимствованы у [8].

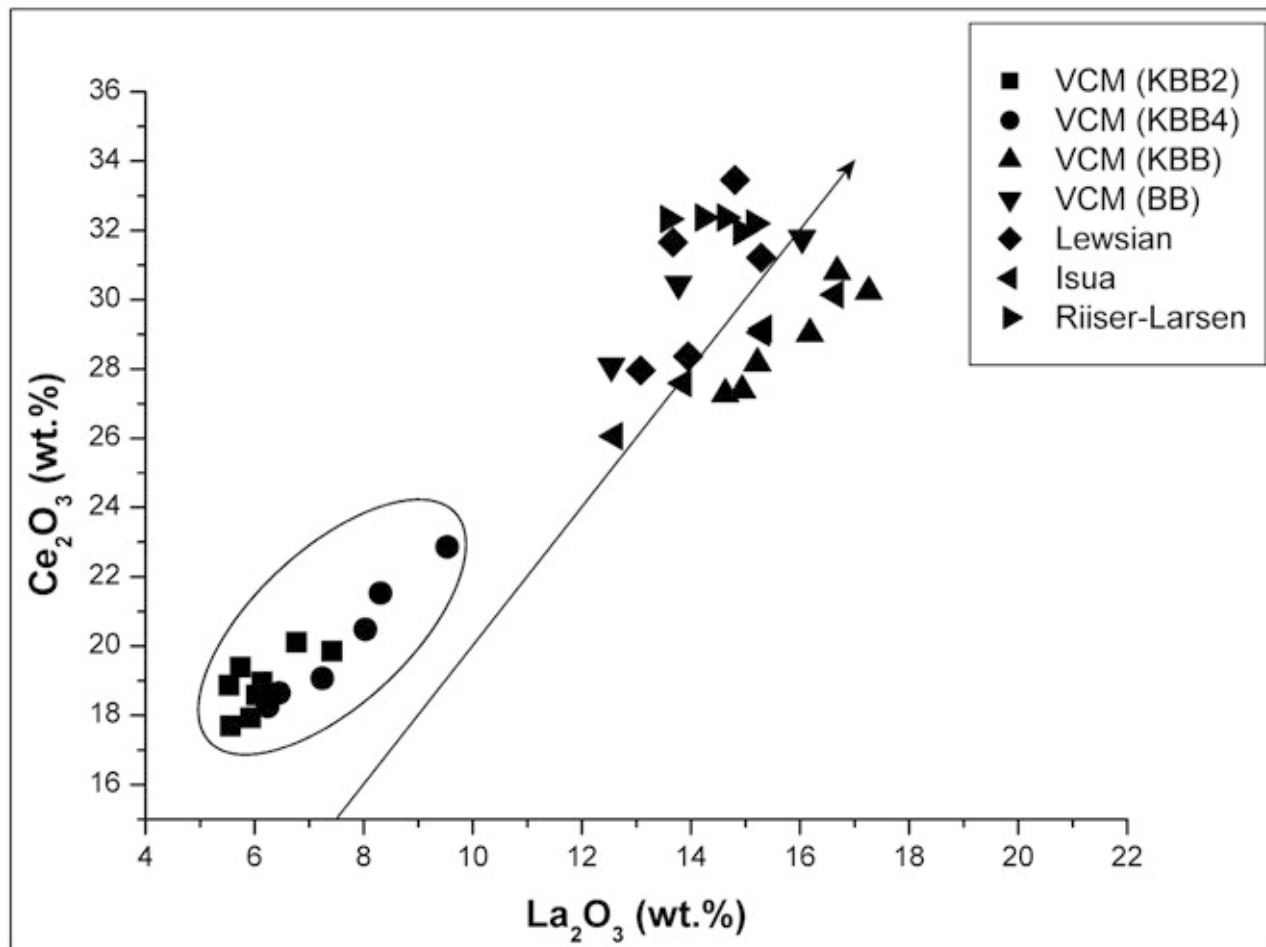


Рис. 4. Диаграмма составов монацитов из различных регионов проявления докембрийского гранулитового метаморфизма в координатах La_2O_3 - Ce_2O_3 . Условные обозначения те же, что и на рис. 3. Стрелкой показан «нормальный» тренд распределения La/Ce . Овалом выделена область иттриевых монацитов

А. Масуда с соавторами [13] выявил 2 типа тетрадного эффекта: W (вогнутая кривая распределения) и M (выпуклая кривая распределения REE). В морской воде, грунтовых водах, известняках, других осадочных породах обнаруживается W-тип тетрадного эффекта. Тетрад-эффект M-типа обнаруживается чаще всего в высоко эволюционированных гранитоидных системах на поздних стадиях дифференциации магм.

M-тип тетрадного эффекта по литературным данным выявлен в герцинских изменённых гранитах Кенигшайн (Германия) [7], в литий-фтористых гранитах и флюоритах Восточной Германии и Казахстана [9], в мезозойских литий-фтористых гранитах Южного, Юго-Восточного и Северо-Восточного Китая [13], в пегматитах и турмалиновых гранитах Южной Дакоты [17], в гранитоидах вблизи уранового месторождения Тоно (Япония) [15]. Несмотря на богатую историю изучения метаморфических комплексов тетрад эффект в них ранее не был описан.

С целью проверки предположения о наличии тетрад эффекта в высокометаморфизованных метапелитах КББ ВКМ, нами были нормированы по хондриту содержания REE элементов в изученных монацитах. На рис. 5 в области легких редких земель для иттриевых монацитов находящихся в сростаниях с ксенотимами фиксируется положительная цериевая аномалия или, возможно, первая тетрада M-типа. Третью и четвертую тетрады выделить не представляется возможным из-за низких содержаний тяжелых редких земель в монацитах. Для индивидуальных зерен монацитов никаких признаков изменения формы спектра не обнаружено.

В ксенотимах из сростаний фиксируется повышенное содержание диспрозия (до 7 мас.% Dy_2O_3) и эрбия (до 4 мас.% Er_2O_3) (табл. 1), что по аналогии с более ранними работами [12] может указывать на существование третьей и четвертой тетрад M-типа.

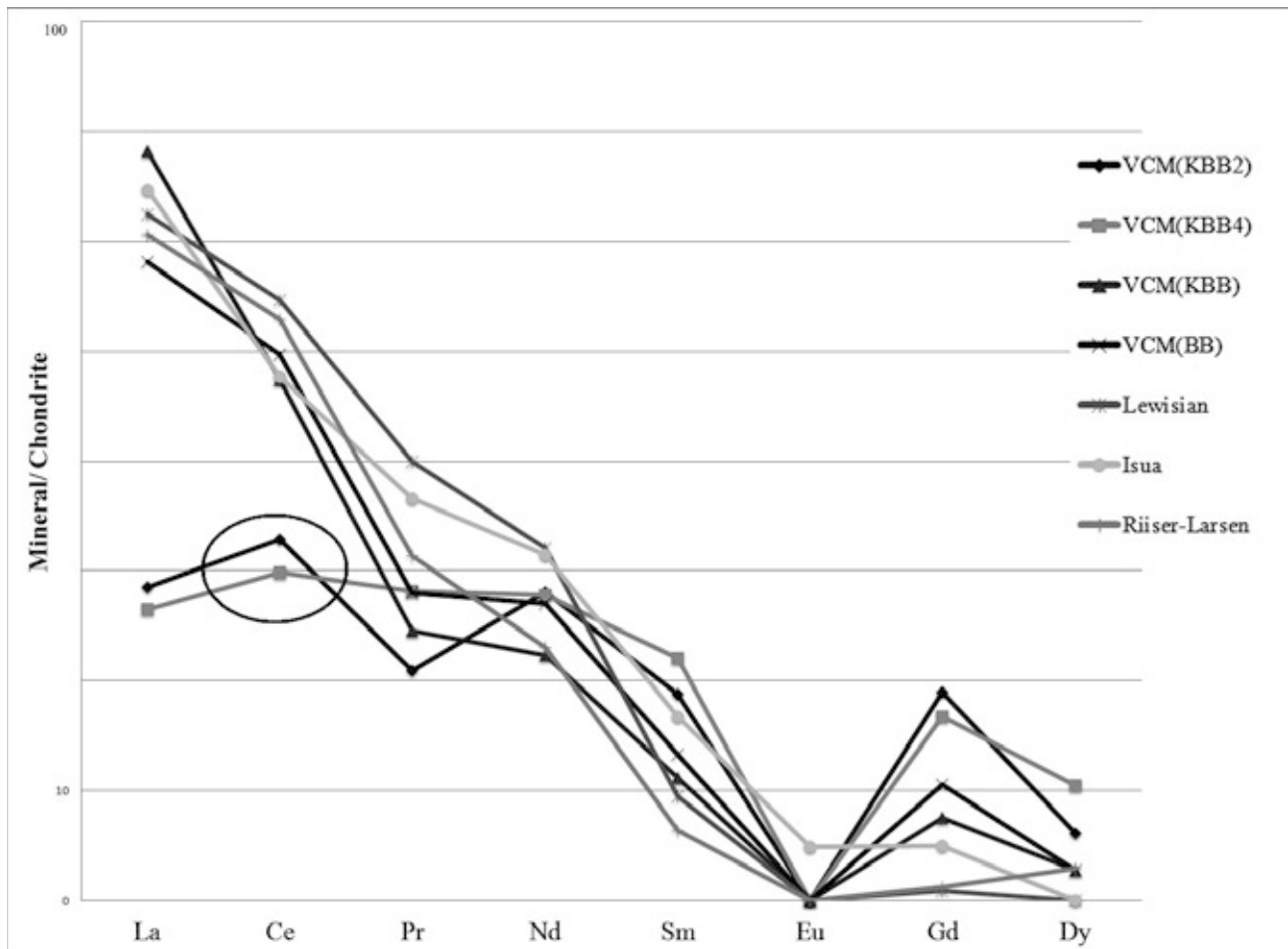


Рис. 5. Распределение редкоземельных элементов в монацитах из различных регионов докембрийского гранулитового метаморфизма, нормированное к хондриту. Для сростаний монацитов с ксенотимами (КБВ2, КБВ4) фиксируется положительная цериевая аномалия (выделенная овалом область)

Однако эти предположения пока носят гипотетический характер и их более надежное обоснование нуждается в дополнительных и детальных исследованиях комплексными, в том числе и геохимическими, методами.

Наличие цериевой аномалии в монацитах из сростков с ксенотимами может объясняться особыми условиями флюидного режима при ретроградном метаморфизме метапелитов. Установлено [14], что с падением температуры в монацитах снижается содержание иттрия за счет образования ксенотима, а также частично за счет высвобождения его в породообразующие силикаты (гранат). Этот процесс сопровождается интенсивной флюидной переработкой пород и дискретен по времени. Обнаруженные нами ранее реликтовые структуры распада полевых шпатов (антипертиты, мезопертиты, пертиты) свидетельствуют о наличии высокотемпературного этапа метаморфизма метапелитов. Последующие ретроградные преобразования привели к образованию новых минеральных ассо-

циаций, реакционных кайм и структур (например, REE – апатита, кварц-кордиеритовых кайм).

Таким образом, сростания монацита с ксенотимом могут рассматриваться как реликты высокотемпературного метаморфизма метапелитов КБВ, а индивидуальные зерна, образовались, по-видимому, при падении температуры на ретроградных этапах метаморфизма. Этим, вероятно и объясняются различия в химическом составе монацитов, а также наличие цериевой аномалии в монацит-ксенотимовых сростках.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (Проект № 14. В37.21.0609); Президента РФ (Проект МК-722.2013.5).

ЛИТЕРАТУРА

1. Артеменко Г. В. Палеоархейский возраст ультраметаморфических плагиогранитоидов Курско-Бесединского блока (Воронежский кристаллический массив) /

- Г. В. Артеменко, И. А. Швайка, Е. А. Татарина // Геологический журнал. – 2006. – № 1. – С. 145–178.
2. *Пилюгин С. М.* Ультравысокие (≥ 1000 °С) температуры пикового метаморфизма метапелитов Воронежского кристаллического массива (Курско-Бесединский гранулитовый блок) по данным полевошпатовой термометрии / С. М. Пилюгин, В. И. Фонарев, К. А. Савко // ДАН. – 2009. – № 5. – С. 660–663.
3. *Пилюгин С. М.* Монацит-ксенотимовая термометрия гранулитовых комплексов докембрия / С. М. Пилюгин, К. А. Савко, А. Н. Конилов // Материалы конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика Д. С. Коржинского. Физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи. – М., 2009. – С. 316–317.
4. *Савко К. А.* Новые данные о возрасте гранулитового метаморфизма Курско-Бесединского блока Воронежского кристаллического массива / К. А. Савко [и др.] // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Серия: Геология. – 2009. – № 1. – С. 84–93.
5. *Fonarev V. I.* Exsolution Textures of ortho- and clinopyroxene in high-grade BIF of the Voronezh Crystalline Massif: Evidence of ultrahigh-temperature metamorphism // *J. metamorphic Geol.* – 2006. – V. 24. – P. 135–151.
6. *Gorbatshev R.* Frontiers in the Baltic Shield / R. Gorbatshev, S. Bogdanova // *Precambrian Res.* – 1993. – V. 64. – P. 3–22.
7. *Hetcht L.* Mineralogical and geochemical characteristics of hydrothermal alteration and episyenitization in the Künigshain granites, northern Bohemian Massif, Germany / L. Hetcht [et al.] // *Int. J. Earth Sci.* – 1999. – V. 88. – P. 236–252.
8. *Hokada T.* Electron microprobe technique for U-Th-Pb and REE chemistry of monazite, and its implications for pre-, peak- and postmetamorphic events of the Lutzow-Holm Complex and the Napier Complex, East Antarctica / T. Hokada, Y. Motoyoshi // *Polar Geosci.* – 2006. – V. 19. – P. 118–151.
9. *Jahn B.* Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wodue and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China / B. Jahn [et al.] // *Lithos.* – 2001. – V. 59. – P. 171–198.
10. *Krenn E.* Unusually Y-rich monazite-(Ce) with 6–14 wt.% Y_2O_3 in a granulite from the Bohemian Massif: implications for high temperature monazite growth from the monazite-xenotime miscibility gap thermometry / E. Krenn, F. Finger // *Mineralogical Magazine.* – 2010. – V. 74 (2). – P. 217–225.
11. *Kretz R.* Symbols for rock-forming minerals / R. Kretz // *Amer. Miner.* – 1983. – V. 68. – P. 277–279.
12. *Masau M.* Dysprosian xenotime-(Y) from the Annie Claim granitic pegmatite, southeastern Manitoba, Canada: Evidence of the tetrad effect? / M. Masau, P. Cerny, R. Chapman // *Can. Mineral.* – 2000. – 38. – № 4. – P. 899–905.
13. *Masuda A.* Lanthanide tetrad effects in nature: two mutually opposite types W and M / A. Masuda // *Geochem. J.* – 1987. – V. 21. – P. 110–124.
14. *Mahan K.* Dating metamorphic reactions and fluid flow: application to exhumation of high- P granulites in a crustal-scale shear zone, western Canadian Shield / K. Mahan // *Journal of Metamorphic Geology.* – Volume 24, issue 3 (April 2006). – P. 193–217.
15. *Parnell J.* Geofluids: Geolog. Society / J. Parnell. – 1994. – № 78. – 291 p.
16. *Shchipansky A. A.* The Sarmatian crustal segment: Precambrian correlation between the Voronezh Massif and the Ukrainian Shield across the Dniepr-Donets Aulacogen / A. A. Shchipansky, S. V. Bogdanova // *Tectonophysics.* – 1996. – V. 268. – P. 109–125.
17. *Wu Fu-Y.* A-type granites in Northeastern China: age and geochemical constraints on their petrogenesis / Fu-Y. Wu [et al.] // *Chem. Geol.* – 2002. – V. 187. – P. 143–173.
18. *Zhu X. K.* Monazite chemical composition: some implications for monazite geochronology / X. K. Zhu, R. K. O’Nions // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1999. – V. 137. – P. 351–363.

Воронежский государственный университет
С. М. Пилюгин, старший преподаватель кафедры
полезных ископаемых и недропользования
Тел. 8 (473) 220-86-26
geoscience@yandex.ru

Институт экспериментальной минералогии РАН
А. Н. Конилов, научный сотрудник
Тел. 8 (495) 951-04-43
konilov@iem.ac.ru

Voronezh State University
S. M. Pilugin, senior teacher department mineral
resource
Tel. 8 (473) 220-86-26
geoscience@yandex.ru

Institute of Experimental Mineralogy RAS
A. N. Konilov, research worker
Tel. 8 (495) 951-04-43
konilov@iem.ac.ru