

Микроструктуры ударной деформации и возраст монацита-(Ce) из предполагаемой импактной структуры Ярва-варака (Кольский полуостров, Россия)

Каулина Т.В.¹, Шиловских В.В.², Нерович Л.И.¹, Лялина Л.М.¹, Сосновская М.А.¹

¹ Геологический институт КНЦ РАН, Апатиты, kaulina@geoksc.apatity.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, vvshlvskh@gmail.com

Аннотация. Описаны микроструктуры деформации в монаците-(Ce) из диатектических гранитов предполагаемой импактной структуры Ярва-варака на Кольском полуострове. Используя дифракцию обратно-рассеянных электронов в монаците-(Ce) были установлены деформационные двойники по оси [100] и пластически-деформированные домены с максимальной разориентировкой до 10°. Также обнаружены неомобласти – новообразованные участки локальной перекристаллизации, сохраняющие ориентировку исходного зерна и пересекающие двойники и пластически-деформированные домены. Подобные деформационные признаки в монаците известны в импактных структурах Вредефорт (Африка) и Яррабубба (Австралия). Методом химического датирования определен возраст кристаллизации монацита-(Ce) – 2690 млн. лет и возраст наложенных гидротермальных процессов – 1690–1680 млн. лет. Датирование неомобластов, которые должны отражать возраст ударного метаморфизма планируется в ближайшее время.

Ключевые слова: монацит-(Ce), импактные структуры, расслоенные интрузии, Мончегорский рудный район.

Shock deformation microstructures and age of monazite-(Ce) from the presumably impact Jarva-varaka structure (Kola Peninsula, Russia)

Kaulina T.V.¹, Shilovskih V.V.², Nerovich L.I.¹, Lialina L.M.¹, Sosnovskaya M.A.¹

¹ Geological Institute of Kola Science Centre RAS, Apatity, kaulina@geoksc.apatity.ru

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg, vvshlvskh@gmail.com

Abstract. Deformation microstructures in monazite-(Ce) from diatectite granites of the presumably impact Järva-varaka structure on the Kola Peninsula are described. Back-scattered electron diffraction maps revealed the presence of deformation twins along the [100] axis and plastically deformed domains with a maximum misorientation of up to 10°. Newly formed areas of recrystallization (neoblasts) were also found. They retain the orientation of the original grain and intersect twins and plastically deformed domains. Similar deformation features in monazite are known from the Vredefort (Africa) and the Yarrabubba (Australia) impact structures. Chemical dating determined the monazite-(Ce) crystallization age of 2690 Ma and 1690–1680 Ma age of the late hydrothermal processes. Dating of neoblasts, which should reflect the age of impact metamorphism, is planned in the near future..

Keywords: monazite-(Ce), impact structures, layered intrusions, Monchegorsk ore district.

Введение

Небольшой по размеру (1.7×2.2 км) палеопротерозойский расслоенный массив Ярва-варака расположен в Мончегорском рудном районе Кольского полуострова и сложен мафитовыми и фельзитовыми норитами, гиперстеновыми и пижонит-авгитовыми диоритами, кварцевыми диоритами и гранодиоритами. По сравнению с другими расслоенными интрузиями Кольского региона массив Ярва-варака сравнительно малоизучен. Результаты изучения, проведенного сотрудниками Геологического института КНЦ РАН с 2013 года, показали сходство массива Ярва-варака по породным ассоциациям, петрохимическим и геохимическим свойствам пород со структурой Садбери, образование которой связывают с импактным событием (Нерович и др., 2015). Имеющиеся на сегодняшний день определения возраста пород массива Ярва-варака составляют 2.55-2.5 млрд. лет и массив, возможно, является самой древней импактной структурой мира (Kaulina et al., 2020). Признаки палеопротерозойского импактного события в породах (конусы дробления) вряд ли могли сохраниться, хотя и удалось найти фрагмент псевдотахилитовой брекчии (Нерович и др., 2020). Гораз-

до лучше следы ударного воздействия сохраняются в аксессуарных минералах (цирконе, монаците и др. – Reimold et al., 2002; Wittmann et al., 2006; Erickson et al., 2016 и др.). К настоящему времени были обнаружены следующие индикаторы ударного метаморфизма в породах обрамления и массива Ярва-варака: диаплектовые стекла циркона, плагиоклаза и силлиманита (Каулина и др., 2017); псевдотахилитовая брекчия с грис-структурой (брекчия в брекчии); полосы смятия в биотите и клиноцоизите; планарные структуры в кварце (Нерович и др., 2020). Не все полученные данные однозначно указывают на импактное происхождения массива Ярва-варака, поскольку многие из вышеприведенных признаков характерны и для эндогенных событий (French and Koeberl, 2010).

В настоящей статье мы приводим результаты изучения монацита-(Ce), выделенного из биотитовых диатектических гранитов, слагающих группу субпластовых тел, мощностью до 1 м, субсогласных с гнейсовидностью вмещающих глиноземистых гнейсов обрамления массива Ярва-варака. Монацит описан в нескольких ударных структурах: Хаутон (Канада), Арагуайна (Бразилия), Вредефорт (Южная Африка) как минерал, сохраняющий признаки ударного метаморфизма (Erickson et al., 2016 и ссылки там).

Методика изучения монацита

Изучение внутреннего строения индивидов монацита в обратно-рассеянных электронах (BSE) и качественный анализ состава включений в них проводились на электронном сканирующем микроскопе LEO-1450 с энергодисперсионной приставкой XFlash-5010 Bruker Nano GmbH. Определение химического состава монацита проводилось на электроннозондовом микроанализаторе Cameca MS-46 (EMPA – electron microprobe analyses) в Геологическом институте КНЦ РАН, г. Апатиты.

Картирование индивидов монацита методом дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) проводилось в ресурсном центре «Геомодель» Научного парка СПбГУ (Санкт-Петербург). Перед EBSD-анализом для получения максимально плоской поверхности зерна монацита были отполированы, на завершающей стадии проводилось травления ионами Ag в течение 10 минут (Oxford IonFab 300). EBSD картирование проводилось на сканирующем электронном микроскопе Hitachi S-3400N с детектором EBSD Oxford HKL Nordlys при ускоряющем напряжении 30 кВ, токе пучка 2 нА; карты дифракции накапливались с экспозицией 90 миллисекунд на точку с шагом 200–330 нм. Для определения ориентации кристаллов по линиям Кикучи применялось программное обеспечение Oxford Instruments AZtecHKL с использованием кристаллических структур монацита из базы данных ICSD (9001647) после перевода из представления P1 21/n 1 в представление P1 21/c 1.

Результаты

Зерна монацита-(Ce), размером 150–200 мкм, выделенные из биотитовых гранитов, имеют субизометричную форму и характеризуются внутрифазовой неоднородностью, связанной с различием в составе и наблюдаемой на BSE изображениях в виде светло-серых, серых и темно-серых пятен (рис. 1). Химический состав монацит-(Ce) приведен в таблице 1. В светло-серых участках (рис. 1, а) устанавливается ритмичная зональность с идиоморфными контурами зон, что позволяет рассматривать её как первичную, ростовую зональность. Серые участки (анализы 1а, 8а, 10а) отличаются от темно-серых очень низким (ниже порога обнаружения) содержанием урана, более низким содержанием свинца, диспрозия и кальция, и более высоким содержанием лантана.

Включения кварца, апатита, биотита и калиевого полевого шпата предполагают образование монацита-(Ce) на стадии кристаллизации гранитов. Возраст монацита, определенный классическим U-Pb (ID-TIMS) методом, составляет 2706 ± 10 млн. лет (Сосновская, 2021), что говорит об образовании диатектических гранитов одновременно с метаморфизмом гнейсов кольской серии (2.6–2.7 млрд. лет – Levchenkov et al., 1995).

Результаты EBSD картирования показали, что некоторые зерна монацита имеют деформационную микроструктуру, рассечены двойниками, развернутыми на 180° и состоят из доменов с не-

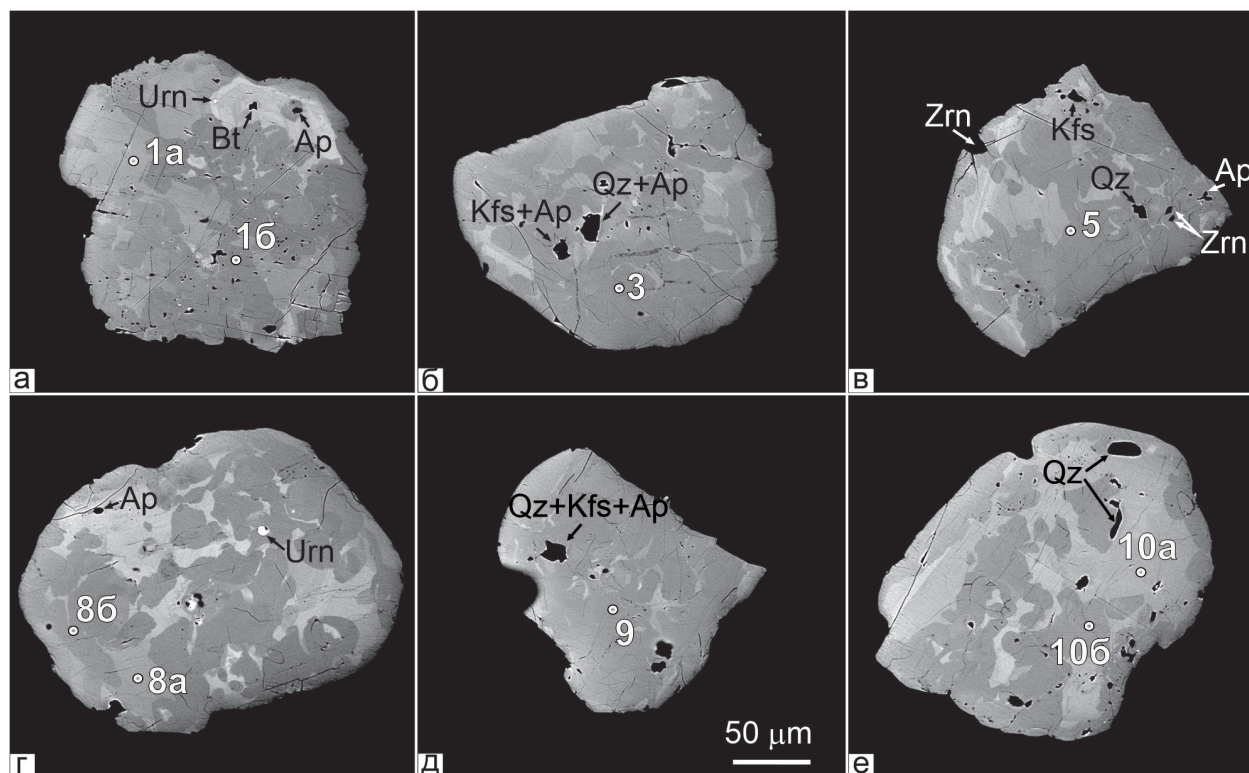


Рис. 1. Монацит-(Ce) из диатектических гранитов Ярва-вараки. SEM. BSE изображение с точками микрозондовых анализов. Стрелками показаны минеральные включения уранинита (Urn), биотита (Bt), калиевого полевого шпата (Kfs), кварца (Qz), апатита (Ap), циркона (Zrn). Масштабная линейка 50 мкм показана на рисунке 1д.
Fig. 1. Monazite-(Ce) from diatectite granites of the Järva-varaka structure. SEM. BSE image with points of microprobe analyses. Arrows show mineral inclusions of uraninite (Urn), biotite (Bt), potassium feldspar (Kfs), quartz (Qz), apatite (Ap) and zircon (Zrn). Scale bar – 50 µm is presented in Fig. 1d.

значительно различающейся кристаллографической ориентировкой (рис. 2). На картах контраста полос (карты качества дифракции – рис. 2, а, г, ж) хорошо видны границы двойников и субзерен.

Карты внутризерновых разориентировок (кристаллопластических деформаций) показывают незначительный разброс доменов относительно средней ориентировки зерна (рис. 2, б, д, з). Отмечено до 11 субдоменов с различными ориентировками с максимальным разворотом до 10° (рис. 2б). Двойники образуются по оси [100] (красные границы на рис. 2 б, д, з). Также обнаружены неспецифически ориентированные домены (черные границы на рис. 2 ж, з), которые, скорее всего, являются новообразованными участками (необластами), поскольку они не деформированы. Внутри таких субзерен не наблюдается деформационных или иных малоугловых границ, при этом необласты пересекают границы двойников и пластически-деформированных доменов. Они интерпретируются как результат локальной перекристаллизации. Показано, что необласты являются характерной чертой ударной деформации, образуются синхронно с ней и определяют ее возраст (Erickson et al., 2016). Полученные картины пластических деформаций и двойников в монаците Ярва-вараки напоминают аналогичные картины в ударно-деформированном монаците импактных структур Вредефорт в южной Африке и Яррабубба в западной Австралии (Erickson et al., 2016; 2020). С другой стороны, наличие только одной системы двойников может отвечать либо тектонической деформации монацита (Erickson et al., 2015), либо меньшему ударному давлению.

Незакономерные области с различной интенсивностью в BSE – серые и темно-серые участки – связаны вероятно с гидротермальными процессами. Они накладываются на двойники и участки разориентации (рис. 2, в, е, и), что говорит о более поздних процессах по отношению к ударному событию.

Таблица 1. Химический состав монацита-(Ce).
 Table 1. Chemical composition of monazite-(Ce).

Компоненты	Номер анализа								
	1a	1b	3	5	8a	8b	9	10a	10b
P ₂ O ₅	26.51	29.29	28.95	30.20	27.50	27.59	29.04	28.98	30.05
SiO ₂	0.65	0.12	0.10	0.11	0.66	0.05	0.11	0.89	0.26
ThO ₂	6.04	5.06	4.87	5.75	5.45	5.54	5.22	6.39	6.73
UO ₂	0.00	0.86	1.26	0.83	0.00	0.96	1.68	0.00	1.03
Y ₂ O ₃	0.78	2.04	2.28	1.39	2.42	0.74	2.01	1.04	2.14
La ₂ O ₃	17.31	15.90	16.31	15.53	18.20	15.12	15.21	16.20	14.67
Ce ₂ O ₃	31.61	28.99	28.39	28.23	28.77	31.22	28.17	29.96	27.65
Pr ₂ O ₃	3.11	2.49	2.24	2.43	2.82	2.51	2.57	2.30	2.27
Nd ₂ O ₃	9.44	8.59	8.53	8.46	9.03	8.53	8.57	8.57	8.59
Sm ₂ O ₃	1.45	1.62	1.17	1.16	1.47	1.36	1.40	1.18	1.29
Gd ₂ O ₃	1.18	1.22	1.19	1.09	1.10	1.15	1.29	0.92	1.14
Dy ₂ O ₃	0.27	0.48	0.49	0.27	0.17	0.57	0.50	0.26	0.48
CaO	0.85	1.71	1.89	2.01	0.91	1.78	1.93	1.09	2.00
PbO	0.83	1.21	1.29	1.32	0.82	1.25	1.45	0.94	1.38
Сумма	100.02	99.56	98.97	98.77	99.32	98.36	99.15	98.70	99.66
Коэффициенты в формуле (O=4)									
P	0.93	0.98	0.98	1.00	0.94	0.96	0.98	0.97	0.99
Si	0.03	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.04	0.01
Сумма	0.95	0.99	0.98	1.01	0.97	0.96	0.99	1.01	1.00
Th	0.06	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06
U	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01
Y	0.02	0.04	0.05	0.03	0.05	0.02	0.04	0.02	0.05
La	0.26	0.23	0.24	0.23	0.27	0.23	0.22	0.24	0.21
Ce	0.48	0.42	0.42	0.41	0.43	0.47	0.41	0.44	0.40
Pr	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03
Nd	0.14	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12
Sm	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Gd	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
Dy	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Pb	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01
Ca	0.04	0.07	0.08	0.09	0.04	0.08	0.08	0.05	0.08
Сумма	1.09	1.04	1.05	1.00	1.06	1.07	1.04	1.00	1.01

Расчет возраста отдельных участков монацита-(Ce) по EMPA содержанию U, Th и Pb (Kato et al., 1999; Вотьяков и др., 2013) дал два возраста. Возраст 2690 млн лет, полученный по ThO₂*–PbO изохроне для серых в BSE участков, согласуется с ID-TIMS возрастом монацита-(Ce). Для этих же участков по UO₂*–PbO изохроне получен более древний возраст – 2890 млн. лет, отражающий негетерогенное распределения урана в пределах зерна. Темно-серые в BSE участки имеют возраст по изохронам 1690 и 1680 млн. лет, отражающий наложенные гидротермальные процессы. Надо отметить, что при разном локальном возрасте отдельных участков монацита-(Ce), валовое ID-TIMS датирование определяет близконкордантный U–Pb возраст, что говорит о минимальных потерях радиогенного свинца. То есть диффузия свинца в пределах кристаллической решётки монацита-(Ce) происхо-

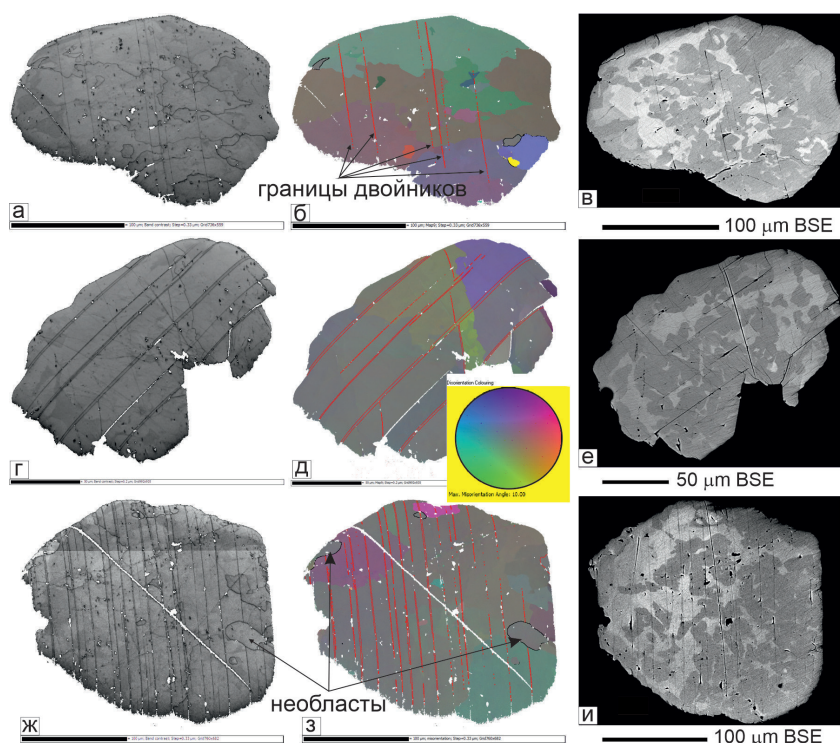


Рис. 2. Монацит-(Ce) из диатектических гранитов Ярва-вараки с признаками ударной деформации. Карты контраста полос (качества дифракции) – а, г, ж. Карты внутризерновых разориентировок (б, д, з) показывают отклонение доменов относительно средней ориентировки зерна. Максимальная интенсивность окраски соответствует максимальной разориентировке до 10° . Красные линии – границы двойников, черные – границы неспецифически ориентированных доменов (необласты). BSE изображения (в, е, и).

Fig. 2. Monazite-(Ce) from diatectitic granites of Järva-varaka with signs of impact deformation. Fringe contrast maps (diffraction quality) – a, d, g. Maps of intragrain misorientations (b, e, h) show the distortion of domains relative to the average grain orientation. The maximum color intensity corresponds to a maximum misorientation of 10° . Red lines are boundaries of twins, black lines are boundaries of nonspecifically oriented domains (neoblasts). BSE images – c, f, i.

дила без существенного выноса свинца за пределы зерен, что характерно для достаточно кратковременных событий.

Обычно зерна монацита сохраняют возраст породы и не отражают возраст ударного метаморфизма. Напротив, необласты монацита, образованные путем динамической перекристаллизации, отражают возраст деформации (Erickson et al., 2015) и могут датировать импактное событие (Moser, 1997; Tohver et al., 2012). Мы, к сожалению, еще не датировали необласты, и эта задача ближайшего будущего.

Выводы

В монаците-(Ce) из диатектических гранитов, расположенных в глиноземистых гнейсах обрамления массива Ярва-варака, обнаружены двойники и пластически деформированные домены, которые могут указывать на ударную деформацию.

Двойники образованы по оси [100], максимальная разориентировка отдельных доменов достигает 10° . Также обнаружены новообразованные участки перекристаллизации (необласты), которые пересекают двойники и пластически-деформированные домены.

Локальное химическое датирование монацита-(Ce) определило возраст его кристаллизации в 2690 млн. лет, что согласуется с U-Pb ID-TIMS возрастом (2706 ± 10 млн. лет) и отражает время кристаллизации диатектических гранитов; возраст 1690–1680 млн. лет отражает поздние гидротермальные процессы, проявленные в монаците-(Ce).

Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра «Геомодель» Научного парка СПбГУ в рамках темы НИР № АААА-А19-119100290148-4 (FMEZ-2022-0025).

Литература

1. Вотьяков С.Л., Щапова Ю.В., Хиллер В.В. Кристаллохимия и физика радиационно-термических эффектов в ряде U-Th-содержащих минералов как основа для их химического микрозондового датирования. Екатеринбург. 2011. 336 с.
2. Каулина Т.В., Нерович Л.И., Бочаров В.Н., Лялина Л.М., Ильченко В.Л., Кунаккузин Е.Л., Касаткин И.А. Рамановская спектроскопия импактного циркона из расслоенного массива Ярва-варака (Мончегорский рудный район, Кольский полуостров) // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20. № 1/1. С. 72–82. DOI:10.21443/1560-9278-2017-20-1/1-72-82.
3. Нерович Л.И., Баянова Т.Б., Кунаккузин Е.Л., Базай А.В., Некипелов Д.А. Новые результаты геолого-петрографического и петро-геохимического изучения расслоенного массива Ярва-Варака (Мончегорский рудный район) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2015. 12. С. 141–146.
4. Нерович Л.И., Ильченко В.Л., Каулина Т.В., Базай А.В., Кунаккузин Е.Л., Мудрук С.В., Борисенко Е.С., Сосновская М.А. Первая находка псевдотахилитовой брекчии и другие признаки ударного метаморфизма в породах обрамления массива Ярва-варака (Мончегорский рудный район) // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2020. 17. С. 384–389. <https://doi.org/10.31241/FNS.2020.17.073>.
5. Сосновская М.А. Возраст монацита из биотитовых гнейсов обрамления массива Ярва-варака (Мончегорский рудный район, Кольский регион) // Материалы XXXII молодежной научной школы-конференции «Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии». 2021. С. 160–162.
6. Erickson T.M., Pearce M.A., Taylor R.J.M., Timms N.E., Clark C., Reddy S.M., Buick I.S. Deformed monazite yields high-temperature tectonic ages // *Geology*. 2015. V. 43. P. 383–386. doi: 10.1130/G36533.1.
7. Erickson T.M., Cavosie A.J., Pearce M.A., Timms N.E., Reddy S.M. Empirical constraints on shock features in monazite using shocked zircon inclusions // *Geology*. 2016. V. 44 (8). P. 635–638.
8. Erickson T.M., Kirkland C.L., Timms N.E., Cavosie A.J., Davison T.M. Precise radiometric age establishes Yarrabubba, Western Australia, as Earth's oldest recognized meteorite impact structure // *Nature communications*. 2020. V. 11. 300 p. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13985-7>.
9. French B.M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why // *Earth-Science Reviews*. 2010. V. 98. P. 123–170.
10. Kato T., Suzuki K., Adachi M. Computer program for the CHIME age calculation // *J. Earth Planet*. 1999. V. 46. P. 49–56.
11. Kaulina T.V., Nerovich L.I., Il'chenko V.L., Lialina L.M., Kunakkuzin E.L., Ganninbal M.A., Mudruk S.V., Elizarov D.V., Borisenko E.S. Astroblems in the early Earth history: Precambrian impact structures of the Kola-Karelian region (East Baltic shield). In: *Geological and Geo-Environmental Processes on Earth*. Springer Natural Hazards. Springer, Singapore. 2021. P. 25–37. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4122-0_3
12. Levchenkov O.A., Levsky L.K., Nordgulen Ø., Dobrzhinetskaya L.F., Vetrin V.R., Cobbing J., Nilsson L.P., Sturt B.A. U-Pb zircon ages from Sörvaranger, Norway and the western part of the Kola Peninsula, Russia // *Nor. Geol. Unders. Special. Publ.* 1995. V. 7. P. 29–47.
13. Reimold, W.U., Leroux, H., Gibson, R.L. Shocked and thermally-metamorphosed zircon from the Vredefort impact structure, South Africa // *European Journal of Mineralogy*. 2002. V. 14. P. 859–868.
14. Wittmann A., Kenkmann T., Schmitt R. T., and Stöffler D. Shock-metamorphosed zircon in terrestrial impact craters // *Meteoritics & Planetary Science*. 2006. V. 41(3). P. 433–454.