

**МИНЕРАЛОГИЯ, КРИСТАЛЛОГРАФИЯ. ГЕОХИМИЯ, ГЕОХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОИСКОВ
ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ / MINERALOGY, CRYSTALLOGRAPHY. GEOCHEMISTRY, GEOCHEMICAL
METHODS OF PROSPECTING FOR MINERALS**

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.58>

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ МАССИВНЫХ, ЖИЛЬНЫХ И ФРАГМЕНТНЫХ РАСПЛАВНЫХ
ИМПАКТИТОВ КАРСКОЙ АСТРОБЛЕМЫ ПО ДАННЫМ ИСП-МС**

Научная статья

Зубов А.А.^{1,*}, Шумилова Т.Г.²

¹ORCID : 0000-0002-5377-5315;

²ORCID : 0000-0002-1772-3606;

^{1,2} Институт геологии им. академика Н.П. Юшкина ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (alexander.zubov.1994[at]gmail.com)

Аннотация

Проведены исследования типов расплавных импактитов Карской астроблемы — массивных, жильных и фрагментных тел, имеющих свою специфичную геологическую позицию в астроблеме и индивидуальные текстурно-структурные особенности. В работе приводится анализ геохимической специфики выделенных разновидностей расплавных импактитов по данным масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. В целом, петрохимический состав расплавных импактитов различается слабо. При этом анализ распределения редкоземельных химических элементов (РЗЭ) для всех типов расплавных импактитов показывает преобладание лёгких по отношению к тяжёлым РЗЭ, в ряду La-Lu установлено единообразие вещественного состава. Для массивных тел средние содержания тяжёлых РЗЭ (Gd-Lu) заметно занижены по отношению к жильным и фрагментным телам. Фрагментные тела по ряду элементов La-Er характеризуются несколько повышенными содержаниями по отношению к массивным и жильным разновидностям.

Ключевые слова: расплавные импактиты, Карская астроблема, геохимия импактитов, массивные тела, жильные тела, фрагментные тела.

**GEOCHEMICAL SPECIFICS OF MASSIVE, VENAL, AND FRAGMENTAL MELT IMPLACTITES OF THE KARA
ASTROBLEM ACCORDING TO ICP-MS DATA**

Research article

Zubov A.A.^{1,*}, Shumilova T.G.²

¹ORCID : 0000-0002-5377-5315;

²ORCID : 0000-0002-1772-3606;

^{1,2} Institute of Geology of Komi Science Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russian Federation

* Corresponding author (alexander.zubov.1994[at]gmail.com)

Abstract

The types of melt impactites of the Kara astroblem — massive, veinal and fragmentary bodies with their specific geological position in the astroblem and individual textural and structural specifics are examined. The work presents an analysis of the geochemical specificity of the isolated varieties of melt impactites according to the data of inductively coupled plasma mass spectrometry. In general, the petrochemical composition of melt impactites differs slightly. Analysis of the distribution of rare-earth chemical elements (REE) for all types of melt impactites shows the predominance of light relative to heavy REE, in the range of La-Lu established uniformity in the material composition. For massive bodies, the average content of heavy REE (Gd-Lu) is significantly underestimated in relation to the veinal and fragment bodies. Fragment bodies in the range of elements La-Er are characterized by slightly higher content in relation to the massive and veinal varieties.

Keywords: melt impactites, Kara astroblem, geochemistry of impactites, massive bodies, veinal bodies, fragment bodies.

Введение

Карская астроблема является одной из крупнейших астроблем известных на Земле, её диаметр ~65 км, возраст ~70 млн. лет [1], [2], [3]. Астроблема приурочена к Карскому синклинорию и частично к северо-восточной окраине Пай-Хойской антиклинория. В результате различных механизмов трансформации пород мишени при импактиогенезе формируется большое разнообразие импактитов. Расплавные импактиты представляют особый интерес, так как образуются из импактного расплава благодаря наиболее высоким Р-Т условиям преобразования вещества мишени в точке контакта ударника с породами мишени, достигающим 30000 °С и давления до первых сотен ГПа [4]. Минералогия кристаллических и некристаллических веществ, образующихся в ходе импактогенеза, имеет фундаментальное значение, что подтверждается многочисленными работами отечественных и зарубежных исследователей.

Изучением массивных и жильных тел расплавных импактитов на р. Анарога занимались В.Л. Масайтис, М.С. Мащак, Селивановская Т.В., Б.А. Мальков, В.Л. Андреев и другие. Ими были описаны морфология тел, текстурно-структурные характеристики, петрохимические особенности, цветовая характеристика, степень кристалличности [1], [4], [5], [7]. В ходе комплексных исследований в структуре аморфной матрицы расплавных жильных импактитов на р.

Кара был обнаружен коэсит, что позволило их отнести к ультравысокотемпературным высокотемпературным образованиям [8], [9], [10]. Ранее было выяснено, что стекла Карской и Усть-Карской астроблем, под которыми предыдущие исследователи подразумевали жильные и фрагментные тела, а также продукты их девитрификации, не различаются по вещественному составу [11]. Но выделялись разновидности согласно их спектроскопическим особенностям [12], цветовым характеристикам и содержанию воды [13]. Расплавные импактиты Карской астроблемы, представленные фрагментами солидифицированного импактного расплава в зювитах, являются наименее изученными.

Выполнение данного исследования обусловлено необходимостью выявления геохимической специфики трёх типов расплавных импактитов – массивных, жильных и фрагментных тел, имеющих принципиально разную геологическую позицию и различающиеся по условиям солидификации.

Методы и каменный материал

Каменный материал был отобран из естественных обнажений в долинах рр. Кара, Анарога, Кердорсашор и Хановей-Яха в ходе геологических экспедиций 2015, 2017 и 2020 гг. Предварительные аналитические исследования при помощи оптической микроскопии, рентгенодифракционного анализа и электронной микроскопии проведены на базе центра коллективного пользования «Геонаука» (Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар). Порошковые пробы трёх типов расплавных импактитов в количестве 21 шт. были проанализированы методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) при помощи прибора Thermo Fisher Scientific X Series 2 в ЦКП «Физико-химические исследования горных пород и минералов» (ИГ ФИЦ Кар НЦ РАН, г. Петрозаводск).

Основные результаты

Согласно современной международной классификации [14], расплавные импактиты подразделяются на расплавные импактиты *богатые обломками*, *бедные обломками* и *безобломочные*, а также их вариации с разным содержанием аморфной компоненты. В нашем случае массивные тела представлены всеми тремя вариантами содержания обломочной компоненты. Жильные и фрагментные тела относятся к безобломочной разновидности.

Массивные тела присутствуют на рр. Кара и Анарога (рис. 1а). Видимая мощность выходов достигает 8–10 м. Порода характеризуется коричнево-рыжей окраской, гладкой поверхностью с раковистым изломом и острыми сколами. По трещиноватости массивных тел наблюдается обильное развитие гидроксидов железа, придающее бурый оттенок поверхности монолитных блоков. Матрикс представлен смесью аморфной и кристаллической компонент, где последняя является преимущественно криптористаллическим полевошпатовым агрегатом тёмно-серо-коричневого цвета, содержащим угловатые, часто частично оплавленные обломки пород мишени. Пористость в данных телах крайне неоднородна.

Жильные тела с коэситом необычны своей формой нахождения и условиями образования [8], [9], [10]. В коренных выходах зювитов массивного облика на правом и левом берегах р. Кара недалеко от устья руч. Тогорей расположены жильные тела (стёкла) (рис. 1б). Цвет массива серовато-коричневый. Главной особенностью данных зювитов на р. Кара является присутствие большого количества жильных тел, которые носят секущий характер по отношению к вмещающему их зювиту. Жильные образования образуют маломощные вытянутые извилистые тела, как правило, мощностью 2–3 см с раздувами до 10 см. Они формируют штокверкоподобную систему субвертикального направления. Цвет стёкол преимущественно серый, серый с фиолетовым и розоватым оттенком, иногда чёрный.

Фрагментные тела присутствуют в зювитах и по-разному представлены в пределах обнажений на рр. Кара, Анарога, Кердорсашор и Хановей-Яха (рис. 1в). Размеры фрагментов, как правило, варьируют в пределах первых десятков сантиметров в поперечнике. Наиболее широко распространены в обнажениях импактитов на рр. Кара, Анарога, Путью, Хановей-Яха, реже встречаются на руч. Кердосашор. Расплавные фрагменты довольно однотипны морфологически и представлены в коренных обнажениях в видимом сечении различными формами – от субизометричной до существенно удлинённых тел (с удлинением в несколько раз превышающим размеры поперечника). По цветовым характеристикам различаются светло-серые, серые, светло-коричневые, коричневые и ярко бурые фрагменты расплавных импактитов. В некоторых случаях на периферии фрагментов отмечается область ассимиляции обломков из вмещающего зювита.

Среди рассматриваемых трёх типов тел расплавных импактитов выделяется несколько разновидностей по преобладающей в них минеральной компоненте и степени кристалличности – преимущественно стекловатые (главным образом жильные тела и некоторые фрагменты), преимущественно смектитовые (некоторые фрагменты) и с плотной матрицей представленной преимущественно криптористаллическим полевошпатовым агрегатом. Матрица жильных тел с коэситом сложена алюмосиликатной компонентой альбитового состава.

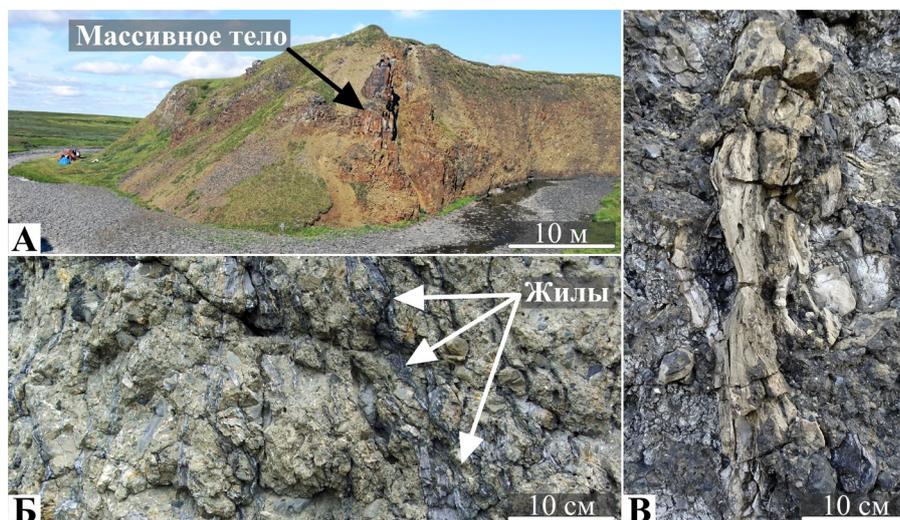


Рисунок 1 - Тела трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы в естественных обнажениях:

А – массивное тело на р. Анарога; Б – жильное тело на р. Кара; В – фрагментное тело на р. Анарога

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.58.1>

Петрохимическая характеристика расплавных импактитов производилась при помощи площадных анализов энергодисперсионной спектроскопией. **Массивные тела** имеют следующий вещественный состав (вес. %, среднее по 5 образцам): Na₂O - 3.13, MgO - 3.2, Al₂O₃ - 16.73, SiO₂ - 53.97, K₂O - 2.98, CaO - 4.08, TiO₂ - 0.92, Cr₂O₃ - 0.21, FeO (общ.) - 4.66 при стандартном отклонении: Na₂O - 0.25, MgO - 0.75, Al₂O₃ - 1.11, SiO₂ - 2.12, K₂O - 0.7, CaO - 0.27, TiO₂ - 0.13, Cr₂O₃ - 0.04, FeO (общ.) - 1.28. **Жильные тела** (вес. %, среднее по 4 образцам): Na₂O - 2.47, MgO - 4.29, Al₂O₃ - 14.42, SiO₂ - 54.61, SO₃ - 0.33, K₂O - 1.95, CaO - 2.98, TiO₂ - 0.87, FeO (общ.) - 5.42, BaO - 0.42 при стандартном отклонении: Na₂O - 0.58, MgO - 0.71, Al₂O₃ - 1.02, SiO₂ - 3.06, SO₃ - 0.12, K₂O - 0.32, CaO - 0.47, TiO₂ - 0.16, FeO (общ.) - 0.74, BaO - 0.14. **Фрагментные тела** (вес. %, среднее по 7 образцам): Na₂O - 2.8, MgO - 3.54, Al₂O₃ - 14.7, SiO₂ - 46.35, SO₃ - 0.49, K₂O - 3.06, CaO - 2.32, TiO₂ - 0.78, FeO (общ.) - 4.33, MnO - 0.39 при стандартном отклонении: Na₂O - 0.73, MgO - 1.19, Al₂O₃ - 2.43, SiO₂ - 6.6, SO₃ - 0.31, K₂O - 0.78, CaO - 0.85, TiO₂ - 0.15, FeO (общ.) - 1.53, MnO - 0.15.

Геохимическая характеристика. Распределения химических элементов редкоземельной группы (La-Lu), нормированные на хондрит C1 [15], при усреднении значений для каждого типа расплавного импактита указывают на их схожесть (см. рис. 2). В целом, для всех типов отмечается преобладание лёгких РЗЭ по отношению к тяжёлым. При этом, для массивных тел средние содержания тяжёлых РЗЭ (Gd-Lu) заметно занижены по отношению к жильным и фрагментным телам, а по ряду элементов La-Er для фрагментных тел отмечается некоторое превышение по отношению к двум другим типам тел.

Абсолютные значения содержаний РЗЭ в трёх типах тел расплавных импактитов указывают на следующие особенности (табл. 1).

1) Массивные и жильные тела по средним абсолютным значениям содержаний РЗЭ (ppm) очень близки по всем элементам кроме Ce, Dy, Er, Yb, в то время как фрагментные тела обладают большим разбросом значений для ряда La, Ce, Pr, Nd, Sm, Gd, Dy, Er, Yb.

2) Минимальными отклонениями значений содержания РЗЭ обладают массивные тела, наибольшими – жильные тела (средние значения для стандартного отклонения по всем РЗЭ элементам в зависимости от типа тел: массивные – 0.4 ppm, жильные – 0.9 ppm, фрагментные – 1.4 ppm).

3) Зависимость химического состава по РЗЭ элементам от географического места положения образцов ни для одного из типов расплавных импактитов не наблюдается – массивные тела на левом и правом берегах р. Кара, а также на р. Анарога обладают близким составом.

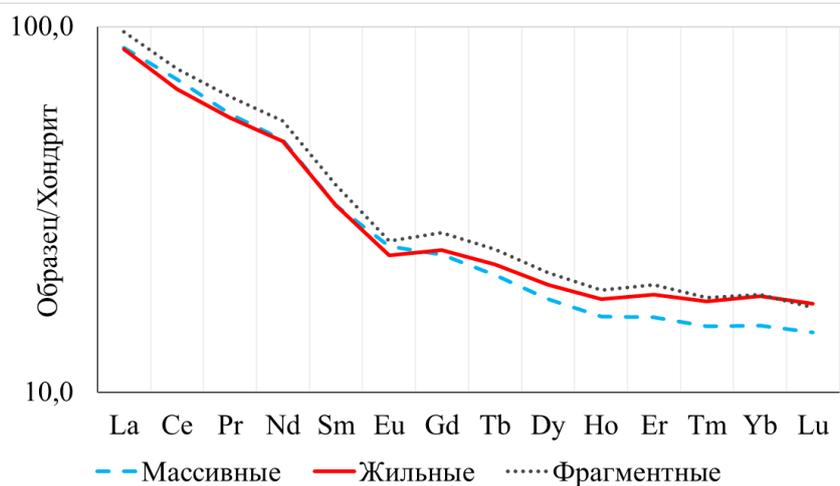


Рисунок 2 - Геохимический профиль трёх типов расплавных импактитов Карской астроблемы по средним значениям РЗЭ, нормированных по хондриту С1
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.58.2>

Таблица 1 - Усредненные содержания РЗЭ для массивных, жильных и фрагментных расплавных импактитов Карской астроблемы (ppm)

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.58.3>

Тип тела	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
М Ср. знач	20,6	44,4	5,4	22,6	4,9	1,4	4,8	0,8	4,5	0,9	2,6	0,4	2,4	0,4
М Ст. отк л.	1,0	1,7	0,3	1,0	0,2	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0	0,2	0,0
М Мин знач	18,9	42,3	5,0	21,3	4,6	1,4	4,6	0,8	4,3	0,8	2,4	0,4	2,3	0,3
М Мак с. знач	21,4	46,4	5,6	24,1	5,2	1,5	5,0	0,8	4,8	1,0	2,9	0,4	2,7	0,4
Ж Ср. знач	20,4	41,9	5,3	22,4	4,9	1,4	4,9	0,8	4,9	1,0	3,0	0,4	2,9	0,4
Ж Ст. отк л.	2,2	5,8	0,5	1,9	0,4	0,1	0,4	0,1	0,3	0,1	0,2	0,0	0,3	0,0
Ж Мин знач	16,7	33,9	4,5	19,4	4,3	1,2	4,2	0,7	4,4	0,8	2,6	0,4	2,6	0,4

Ж Мак с. знач.	23,0	50,1	5,9	24,6	5,4	1,5	5,4	0,9	5,3	1,1	3,3	0,5	3,3	0,5
Ф Ср. знач.	22,8	47,7	6,0	25,4	5,5	1,5	5,5	0,9	5,3	1,1	3,2	0,5	3,0	0,4
Ф Ст. откл.	4,2	7,8	0,9	3,4	0,7	0,2	0,7	0,1	0,7	0,1	0,4	0,1	0,4	0,1
Ф Мин. знач.	17,9	38,7	5,0	21,8	4,7	1,2	4,5	0,7	4,2	0,8	2,6	0,4	2,4	0,3
Ф Мак с. знач.	31,3	60,4	7,6	31,9	6,9	1,9	6,9	1,1	6,7	1,3	3,8	0,6	3,7	0,5

Примечание: Примечание: ср. знач. – среднее по нескольким образцам (количество образцов указано в разделе Петрохимическая характеристика); мин. знач. – минимальное значение; макс. знач. – максимальное значение; ст. откл. – стандартное отклонение; М – массивные тела, Ж – жильные тела, Ф – фрагментные тела

Заключение

Исследованные типы расплавных импактитов характеризуются весьма близким петрохимическим составом. Наблюдается также аналогия в содержании геохимических компонентов. При этом, для всех типов расплавных импактитов отмечается преобладание лёгких РЗЭ по отношению к тяжёлым. Средние содержания тяжёлых РЗЭ (Gd-Lu) для массивных тел заметно занижены по отношению к жильным и фрагментным телам. По элементам ряда La-Er для фрагментных тел отмечается превышение по отношению к двум другим типам тел. Таким образом однотипные петрохимический и микрокомпонентный геохимический составы массивных, жильных и фрагментных тел расплавных импактитов Карской астроблемы указывают на близость их вещественного состава в целом, что указывает на возможный однотипный характер протолита с формированием сингенетичного импактного расплава. Полученные результаты могут быть использованы для сопоставления с геохимическими характеристиками пород мишени для выяснения специфики протолита расплавных импактитов Карской астроблемы.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90065

Благодарности

Авторы выражают благодарность Е.М. Тропникову за помощь в получении данных площадных микрозондовых анализов.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The reported study was funded by RFBR, project number № 20-35-90065

Acknowledgement

The authors express their gratitude to E.M. Tropnikov for their help in obtaining the data of area microprobe analyses.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Масайтис В.Л. Геология астроблем / В.Л. Масайтис, А.Н. Данилин, М.С. Мащак – Л.: Недра, 1980. – 231 с.
2. Мащак М.С. Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя / М.С. Мащак – Л.: Наука, 1990. – 191 с.
3. Tieloff M. The age of the Kara impact structure, Russia. / M. Tieloff, A. Deutsch, E.K. Jessberger // Meteoritics & Planetary Science. – 1998. – № 33. – р. 361-372. – DOI: 10.1111/j.1945-5100.1998.tb01640.x
4. Вишневский С.А. Астроблемы / С.А. Вишневский – Новосибирск: Нонпарель, 2007. – 288 с.

5. Фельдман В.И. Импактиогенез / В.И. Фельдман, Л.И. Глазовская – М.: КДУ : Университетская книга, 2018. – 154 с.
6. Мальков Б.А. Алмазоносные тагамиты Карской астроблемы. / Б.А. Мальков, В.Л. Андричев // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. – 2010. – № 3.
7. Селивановская Т.В. Импактные брекчии и импаكتиты Карской и Усть-Карской астроблем / Т.В. Селивановская, М.С. Мащак, В.Л. Масайтис – Л.: Наука, 1990. – 191 с.
8. Shumilova T.G. Discovery of Upper-Going Intrusive Complex of Ultrahigh Pressure Impact Melt Glasses in Kara Astrobleme. / T.G. Shumilova, A.A. Zubov, S.I. Isaenko // 81st Annual Meeting of The Meteoritical Society. – 2018. – 2067.
9. Shumilova T. Spectroscopic features of ultrahigh-pressure impact glasses of the Kara astrobleme. / T. Shumilova, V. Lutoev, S. Isaenko et al. // Scientific Reports. – 2018. – № 8. – DOI: 10.1038/s41598-018-25037-z
10. Shumilova T.G. Mysterious long-living ultrahigh pressure or secondary impact crisis. / T.G. Shumilova, A.A. Zubov, S.I. Isaenko et al. // Scientific Reports. – 2020. – 10:2591. – DOI: 10.1038/s41598-020-59520-3
11. Badjukov D.D. Impact glasses from the Kara and Ust-Kara structures. / D.D. Badjukov, M.A. Nazarov, I.V. Suponeva // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference. – 1989. – № 20.
12. Сазонова Л.В. Связь внутреннего строения и условий залегания плавленных стекол Карского метеоритного кратера. / Л.В. Сазонова, Н.Н. Никишина // Космохимия метеоритов, Луны и планет; – Киев: Наук. думка, 1980. – с. 45-55.
13. Гурович Ж.Г. Водосодержащие стекла Карского взрывного кратера. / Ж.Г. Гурович // Проблемы геологии Тимано-Североуральского сегмента литосферы; – Сыктывкар: Институт геологии Коми научного центра РАН, 1993.
14. Stöffler D. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. / D. Stöffler, C. Hamann, K. Metzler // Meteoritics & Planetary Science. – 2017. – № 53. – DOI: 10.1111/maps.12912
15. Lyubetskaya T. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance. / T. Lyubetskaya, J. Korenaga // Journal of Geophysical Research . – 2007. – № 112. – DOI: 10.1029/2005JB004223

Список литературы на английском языке / References in English

1. Masajtis V.L. Geologiya astroblem [Geology of astroblemes] / V.L. Masajtis, A.N. Danilin, M.S. Mashhak – L.: Nedra, 1980. – 231 p. [in Russian]
2. Mashhak M.S. Impaktny'e krateri' na rubezhe mezozoya i kajnozoya [Impact craters at the boundary of the Mesozoic and Cenozoic] / M.S. Mashhak – L.: Nauka, 1990. – 191 p. [in Russian]
3. Trieloff M. The age of the Kara impact structure, Russia. / M. Trieloff, A. Deutsch, E.K. Jessberger // Meteoritics & Planetary Science. – 1998. – № 33. – p. 361-372. – DOI: 10.1111/j.1945-5100.1998.tb01640.x
4. Vishnevskij S.A. Astroblemy' [Astroblemes] / S.A. Vishnevskij – Novosibirsk: Nonparel', 2007. – 288 p. [in Russian]
5. Fel'dman V.I. Impaktitogenez [Impactogenesis] / V.I. Fel'dman, L.I. Glazovskaya – М.: КДУ : Universitetskaya kniga, 2018. – 154 p. [in Russian]
6. Mal'kov B.A. Almazonosny'e tagamity' Karskoj astroblemy' [Diamond-bearing tagamites of the Kara astrobleme]. / B.A. Mal'kov, V.L. Andreichev // Vestnik Instituta geologii Komi NCz UrO RAN [Bulletin of the Institute of Geology, Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]. – 2010. – № 3. [in Russian]
7. Selivanovskaya T.V. Impaktny'e brekchii i impaktity' Karskoj i Ust'-Karskoj astroblem [Impact breccias and impactites of the Kara and Ust-Kara astroblemes] / T.V. Selivanovskaya, M.S. Mashhak, V.L. Masajtis – L.: Nauka, 1990. – 191 p. [in Russian]
8. Shumilova T.G. Discovery of Upper-Going Intrusive Complex of Ultrahigh Pressure Impact Melt Glasses in Kara Astrobleme. / T.G. Shumilova, A.A. Zubov, S.I. Isaenko // 81st Annual Meeting of The Meteoritical Society. – 2018. – 2067.
9. Shumilova T. Spectroscopic features of ultrahigh-pressure impact glasses of the Kara astrobleme. / T. Shumilova, V. Lutoev, S. Isaenko et al. // Scientific Reports. – 2018. – № 8. – DOI: 10.1038/s41598-018-25037-z
10. Shumilova T.G. Mysterious long-living ultrahigh pressure or secondary impact crisis. / T.G. Shumilova, A.A. Zubov, S.I. Isaenko et al. // Scientific Reports. – 2020. – 10:2591. – DOI: 10.1038/s41598-020-59520-3
11. Badjukov D.D. Impact glasses from the Kara and Ust-Kara structures. / D.D. Badjukov, M.A. Nazarov, I.V. Suponeva // Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference. – 1989. – № 20.
12. Sazonova L.V. Svyaz' vnutrennego stroeniya i uslovij zaleganiya plavlenny'x stekol Karskogo meteoritnogo kratera [Relationship between the internal structure and conditions of occurrence of melt glasses of the Kara meteorite crater]. / L.V. Sazonova, N.N. Nikishina // Cosmochemistry of meteorites, moon and planets; – Kiev: Nauk. dumka, 1980. – p. 45-55. [in Russian]
13. Gurovich Zh.G. Vodosoderzhashhie stekla Karskogo vzry'vnogo kratera [Hydrous glasses of the Kara explosion crater]. / Zh.G. Gurovich // Problems of geology of the Timan-North Ural segment of the lithosphere; – Sy'kty'vkar: Institut geologii Komi nauchnogo centra RAN, 1993. [in Russian]
14. Stöffler D. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. / D. Stöffler, C. Hamann, K. Metzler // Meteoritics & Planetary Science. – 2017. – № 53. – DOI: 10.1111/maps.12912
15. Lyubetskaya T. Chemical composition of Earth's primitive mantle and its variance. / T. Lyubetskaya, J. Korenaga // Journal of Geophysical Research . – 2007. – № 112. – DOI: 10.1029/2005JB004223