

Особенности углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы: статистический анализ геохимических данных

©2023 Н. С. Ковальчук^{1✉}, Т. Г. Шуилова¹, С. А. Светов²

¹*Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская, 54,
167000, Сыктывкар, Российская Федерация*

²*Институт геологии КарНЦ РАН, ул. Пушкинская, 11,
185910, Петрозаводск, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Особенностью Карской астроблемы является специфический состав пород мишени, представленных углеродсодержащими сланцами и алевролитами, первично обогащенными полезными компонентами. В крупных астроблемах происходит интенсивная гидротермальная переработка вмещающих пород, которая может стимулировать мобилизацию, переотложение и концентрирование рудного вещества. В связи с этим для установления возможного постимпактного гидротермального воздействия на породы мишени, в том числе с участием вещества астероида, нами проведен анализ геохимического состава углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы с применением многомерной статистики.

Методика: Проведен анализ вещественного состава углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы методами многомерной статистики – корреляционным, факторным и иерархическим кластерным методами.

Результаты и обсуждение: В углеродсодержащих породах окружения Карской астроблемы методами математической статистики установлена сильная корреляционная связь между элементами Cu, Zn, Sr, Y, HREE и U, которая указывает на генетическую связь рудных и редкоземельных минералов. Ni, Co, Zn и Cr находятся в сильной корреляционной связи между собой и концентрируются в рудных минералах. Элементы Mo, Ti и V имеют генетическую связь с аквагенным органическим веществом. Данные факторного анализа свидетельствуют о привносе редких компонентов (Cs, Rb, Th, Nb, Ta, Sn, Be, Sc и Pb) в связи с постимпактной гидротермальной деятельностью. Установлено, что в зоне развития зювитов углеродсодержащие породы характеризуются более высокими содержаниями Ni и Co по отношению к породам исходного субстрата на удалении от борта астроблемы.

Заключение: В результате выявлена геохимическая специфика компонентов, в целом свидетельствующая о привносе некоторых рудных и редкоземельных элементов в породы мишени Карской астроблемы в результате постимпактной гидротермальной деятельности, мобилизации, переотложения и концентрирования вещества. Анализ содержаний Ni, Co и Cr указывает на частичное обогащение космическим веществом пород мишени ближайшего окружения кратера, находящихся в области интенсивного ударного дробления, дезинтегрирования и гидротермальной минерализации.

Ключевые слова: углеродсодержащие сланцы, геохимия, многомерная статистика, Карская астроблема



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ковальчук Наталья Сергеевна, e-mail: kovalchuk@geo.komisc.ru

Для цитирования: Ковальчук Н. С., Шумилова Т. Г., Светов С. А. Особенности углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы: статистический анализ геохимических данных // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 3. С. 82–99. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/82-99>

Введение

Карская астроблема (диаметром около 65 км) находится на северо-востоке от Пай-Хойского поднятия, в бассейне нижнего течения р. Кара (рис. 1), имеются также выходы импактитов, расположенные непосредственно на побережье Байдарацкой губы, в 5–15 км к северо-востоку от борта Карского кратера [1–3]. Согласно современным данным Карское ударное событие произошло около 70 млн. лет назад [4]. Значительный вклад в изучение Карской астроблемы, обоснование ее метеоритной природы и оценку алмазности внесли сотрудники ВСЕГЕИ Масайтис В. Л., Машак М. С., Езерский В. А. и другие [5, 6]. Исследования геологических особенностей данной астроблемы периодически возобновлялись [4, 7, 8–14].

Представления о генезисе Карской структуры и слагающих ее пород на протяжении истории их изучения существенно менялись. В 60-х годах существовала вулканогенная гипотеза происхождения Карского кратера [15]. Идея метеоритного происхождения кратера была предложена в 1970 г. П. С. Вороновым, в 1971 году В. Л. Масайтис выявил признаки ударного метаморфизма и доказал метеоритно-взрывное происхождение структуры, впоследствии поддержанное М. А. Масловым и Г. Я. Пономаревым при геологическом изучении этой территории [3, 16]. В 1976 г. ими на побережье Байдарацкой губы в области развития полосы импактитов была выделена Усть-Карская астроблема как самостоятельная структура, возникшая одновременно с Карской около 70 млн лет назад [3], однако, ее самостоятельность не является в полной мере доказанной.

При современном уровне эрозии Карский кратер имеет диаметр около 65 км, однако, некоторые ученые считают, что кратер достигал большего размера (100–150 км), предполагая образование одной крупной астроблемы, при этом, импактиты на побережье Байдарацкой губы могут являться выбросами из Карской структуры [13, 17–20]. Импактиты Усть-Карского района в российской литературе часто относят к самостоятельной астроблеме. Однако, убедительных доказательств существования двух кратеров не приводится, в то же время остается неясным являются ли усть-карские импактиты выбросами из Карского кратера или представляют собой внутрикратерные отложения единого более крупного кратера. В международной базе данных Усть-Карский кратер как самостоятельная структура не выделяется, а размеры Карского кратера считаются равными 65 км, что соответствует диаметру выделяющейся в современном рельефе депрессии.

С 2015 года импактиты и вмещающие породы Карской астроблемы изучаются нами комплексом современных методов исследований, что позволило получить новые геолого-минералогические данные об этом уникальном импактном объекте [20–23].

В результате проведенных минералого-геохимических исследований выявлена геохимическая специфика углеродсодержащих пород ближайшего окружения Карской астроблемы и сделан вывод о перспективности района на обнаружение рудопроявлений, связанных с постимпактной гидротермальной деятельностью [21, 22].

Фундаментальное понимание генетических особенностей формирования пород и их преобразований значительно расширяется за счет установления взаимосвязей между отдельными химическими элементами, минеральными индивидами и рудными компонентами. Для детализации геохимической специфики углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы и установления возможного постимпактного гидротермального воздействия с участием вещества астероида нами проведен сравнительный анализ микрокомпонентного состава осадочных пород мишени с применением многомерной статистики – корреляционного, факторного и иерархического кластерного методов.

Объект и методы исследования

Изучены верхнепалеозойские (D_3-P_1) углеродсодержащие породы ближайшего окружения Карской астроблемы, включая область распространения импактитов в Усть-Карском районе. В 2015–2021 гг. в ходе экспедиционных работ нами опробованы коренные выходы в долинах рек Кара, Анарога, Сибирчатаяха, Сопчаю, Хановейяха, М. Серью, Большая и Малая Вануйта, Лабияха, Б. Хондейяха, Пэкоцяяха и на побережье Байдарацкой губы (рис. 1).

Ранее в наших работах [21, 22] были описаны минералогические и геохимические особенности углеродсодержащих сланцев и алевролитов мишени в районе Карского импактного события, претерпевших постимпактные гидротермальные процессы. Выявлены повышенные содержания редких и редкоземельных элементов. Установлена геохимическая специфика концентрирования компонентов в разных районах Карской астроблемы, связанная со специализацией пород мишени. Был сделан вывод о перспективности углеродсодержащих пород на выявление рудопроявлений, связанных с постимпактной гидротермальной деятельностью.

В данной работе приводятся результаты исследований петрохимического и микрокомпонентного состава углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы с применением статистической обработки данных силикатного анализа, ICP-MS и данных определения $C_{орг}$ методами многомерной статистики – корреляционным, факторным и иерархическим кластерным анализами. С целью интерпретации геохимических данных проведена фазовая диагностика минералов с применением сканирующей электронной микро-

скопии с энергодисперсионным анализом и рамановская спектроскопия.

Определение содержаний микроэлементов было выполнено методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой по методике [24] на спектрометре ICP-MS Thermo Fisher X Series 2 (аналитик А. С. Парамонов). Пробоподготовка проведена путем кислотного вскрытия в открытой системе, масса навески – 0.1 г.

Содержание органического углерода в породе определено на экспресс-анализаторе АН-7529 в нерастворимом в концентрированной соляной кислоте остатке породы (НОП) с пересчетом на исходную породу (аналитик В. А. Лобанов). В качестве стандартов использованы глюкоза и малоуглеродистая сталь, стандартное отклонение – 0.008 %.

Элементный состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-Max (аналитик Е. М. Тропников). Анализ проведен в стандартных полированных шлифах с углеродным напылением. Изображения получены в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) при ускоряющем напряжении 20 кВ. Используемая модификация оборудования содержания СО и ОН групп не определяет.

Уточнение определения минеральных фаз в углеродистых сланцах и алевролитах (в петрографических шлифах без покровного стекла) проведено с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света на рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon). Условия регистрации спектров: He-Ne лазер ($\lambda = 632.8$ nm, мощность = 1 mW); объектив X50, конфокальное отверстие – 300 мкм, щель – 100 мкм, решетка спектрометра – 600 ш/мм, время экспозиции – 1–10 сек, количество циклов накопления сигнала в участке спектра – 10, диапазон регистрации спектров – 100–4000 cm^{-1} . Регистрация спектров производилась при комнатной температуре (аналитик С. И. Исаенко).

Исследования с использованием ICP-MS проведены в ЦКП ИГ КарНЦ РАН (г. Петрозаводск), остальные аналитические работы выполнены в ЦКП «Геонаука» (ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, г. Сыктывкар).

Для анализа многомерной статистики использовался программный пакет Statistica, версия 10.0. Проведена стандартизация исходных переменных, общее количество исследованного материала – 49 проб. Для анализа степени неоднородности пород и выявления генетических взаимосвязей слагающих их компонентов использован корреляционный анализ содержаний геохимических компонентов. Корреляция между двумя переменными считалась значимой при абсолютном значении коэффициента (r) больше 0.5. Построена корреляционная матрица и выявлены корреляционные связи между парами элементов.

Далее переменные кластеризованы иерархическим (древовидном) методом, используя различные меры расстояния и различные правила объединения клас-

теров. Выбран наиболее информативный способ (метод Варда, мера расстояния – 1-коэффициент корреляции Пирсона). На основе данных кластерного анализа построена дендрограмма.

Для выделения главных факторов, воспроизводящих наблюдаемые корреляции, применен факторный анализ (метод вращения Варимакс исходных). Интерпретация каждого фактора производилась на основе сильно с ним связанных (т.е. имеющих к нему высокие нагрузки) переменных.

Геологическая характеристика Карской астроблемы

Карская астроблема находится примерно в 200 км к северу от г. Воркуты на северо-востоке от горного кряжа Пай-Хой на Югорском полуострове (рис. 1). В строении астроблемы выделяются верхнепротерозойский и палеозойский структурные этажи. Нижний – сложен нерасчлененными верхнепротерозойскими образованиями мощностью более 6 км, имеет выходы только в центральной зоне Пай-Хойского антиклинория, в пределах Карской астроблемы зафиксирован в скважинах на глубине около 500 м в области центрального поднятия. Верхний структурный этаж представлен отложениями О-Р возраста общей мощностью более 5 км, сложен карбонатными, глинистыми, кремнисто-глинистыми, углисто-известковисто-кремнистыми сланцами и алевролитами с прослоями и линзами известняков и углей [3]. Дезинтеграция и постимпактные гидротермальные преобразования пород мишени просматриваются в окрестностях Карской астроблемы непосредственно от борта кратера на расстояние до 15–20 км [21]. Нижняя часть коптогенного комплекса представлена клиппеновыми брекчиями, мегабрекчиями, глыбово-агломератовыми зювитами, глыбовыми брекчиями и глыбовыми зювитами, верхняя – лапиллиево-агломератовыми зювитами и псаммито-алевритовыми брекчиями. Тела тагамитов развиты преимущественно в придонной части толщи импактитов. Мощность коптогенного комплекса достигает 2 км. Интрузивные образования представлены дайками долеритов и габбро-долеритов позднего девона, развиты на центральном поднятии астроблемы. Все дайки крутопадающие, в основном вертикальные, мощностью 0.1–7.0 м, в скважинах прослеживаются до глубины 350 м [9].

В области распространения импактитов Усть-Карского района палеозойские породы представлены отложениями нижней перми (P_{1pt-ng}). Они сложены полимиктовыми песчаниками, алевролитами, аргиллитами, глинистыми и углеродисто-глинистыми сланцами, глинами с прослоями бурых углей, опок, сидеритов, известняков, общая мощность толщи более 1 км [3]. В долинах рек Лабияха и Б. Хондейяха породы цокольного комплекса разбиты многочисленными разноориентированными трещинами и в устье р. Лабияха имеют контакты с породами коптогенного комплекса (мегабрекчиями и зювитами), которые в свою очередь содержат обломки цокольного комплекса [7]. На

побережье Байдарацкой губы коптогенный комплекс представлен мегабрекчиями и агломерато-глыбовыми зювитами, около 3–5 % от общего объема импактитов составляют тагамиты. Видимая мощность пород коптогенного комплекса не превышает 30 м. Нижняя его часть образует мегабрекчии, которые повсеместно залегают на перемещенных и в разной степени деформированных блоках пород перми [3].

Более молодые отложения меловой системы в районе Карской депрессии не сохранились и, судя по

включениям в импактитах и брекчиях, были сложены глинистыми песками, глинами, песчаниками, аргиллитами с прослоями углей, опок и сидеритов [3].

Перекрывающий комплекс представлен толщей средне- и верхнечетвертичных и современных отложений мощностью до 200 м, сложенных ледниково-морскими суглинками с гравием и галькой, морскими, озерно-аллювиальными и аллювиальными супесями, галечниками, песками и озерно-болотными отложениями [7].

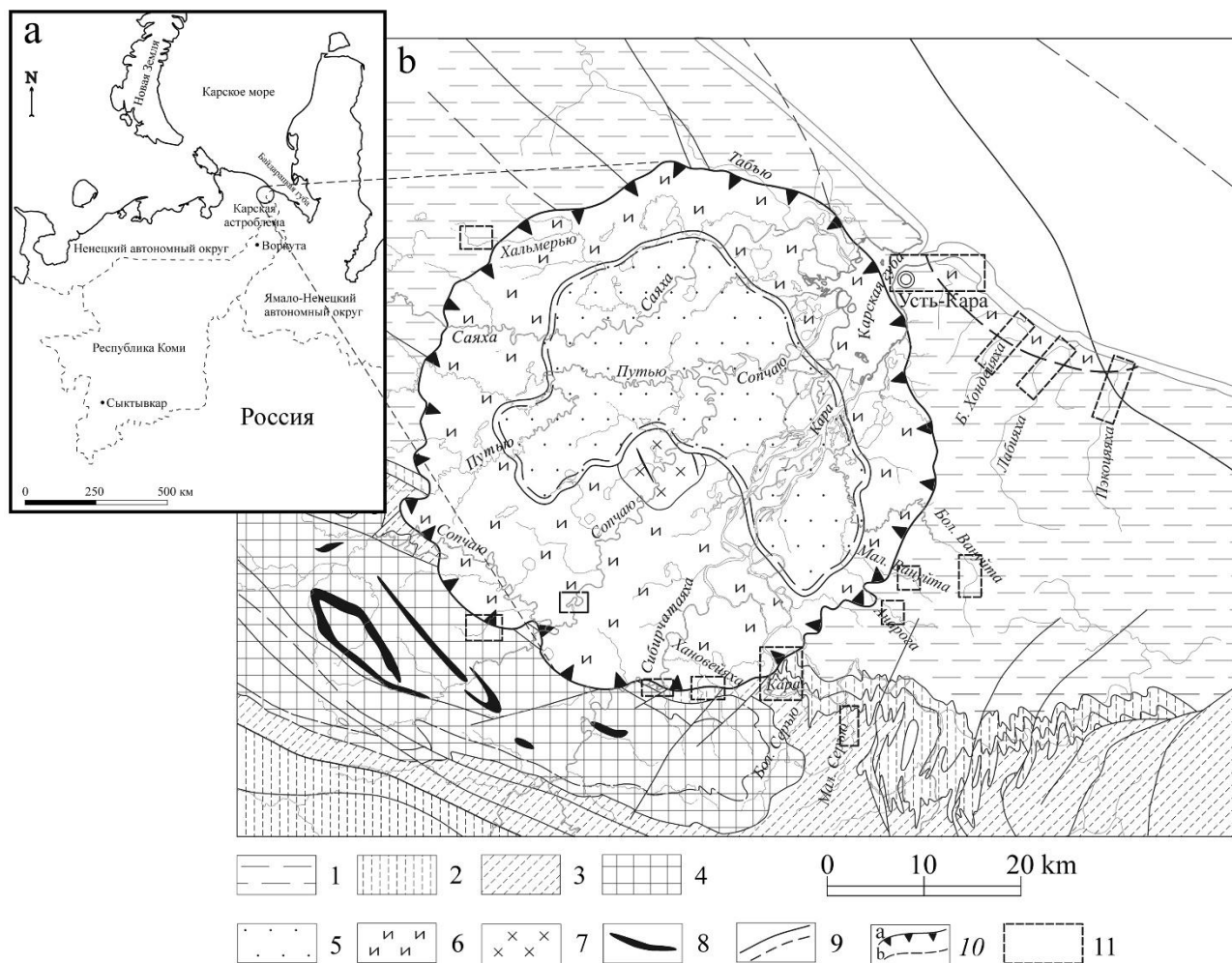


Рис. 1. Положение Карской астроблемы и Усть-Карского района распространения импактитов: *a* – административно-территориальная карта; *b* – схематическая геологическая карта, составленная по материалам М. А. Шишкина и М. С. Машака [3, 9]. 1 – песчаники, алевролиты, аргиллиты, глинистые сланцы нижней перми; 2 – каменноугольные углисто-глинистые и углисто-кремнистые сланцы с прослоями известняков и линзами кремней; 3 – глинисто-кремнистые сланцы, кремни, известняки и кварцитовидные песчаники девона; 4 – глинисто-кремнистые, графито-кремнистые и известковистые сланцы, известняки силура и ордовика; 5 – нерасчлененные отложения верхнего протерозоя; 6, 7 – импактные (коптогенные) породы: 6 – аллохтонные породы (зювиты, глыбовые брекчии); 7 – автохтонные породы (коптокатаклазиты); 8 – позднедевонские долериты и габбродолериты; 9 – разрывные нарушения; 10 – границы Карского кратера (*a*) и области распространения импактитов Усть-Карского района (*b*); 11 – участки работ.

[**Fig. 1.** The position of the Kara astrobleme and the Ust'-Kara impactite distribution area: (*a*) – administrative-territorial map; (*b*) – schematic geological map based on the materials of M.A. Shishkin and M.S. Mashchak [3, 9]. (1) – sandstones, siltstones, mudstones, clay shales of the Lower Permian; (2) – carboniferous carbonaceous-clay and carbonaceous-siliceous shales with limestone interlayers and flint lenses; (3) – clay-siliceous shales, flints, limestones and quartzite sandstones of the Devonian; (4) – clay-siliceous, graphite-siliceous and calcareous shales, limestones Silurian and Ordovician; (5) – undifferentiated deposits of the Upper Proterozoic; (6, 7) – impact (coptogenic) rocks: (6) – allochthonous rocks (suevites, block breccias); (7) – autochthonous rocks (coptocataclazites); (8) – Late Devonian dolerites and gabbrodolerites; (9) – discontinuous faults; (10) – boundaries of the Kara crater (*a*) and the area of impact of the Ust'-Kara region (*b*); (11) – work sites.]

Геохимическая специфика

Окружение Карского кратера. Углеродсодержащие породы окружения Карской астроблемы представлены верхнедевонско-нижнепермскими кремнисто-глинистыми, углисто-известковисто-кремнистыми сланцами и алевролитами. Главными породообразующими минералами в углеродсодержащих породах являются кварц, мусковит, хлорит. Второстепенными – плагиоклаз (альбит), калиевый полевой шпат, карбонаты (кальцит, доломит). Помимо широко развитой сульфидной минерализации в качестве аксессуарных минералов диагностированы – монацит, ксенотимом, апатит, циркон, лейкоксен, рутил и самородные металлы, концентрирующие в разной степени определенный набор компонентов в виде примесей [21]. Сульфидная минерализация представлена чаще всего пиритом, халькопиритом, реже сфалеритом и галенитом (рис. 2). В породе постоянно

отмечается присутствие лимонитизированного пирита в виде фрамбоидов, также встречены сростки кристаллов пирита с халькопиритом, сфалеритом и монацитом. Нередко пирит ассоциирует с углеродным веществом и хлоритом, образующими вытянутые линзовидные стяжения с пиритом параллельные сланцеватости породы (рис. 2с,ф). В качестве включений в пирите диагностированы сфалерит, халькопирит, апатит и галенит. Химический состав крупнокристаллического пирита и фрамбоидального пирита существенно не отличается и характеризуется присутствием примесей Co (до 3.34 мас. %), Cu (до 2.54 мас. %), Ni (до 0.94 мас. %) и As (до 0.68 мас. %) (табл. 1). Халькопирит характеризуется однородным составом близким к стехиометрическому. Особенностью галенита является постоянное присутствие в его составе примеси Se (0.65–2.85 мас. %), в единичных случаях отмечается примесь Fe (до 2.91 мас. %).

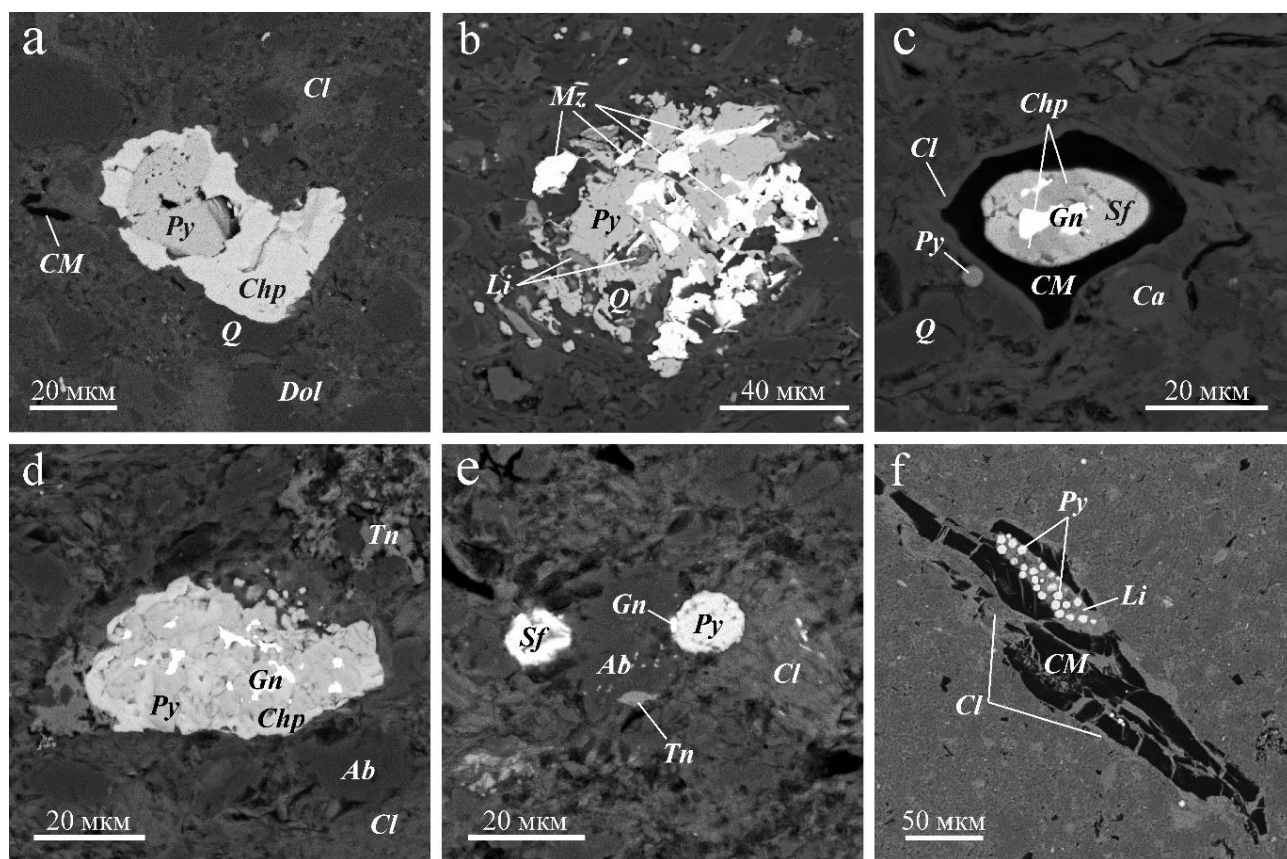


Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения сульфидов в углеродсодержащих породах Карской астроблемы (в отраженных электронах): *a* – сросток пирита (Py) с халькопиритом (Chp) в хлорит-кварц-доломитовой массе породы; *b* – выделения монацита (Mz) в сростании с лимонитизированным пиритом; *c* – сросток сфалерита (Sf) с халькопиритом (Chp) с включениями галенита (Gn) в углеродном веществе (CM); *d* – включения галенита (Gn) в пирит-халькопиритовом сростке; *e* – фрамбоид пирита в ассоциации со сфалеритом (Sf) и титанитом (Tn); *f* – линзовидное стяжение углеродного вещества (CM) и хлорита (Cl) с лимонитизированным пиритом (Py); Ab – альбит; Ca – кальцит; Dol – доломит; Q – кварц.

[Fig. 2. Electron microscopic images of sulfides in carbonaceous rocks of the Kara astrobleme (in reflected electrons): (a) – pyrite (Py) intergrowth with chalcopyrite (Chp) in chlorite-quartz-dolomite rock mass; (b) – monazite (Mz) release in intergrowth with limonitized pyrite; (c) – sphalerite (Sf) intergrowth with chalcopyrite (Chp) with inclusions of galena (Gn) in carbon matter (CM); (d) – inclusions of galena (Gn) in pyrite-chalcopyrite accretion; (e) – pyrite framboid in association with sphalerite (Sf) and titanite (Tn); (f) – lenticular contraction of carbon matter (CM) and chlorite (Cl) with limonitized pyrite (Py); Ab – albite; Ca – calcite; Dol – dolomite; Q – quartz.]

Табл. 1. Химический состав сульфидов из углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы, мас. %
[Table 1. Chemical composition of sulfides from carbonaceous rocks of the Kara astrobleme surrounding, wt. %]

n	№ обр./ан. [№ sample/analysis]	S	Fe	Co	Ni	Cu	As	Se	Pb	Сумма [Sum]
1	Кр 15-14-127/1-4	54.24	45.86	–	–	–	–	–	–	100.10
2	Кр 15-14-127/12-2	54.91	44.92	–	0.38	–	–	–	–	100.21
3	Кр 15-14-130/1-1	54.02	46.84	–	–	–	–	–	–	100.86
4	Кр 15-14-130/5-2	52.07	45.76	–	–	–	–	–	–	97.83
5	Кр 17-39-298/6-1	54.50	41.89	3.34	–	–	–	–	–	99.73
6	Кр 17-48-318/1-3	52.86	45.01	–	–	–	–	–	–	97.87
7	Кр 17-58-412/1-2	53.28	43.16	0.57	0.39	–	–	–	–	97.40
8	Кр 17-64-471/3-1	53.45	46.34	–	–	–	–	–	–	99.79
9	Кр 19-68-549/5-1	53.13	45.75	–	–	–	0.22	–	–	99.10
10	Кр 19-74-557/1-1	52.92	45.20	–	0.33	0.74	–	–	–	99.19
11	Кр 15-14-127/1-3	53.09	40.90	–	0.94	2.54	–	–	–	97.47
12	Кр 17-34-263/12-1	54.02	44.60	–	0.20	–	–	–	–	98.82
13	Кр 17-39-298/10-5	53.61	45.16	–	–	–	0.68	–	–	99.45
14	Кр 17-59-431/1-1	53.68	45.94	–	0.26	–	0.25	–	–	100.13
15	Кр 17-59-431/12-3	53.40	46.68	0.40	–	–	–	–	–	100.48
16	Кр 19-67-546/1-1	52.40	45.96	–	–	–	–	–	–	98.36
17	Кр 19-67-546/1-2	52.99	46.52	0.32	–	–	–	–	–	99.83
18	Кр 19-67-546/2-2	52.17	44.99	–	–	–	0.44	–	–	97.60
19	Кр 19-67-546/11-2	51.79	44.76	–	–	–	–	–	–	96.55
20	Кр 17-39-298/6-2	36.45	29.93	–	–	32.71	–	–	–	99.09
21	Кр 17-39-298/10-2	36.26	29.42	–	–	33.29	–	–	–	98.97
22	Кр 17-48-318/5-1	35.35	30.55	–	–	33.60	–	–	–	99.50
23	Кр 17-59-431/9-1	35.71	30.24	–	–	33.59	–	–	–	99.54
24	Кр 17-64-471/8-1	34.55	30.74	–	–	34.30	–	–	–	99.59
25	Кр 19-72-555/1-1	35.67	30.85	–	–	33.54	–	–	–	100.06
26	Кр 19-74-557/1-2	35.07	30.45	–	–	33.34	–	–	–	98.86
27	Кр 17-39-298/6-3	13.53	–	–	–	–	–	0.65	85.28	99.46
28	Кр 17-39-298/10-3	11.14	–	–	–	–	–	2.85	85.87	99.86
29	Кр 19-72-555/9-1	12.51	2.91	–	–	–	–	1.82	79.08	96.32

Примечание: 1–10 – пирит; 11–19 – фрамбоиды пирита; 20–26 – халькопирит; 27–29 – галенит; «–» – не обнаружено.
 [Note: (1–10) – pyrite; (11–19) – pyrite frambooids; (20–26) – chalcopyrite; (27–29) – galena; "–" – not found.]

Химический состав углеродсодержащих пород Карской астроблемы характеризуется высокими содержаниями MgO (до 5.56 мас. %) и Fe₂O₃ (до 4.56 мас. %) [25], относительно кларков «черных сланцев» мира [26] имеет повышенные содержания некоторых редких и редкоземельных элементов (рис. 3). Спектры REE подтверждают выявленную ранее геохимическую специфику и концентрирование разных компонентов в различных районах распространения импактитов, что, вероятно, связано с разнородным литологическим составом пород мишени, претерпевших постимпактные гидротермальные процессы в окружении Карской астроблемы [21].

Дезинтегрированные углеродсодержащие сланцы в нижнем течении р. Кара вблизи области развития зювитов отличаются более высокими содержаниями редких и редкоземельных элементов (рис. 3). Спектры элементов-примесей из углеродсодержащих сланцев и алевролитов на удалении от Карской импактной структуры относительно кларков «черных сланцев» мира [26] характеризуются пониженными содержаниями редких и редкоземельных элементов. В целом, для

пород окружения Карской астроблемы характерны фракционированное распределение легких элементов La/Yb (1–25), Ce/Lu (36–314), пологое распределение тяжелых элементов Gd/Yb (1.6–2.8) и Eu-минимум.

Усть-Карский район. Углеродсодержащие породы в Усть-Карском районе представлены нижнепермскими алевролитами, аргиллитами, глинистыми и углисто-глинистыми сланцами с интенсивно проявившейся кварц-кальцитовой жильной минерализацией, пиритизацией. Главными породообразующими минералами в углеродсодержащих породах Усть-Карского района являются альбит, хлорит, кварц, мусковит. В меньших количествах присутствуют карбонаты (кальцит, доломит, сидерит и магнезит) [22]. Сульфидная минерализация представлена пиритом, марказитом и халькопиритом, реже сфалеритом (рис. 4). Диагностированы собственные редкометалльные и редкоземельные минералы (монацит, флоренсит), апатит, барит, анатаз, хромшпиннелиды. Повсеместно встречаются сростки кристаллов пирита с халькопиритом, с поверхности кристаллы пирита и халькопирита часто покрыты «рубашками» гидроксидов

железа. В качестве включений в пирите диагностированы сфалерит, халькопирит и галенит. Марказит был диагностирован при помощи рамановской спектроскопии, его морфология и химический состав изучены сканирующей электронной микроскопией и микрозондовым анализом. Марказит представлен кристаллами уплощенно-клиновидной формы и их сростками, часто образует линзовидные агрегаты в хлорите (рис. 5а,с,е,ф). В виде микровключений в марказите постоянно отмечается галенит. В химическом составе марказита установлены примеси Ni (до 7.03 мас. %), Cu (до 2.76 мас. %), Co (до 0.91 мас. %) и As. Пирит имеет неоднородный состав, отмечается постоянное присутствие примесей Ni (до 1.93 мас. %), Co (до 0.67 мас. %) и зон, обогащенных мышьяком (табл. 2). Максимальные концентрации As в пирите и марказите достигают 3.45 мас. %. Галенит образует включения в пирите, марказите и халькопирите и имеет непостоянный химический состав, в качестве примеси отмечены Ni, Cu и Se. В химическом составе халькопирита в единичных случаях отмечается примесь Ni (до 0.81 мас. %).

В Усть-Карском районе углеродсодержащие породы по составу характеризуются высокими содержаниями MgO (4.37–5.71 мас. %), Na₂O (1.90–2.54 мас. %), TiO₂ (0.79–0.91 мас. %) и низкой карбонатностью [22]. Относительно кларковых содержаний элементов в «черных сланцах» изученные породы района характеризуются повышенными содержаниями некоторых редких и редкоземельных элементов. Область распределения редких и редкоземельных элементов показаны на рисунке 3, в целом, спектры элементов-примесей схожи. На графике область значений углеродсодержащих пород Усть-Карского района занимает среднее положение относительно спектров пород окружения Карской астроблемы. Спектры распределения редкоземельных элементов схожи, характеризуются Eu-минимумом и имеют отрицательный наклон, что подтверждается повышенными величинами LREE/HREE (6.3–8.0), La/Yb (4.3–7.1), Gd/Yb (1.5–1.8). Сумма REE варьирует от 93 до 120 г/т, при этом концентрации LREE имеют значения ниже кларковых, а HREE относительно кларков «черных сланцев» характеризуются повышенными содержаниями.

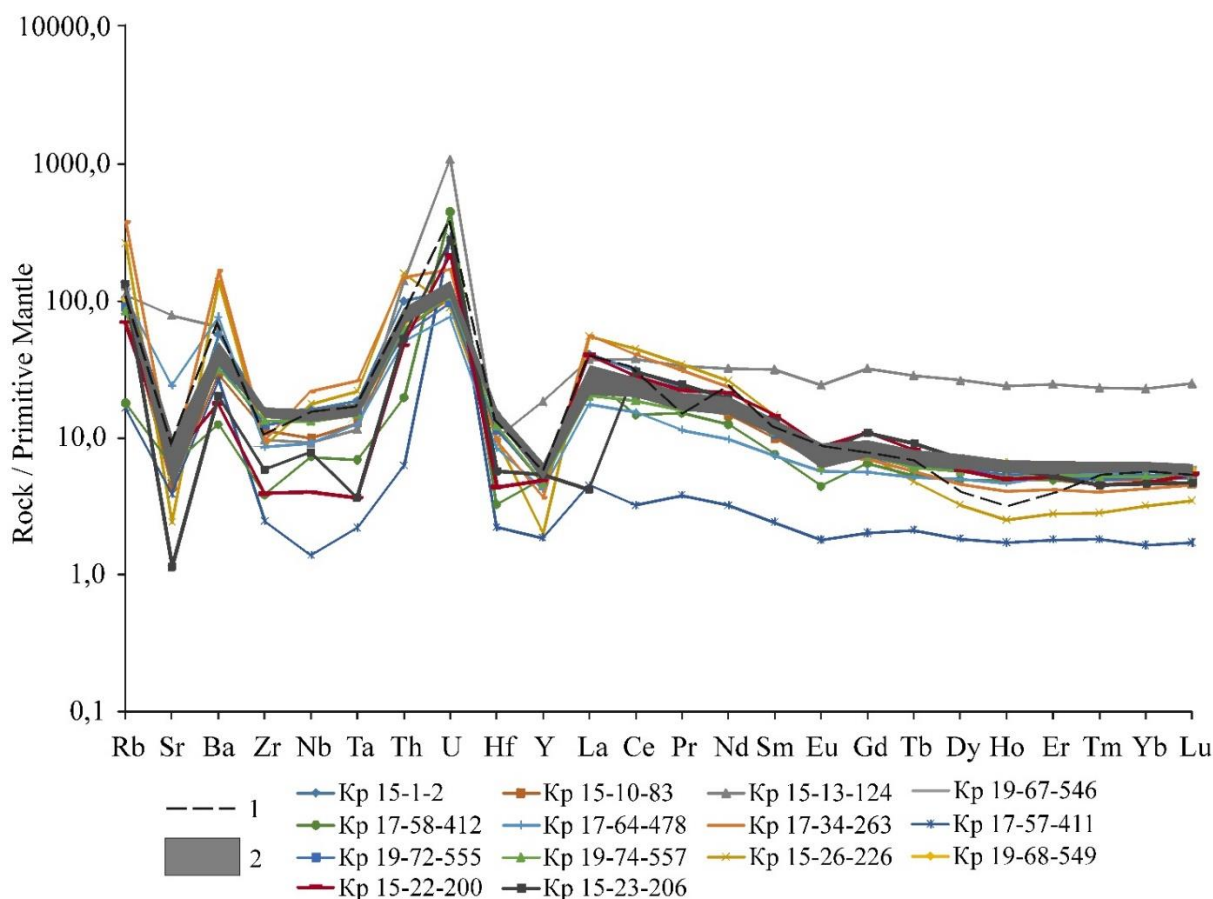


Рис. 3. Распределение редких и редкоземельных элементов в углеродсодержащих сланцах и алевролитах окружения Карской астроблемы, нормализованные на состав примитивной мантии [27]; 1 – кларки «черных сланцев» мира [21]; 2 – область значений для углеродсодержащих пород Усть-Карского района.

[Fig. 3. Distribution of rare and rare-earth elements in carbonaceous shales and siltstones of the Kara astrobleme surrounding, normalized to the composition of the primitive mantle [27]; (1) – clarks of the "black shales" of the world [21]; (2) – the range of values for carbonaceous rocks of the Ust'-Kara region.]

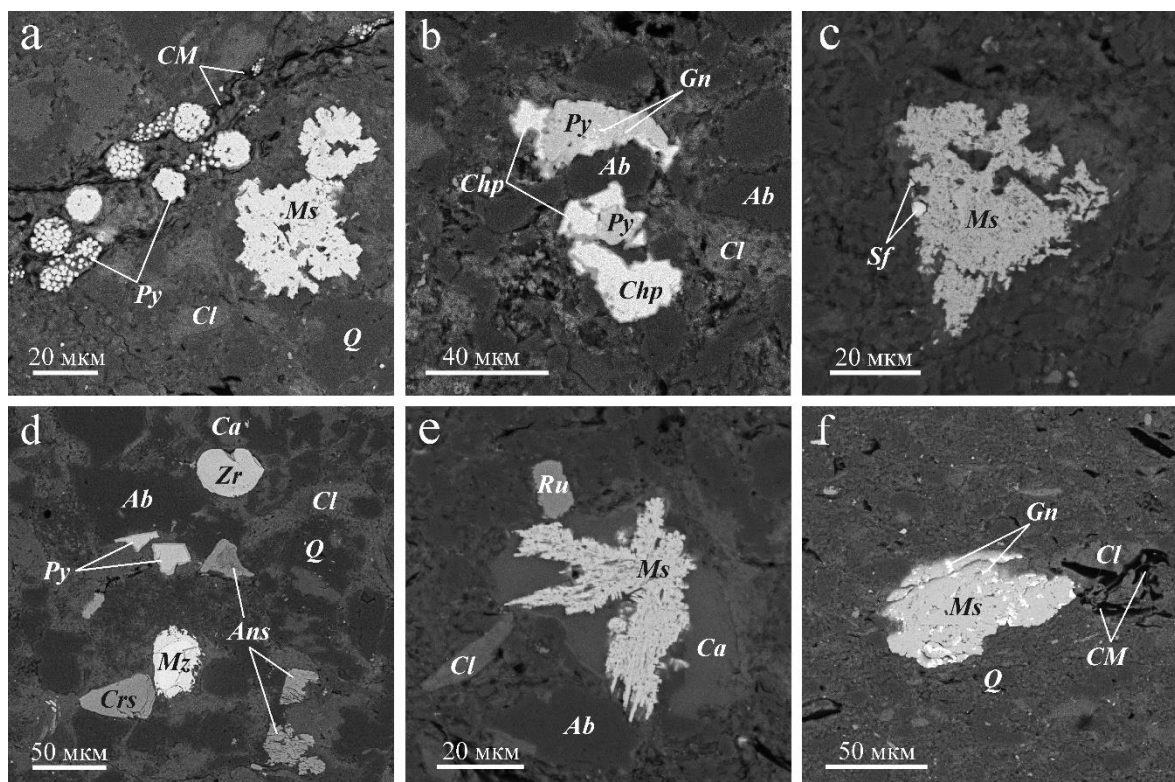


Рис. 4. Электронно-микроскопические изображения пирита в углеродсодержащих породах Усть-Карского района (в отраженных электронах): *a* – выделения пирита (*Py*) в виде фрамбонидов в ассоциации с марказитом (*Ms*); *b* – сростки пирита (*Py*) с халькопиритом (*Chp*) в альбит-хлорит-мусковитовой массе породы; *c* – марказит с включениями сфалерита (*Sf*); *d* – выделения анатаза (*Ans*), монацита (*Mz*), пирита (*Py*), циркона (*Zr*) и хрошпинелида (*Crs*) в альбит-кварц-хлоритовой массе породы; *e* – выделения марказита (*Ms*) в кальците (*Ca*) в ассоциации с рутилом (*Ru*); *f* – марказит с включениями галенита (*Gn*); *Ab* – альбит; *Cl* – хлорит; *CM* – углеродное вещество; *Q* – кварц.

[**Fig. 4.** Electron microscopic images of pyrite in carbonaceous rocks of the Ust'-Kara region (in reflected electrons): (*a*) – pyrite (*Py*) precipitates in the form of framboids in association with marcasite (*Ms*); (*b*) – pyrite (*Py*) accretions with chalcopyrite (*Chp*) in albite-chlorite-muscovite rock mass; (*c*) – marcasite with inclusions of sphalerite (*Sf*); (*d*) – anatase (*Ans*), monazite (*Mz*), pyrite (*Py*), zircon (*Zr*) and chromspinelide (*Crs*) in albite-quartz-chlorite rock mass; (*e*) – marcasite (*Ms*) in calcite (*Ca*) in associations with rutile (*Ru*); (*f*) – marcasite with inclusions of galena (*Gn*); *Ab* – albite; *Cl* – chlorite; *CM* – carbon matter; *Q* – quartz.]

Табл. 2. Химический состав сульфидов из углеродсодержащих пород Усть-Карского района, мас. %
 [Table 2. Chemical composition of sulfides from carbonaceous rocks of Ust'-Kara district, wt. %]

n	№ обр./ан. [№ sample/analysis]	S	Fe	Co	Ni	Cu	As	Se	Pb	Сумма [Sum]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	УК 19-П12-67/1-4	53.11	45.14	0.40	0.23	–	0.42	–	–	99.30
2	УК 19-П12-67/3-1	54.09	45.82	0.36	0.42	–	–	–	–	100.69
3	УК 19-П12-67/3-2	53.68	45.27	–	0.59	–	–	–	–	99.54
4	УК 19-П12-67/5-2	52.69	44.36	0.29	1.93	–	0.45	–	–	99.72
5	УК 19-П12-67/6_2	51.60	45.58	–	–	–	0.67	–	–	97.85
6	УК 19-5-24/2-1	52.89	45.47	0.38	0.40	–	–	–	–	99.14
7	УК 19-6-26/2-5	53.35	46.28	–	–	–	–	–	–	99.63
8	УК 19-ПК 3-4/1-1	52.90	46.82	0.31	–	–	0.34	–	–	100.37
9	УК 19-3-18/2-1	53.36	46.14	–	0.19	–	–	–	–	99.69
10	УК 19-БХ 3-2/6-3	53.12	46.29	–	–	–	–	–	–	99.41
11	УК 19-П5-47/4-2	54.26	45.45	0.28	0.22	–	–	–	–	100.21
12	УК 19-5-25/3-2	51.09	46.87	–	–	–	0.61	–	–	98.57
13	УК 19-5-25/5-5-2	53.53	45.12	0.45	0.24	–	0.26	–	–	99.60

Продолжение Табл. 2
[Continued Table 2]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
14	УК 19-6-26/3-1	51.15	44.00	0.67	0.21	–	0.28	–	–	96.31
15	УК 19-ПК 3-4/3-1	52.74	41.29	–	3.14	2.76	–	–	–	99.93
16	УК 19_5_25/3-1	52.52	46.25	0.31	0.37	–	0.36	–	–	99.81
17	УК 19-5-25/6-2	52.81	38.65	0.52	7.03	–	0.27	–	–	99.28
18	УК 19-5-24/2-2-1	52.90	43.95	0.91	1.38	–	0.28	–	–	99.42
19	УК 19-5-24/2-2-3	51.32	43.66	0.57	0.47	–	3.45	–	–	99.47
20	УК 19-6-26/6-2	51.79	45.62	–	–	–	2.37	–	–	99.78
21	УК 19-ПК 3-4/3-2	40.00	33.37	–	0.81	23.15	–	–	–	97.33
22	УК 19-П5-47/3-2	35.69	30.39	–	–	33.82	–	–	–	99.90
23	УК 19-5-25/5-3-1	36.04	30.44	–	–	33.38	–	–	–	99.86
24	УК 19-П5-47/1-1	11.35	–	–	–	–	–	2.20	86.88	100.43
25	УК 19-ПК 3-4/2-2	12.34	–	–	0.95	–	–	1.98	84.28	99.55
26	УК 19-ПК 3-4/3-3	10.64	–	–	0.54	2.51	–	2.13	83.82	99.64

Примечание: 1–7 – пирит; 8–14 – фрамбоиды пирита; 15–20 – марказит; 21–23 – халькопирит; 24–26 – галенит; «–» – не обнаружено.
[Note: (1–7) – pyrite; (8–14) – pyrite framboids; (15–20) – marcasite; (21–23) – chalcopyrite; (24–26) – galenite; «–» – not recommended.]

При последующей статистической обработке полученных результатов ICP-MS и данных определения $C_{орг}$ методами многомерной статистики, в частности корреляционным, факторным и иерархическим кластерным анализами, в углеродсодержащих породах окружения Карской астроблемы установлены сильные положительные корреляционные связи (0.9–0.5) P с REE, Y и U; Ni с Co и Zn; Ba с Pb и Ta; V с Mo и Tl (табл. 3). Кроме того, выявлены группы элементов, формирующие сильные связи между собой (0.9–0.5): Cu–Sr–Zn–HREE–U и Be–Rb–Nb–Sc–Cs–Sn–La–Ta–Zr–Hf–Th, что объясняется их концентрированием в составах разных рудных и аксессуарных минералов (рутила, апатита, циркона, барита и редкоземельных минералов). Элементы V, Mo и Tl связаны с аквагенным органическим веществом, что подтверждается присутствием положительных связей этих элементов с $C_{орг}$ (0.6–0.4) [26].

Ni и Co находятся в сильной корреляционной связи между собой, при этом, установлено, что Ni и Co концентрируются в сульфидных минералах в виде примесей (табл. 1, 2). Анализ коэффициентов корреляции показывает, что концентрирование Cu происходило одновременно с Zn, Sr, Y, HREE и U, которые накапливаются в халькопирите, сфалерите, марказите и ксенотиме. Кроме того, в качестве включений в пирите и марказите диагностированы сфалерит и халькопирит, что объясняет положительные связи элементов Cu и Zn.

На дендрограмме кластерного анализа (рис. 5) REE объединяются в кластер с P, U и Y, что подтверждается присутствием в породах собственных редкоземельных минералов – монацита, ксенотима, флоренсита и апатита [21, 22]. Объединенные в кластеры парные элементы Zr/Ga, Ni/Co, Nb/Th, Ba/Pb, Be/La, Li/W, Sc/Hf

объясняются их совместным концентрированием в рудных и аксессуарных минералах. Такие элементы как, Be, Rb, Nb, Sn, Cs, Li накапливаются в калиевом полевом шпате и слоистых силикатах [26].

С помощью процедуры вращения определены главные факторы, воспроизводящие наблюдаемые корреляции. Факторный анализ показал, что в процессе формирования и последующих преобразований углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы участвуют пять факторов с общей дисперсией более 72 % (табл. 4). Анализ признаковой структуры преимущественного однополярного фактора F_1 (30 %) характеризует влияние элементов REE (0.99–0.62), Y (0.94), U (0.84), P (0.69) и в меньшей степени Cu (0.63) на свойства отложения. Признаковая структура фактора F_2 (17 %) определяет накопление в породах Cs (0.90), Rb (0.88), Th (0.83), Nb (0.82), Ta (0.77), Sn (0.64), Be (0.62), Sc (0.62) и Pb (0.60). Нагрузка фактора F_3 (10 %) имеет сложный характер и определяется как накоплением Te (0.79), Ba (0.67), Eu (0.61), так и значимой отрицательной связью с Ni (-0.78), Co (-0.68), Zn (-0.66) и в меньшей степени Cr (-0.42). Влияние компонентов Mo (-0.95), Tl (-0.94), V (-0.87) и $C_{орг}$ (-0.60) выявляется фактором F_4 (8 %), а Zr (0.87), Ga (0.75) и Hf (0.68) – фактором F_5 (6 %).

Анализ признаковых нагрузок пяти выявленных факторов показал, что фактор F_1 указывает на привнос рудных компонентов и редкоземельных элементов, связанных с постимпактной гидротермальной деятельностью, с образованием в породах сульфидов и редкоземельных минералов [3, 28, 29]. Фактор F_2 может быть интерпретирован как признак перекоцентрирования редких элементов гидротермальными флюидами в результате постимпактных гидротермальных процес-

сов. Фактор F_3 указывает на привнос и концентрирование Ва, Те, Еи, что подтверждается присутствием в породе зерен и прожилков барита. В то же время, эти процессы биполярны накоплению Zn и группы металлов Ni, Co и Cr, последние накапливаются в сульфидах,

предположительно, частично за счет вещества метеорита. Органика выступает как концентратор Мо, Tl и V [26], что описывается фактором F_4 . Фактор F_5 нами связывается с присутствием в породах мишени циркона, обогащенного Ga и Hf.

Табл. 3. Матрица коэффициентов корреляции
[Table 3. Matrix of correlation coefficients]

Component	C _{opr}	Li	Be	P	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Cd	Sn	Sb	Te	
C _{opr}	1.00																								
Li	-0.25	1.00																							
Be	-0.15	0.35	1.00																						
P	0.02	-0.16	-0.23	1.00																					
Sc	-0.19	0.38	0.63	-0.27	1.00																				
Ti	-0.50	0.27	0.18	-0.31	0.45	1.00																			
V	0.43	-0.37	-0.09	-0.14	0.02	-0.25	1.00																		
Cr	-0.07	0.44	0.29	-0.17	0.47	0.36	-0.06	1.00																	
Mn	0.04	0.09	-0.24	0.41	-0.50	-0.51	-0.25	-0.34	1.00																
Co	-0.27	0.36	-0.08	-0.14	0.20	0.40	-0.31	0.18	0.22	1.00															
Ni	-0.29	0.27	-0.15	-0.24	0.12	0.49	-0.04	0.48	-0.15	0.64	1.00														
Cu	0.20	-0.16	0.00	0.01	-0.03	-0.17	-0.16	-0.03	0.03	0.30	0.18	1.00													
Zn	0.00	0.15	-0.02	-0.15	0.07	-0.16	0.33	0.15	0.04	0.42	0.56	0.50	1.00												
Ga	-0.13	-0.03	0.38	-0.11	-0.01	0.24	-0.07	0.22	0.07	-0.02	0.06	-0.08	-0.22	1.00											
Rb	-0.30	0.18	0.67	-0.25	0.39	0.19	-0.23	0.00	-0.32	-0.26	-0.31	-0.04	-0.17	0.06	1.00										
Sr	0.15	-0.34	-0.41	0.38	-0.61	-0.45	-0.29	-0.46	0.46	-0.06	-0.15	0.56	0.04	-0.31	-0.20	1.00									
Y	0.04	-0.14	-0.11	0.84	-0.22	-0.34	-0.19	-0.10	0.47	0.13	-0.02	0.47	0.21	0.03	-0.27	0.50	1.00								
Zr	-0.18	-0.03	0.50	-0.23	0.36	0.31	-0.01	0.33	-0.11	0.01	0.04	-0.03	-0.19	0.87	0.17	-0.42	-0.05	1.00							
Nb	-0.49	0.28	0.53	-0.30	0.68	0.58	-0.05	0.27	-0.49	0.11	0.12	-0.10	0.06	0.06	0.69	-0.49	-0.27	0.33	1.00						
Mo	0.48	-0.43	-0.16	0.00	-0.11	-0.54	0.91	-0.07	-0.06	-0.41	-0.17	-0.03	0.34	-0.16	-0.25	-0.05	-0.01	-0.07	-0.22	1.00					
Cd	0.28	-0.13	0.09	0.28	-0.19	-0.67	0.22	0.13	0.33	-0.35	-0.24	0.11	0.17	0.13	-0.20	0.19	0.34	0.08	-0.45	0.48	1.00				
Sn	-0.26	-0.10	0.26	-0.01	0.13	0.15	-0.05	-0.15	-0.31	-0.17	-0.13	0.13	0.01	0.07	0.61	-0.05	0.03	0.11	0.50	-0.08	-0.31	1.00			
Sb	0.14	-0.42	-0.29	-0.06	-0.40	-0.13	0.15	-0.33	-0.08	-0.37	-0.16	0.02	-0.22	-0.23	0.00	0.50	-0.18	-0.27	-0.07	0.13	-0.02	0.01	1.00		
Te	0.15	-0.26	-0.30	0.50	-0.60	-0.47	-0.27	-0.32	0.58	-0.35	-0.37	-0.04	-0.39	-0.04	-0.18	0.68	0.35	-0.22	-0.54	-0.04	0.45	-0.24	0.47	1.00	
Cs	-0.26	0.23	0.59	-0.25	0.44	0.25	-0.19	0.10	-0.35	-0.13	-0.14	0.09	0.00	-0.05	0.91	-0.18	-0.21	0.10	0.73	-0.21	-0.19	0.57	-0.01	-0.23	
Ba	0.06	-0.19	0.14	-0.13	0.03	-0.26	-0.14	-0.16	-0.07	-0.50	-0.51	-0.05	-0.39	-0.10	0.43	0.16	-0.21	0.05	0.12	0.02	0.28	0.10	0.40	0.37	
La	0.00	0.28	0.56	0.08	0.24	-0.07	-0.13	0.24	0.00	-0.14	-0.20	0.00	-0.09	0.16	0.28	-0.08	0.10	0.15	0.07	-0.07	0.24	0.17	-0.12	0.06	
Ce	-0.16	0.10	0.48	0.48	0.09	-0.23	-0.26	0.09	0.28	-0.12	-0.27	0.18	-0.01	0.46	0.35	0.00	0.61	0.44	0.18	-0.13	0.40	0.31	-0.34	0.17	
Pr	-0.17	0.14	0.31	0.60	0.12	-0.18	-0.31	0.11	0.09	-0.08	-0.16	0.27	0.12	-0.03	0.37	0.13	0.65	-0.02	0.18	-0.13	0.29	0.37	-0.36	0.13	
Nd	-0.16	0.16	0.24	0.70	0.14	-0.16	-0.26	0.15	0.20	0.11	-0.05	0.32	0.21	0.01	0.17	0.13	0.81	0.03	0.17	-0.12	0.26	0.27	-0.36	0.08	
Sm	-0.06	0.08	0.05	0.75	-0.01	-0.22	-0.28	0.06	0.30	0.23	0.03	0.50	0.28	-0.06	-0.07	0.34	0.92	-0.09	-0.05	-0.13	0.25	0.16	-0.30	0.15	
Eu	0.09	-0.18	-0.19	0.69	-0.33	-0.48	-0.36	-0.25	0.46	-0.16	-0.34	0.31	-0.12	-0.27	-0.04	0.70	0.67	-0.32	-0.30	-0.09	0.44	-0.02	0.29	0.73	
Gd	0.06	0.01	-0.04	0.79	-0.12	-0.35	-0.27	0.03	0.39	0.16	-0.03	0.52	0.25	-0.10	-0.17	0.46	0.95	-0.17	-0.23	-0.07	0.39	0.04	-0.21	0.31	
Tb	0.07	0.00	-0.07	0.78	-0.13	-0.34	-0.26	0.00	0.40	0.19	0.01	0.55	0.29	-0.11	-0.21	0.49	0.96	-0.17	-0.24	-0.07	0.35	0.03	-0.22	0.28	
Dy	0.05	-0.02	-0.09	0.74	-0.10	-0.29	-0.23	-0.01	0.36	0.25	0.08	0.62	0.36	-0.13	-0.23	0.50	0.96	-0.16	-0.20	-0.06	0.28	0.04	-0.22	0.21	
Ho	0.06	-0.03	-0.09	0.73	-0.08	-0.29	-0.22	0.00	0.36	0.25	0.09	0.62	0.38	-0.14	-0.22	0.50	0.95	-0.16	-0.19	-0.04	0.29	0.03	-0.21	0.21	
Er	0.07	-0.02	-0.07	0.69	-0.06	-0.31	-0.22	0.01	0.35	0.24	0.09	0.66	0.40	-0.14	-0.20	0.51	0.94	-0.14	-0.17	-0.03	0.31	0.03	-0.21	0.20	
Tm	0.05	0.00	-0.04	0.60	0.00	-0.27	-0.22	0.04	0.31	0.30	0.15	0.72	0.47	-0.14	-0.17	0.48	0.90	-0.11	-0.11	-0.04	0.27	0.05	-0.23	0.12	
Yb	0.04	0.02	0.00	0.53	0.04	-0.26	-0.22	0.06	0.29	0.31	0.16	0.74	0.50	-0.13	-0.13	0.46	0.86	-0.07	-0.06	-0.04	0.27	0.06	-0.24	0.08	
Lu	0.08	0.01	0.03	0.50	0.03	-0.32	-0.23	0.05	0.29	0.25	0.10	0.76	0.48	-0.14	-0.09	0.50	0.84	-0.08	-0.07	-0.02	0.32	0.06	-0.20	0.13	
Hf	-0.25	0.27	0.57	-0.31	0.75	0.46	-0.08	0.59	-0.35	0.11	0.15	-0.08	-0.08	0.49	0.31	-0.62	-0.18	0.80	0.62	-0.16	-0.02	0.09	-0.37	-0.45	
Ta	-0.25	0.08	0.46	-0.26	0.66	0.21	-0.13	0.08	-0.44	-0.19	-0.19	-0.10	-0.25	-0.07	0.60	-0.30	-0.32	0.25	0.57	-0.16	-0.12	0.36	0.00	-0.21	
W	0.06	0.29	0.03	-0.06	-0.02	-0.03	-0.06	0.27	-0.09	-0.05	0.13	-0.01	0.03	-0.07	0.00	0.01	-0.05	-0.08	-0.04	-0.02	0.11	-0.08	0.03	0.01	
Tl	0.54	-0.31	0.07	-0.11	0.04	-0.53	0.85	-0.06	-0.17	-0.47	-0.27	-0.09	0.28	-0.15	0.05	-0.22	-0.14	-0.07	-0.05	0.89	0.38	0.08	0.06	-0.16	
Pb	-0.12	-0.01	0.34	-0.09	0.39	0.14	-0.10	0.22	-0.26	-0.21	-0.17	0.12	-0.15	0.18	0.42	-0.15	-0.02	0.44	0.45	-0.02	0.13	0.15	-0.01	0.00	
Bi	0.02	0.12	0.38	-0.01	0.24	0.11	0.00	0.03	-0.03	0.06	-0.05	-0.03	-0.06	0.04	0.13	-0.08	-0.04	0.04	0.04	-0.08	0.16	-0.30	-0.04	0.12	
Th	-0.26	0.41	0.69	-0.22	0.59	0.17	-0.23	0.29	-0.29	0.06	-0.03	0.26	0.22	0.13	0.76	-0.32	-0.01	0.32	0.72	-0.24	-0.08	0.51	-0.36	-0.45	
U	0.28	-0.31	-0.10	0.59	-0.11	-0.54	0.12	-0.02	0.20	-0.15	-0.15	0.62	0.35	-0.24	-0.11	0.55	0.77	-0.14	-0.16	0.39	0.50	0.09	0.07	0.30	

Продолжение Табл. 3
[Continued Table 3]

Component	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U
Cs	1.00																							
Ba	0.40	1.00																						
La	0.16	0.09	1.00																					
Ce	0.28	0.12	0.36	1.00																				
Pr	0.39	0.07	0.32	0.79	1.00																			
Nd	0.21	-0.11	0.28	0.80	0.92	1.00																		
Sm	0.00	-0.23	0.19	0.67	0.81	0.94	1.00																	
Eu	0.00	0.44	0.16	0.42	0.55	0.55	0.61	1.00																
Gd	-0.09	-0.14	0.20	0.62	0.76	0.88	0.97	0.73	1.00															
Tb	-0.12	-0.19	0.14	0.58	0.72	0.85	0.97	0.70	0.99	1.00														
Dy	-0.12	-0.23	0.08	0.53	0.68	0.83	0.96	0.65	0.97	0.99	1.00													
Ho	-0.11	-0.21	0.07	0.52	0.67	0.82	0.95	0.65	0.96	0.98	1.00	1.00												
Er	-0.08	-0.18	0.06	0.53	0.67	0.81	0.94	0.65	0.95	0.98	0.99	1.00	1.00											
Tm	-0.04	-0.18	0.04	0.50	0.64	0.78	0.91	0.59	0.91	0.94	0.97	0.98	0.99	1.00										
Yb	0.01	-0.14	0.03	0.50	0.63	0.76	0.88	0.56	0.88	0.91	0.95	0.96	0.98	0.99	1.00									
Lu	0.04	-0.05	0.06	0.52	0.64	0.74	0.86	0.61	0.87	0.90	0.93	0.94	0.96	0.98	0.99	1.00								
Hf	0.33	0.13	0.13	0.31	0.09	0.11	-0.06	-0.33	-0.17	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.06	-0.01	-0.01	1.00							
Ta	0.59	0.58	0.11	0.13	0.13	0.01	-0.18	-0.04	-0.25	-0.27	-0.26	-0.24	-0.22	-0.18	-0.14	-0.10	0.54	1.00						
W	0.02	0.04	-0.04	-0.04	0.07	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00	-0.02	-0.02	-0.01	0.04	0.06	1.00					
Tl	0.06	0.18	0.01	-0.02	-0.05	-0.09	-0.18	-0.14	-0.14	-0.15	-0.16	-0.14	-0.13	-0.12	-0.11	-0.08	-0.09	0.08	-0.01	1.00				
Pb	0.52	0.60	-0.07	0.35	0.27	0.19	0.05	0.15	0.00	-0.02	-0.01	0.01	0.04	0.08	0.14	0.17	0.56	0.55	-0.06	0.08	1.00			
Bi	0.13	0.02	0.12	0.08	0.07	0.02	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	-0.03	-0.03	-0.03	-0.04	-0.03	0.04	0.06	-0.05	-0.04	0.22	1.00		
Th	0.76	0.18	0.24	0.56	0.55	0.46	0.27	-0.07	0.13	0.11	0.12	0.13	0.16	0.23	0.28	0.31	0.57	0.52	0.05	0.01	0.47	0.05	1.00	
U	0.01	0.10	0.04	0.44	0.59	0.65	0.73	0.67	0.78	0.79	0.80	0.81	0.83	0.82	0.81	0.84	-0.14	-0.11	0.03	0.27	0.22	-0.06	0.11	1.00

Tree Diagram for 48 Variables
Ward's method 1-Pearson r

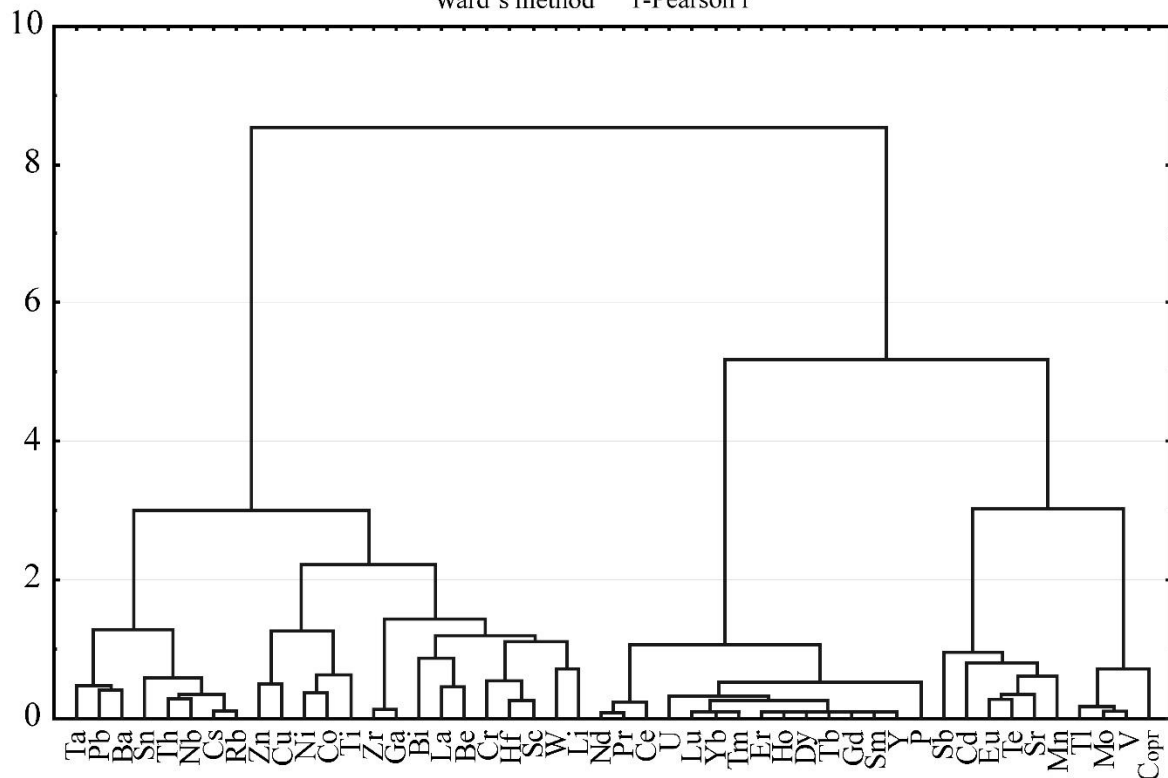


Рис. 5. Дендрограмма кластерного анализа углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы, построена по данным ICP-MS.

[Fig. 5. Dendrograms of cluster analysis of carbonaceous rocks of the Kara astrobleme surrounding, constructed according to ICP-MS data.]

Табл. 4. Факторные нагрузки, собственные значения и вес факторов
 [Table 4. Factor loads, eigenvalues and factors weight]

Признак [Feature]	Фактор 1 [Factor 1]	Фактор 2 [Factor 2]	Фактор 3 [Factor 3]	Фактор 4 [Factor 4]	Фактор 5 [Factor 5]
C _{opr}	0.04	-0.28	0.14	-0.60	-0.09
Li	0.01	0.16	-0.33	0.40	0.30
Be	0.01	0.62	0.02	0.00	0.58
P	0.69	-0.28	0.37	0.09	0.02
Sc	-0.05	0.62	-0.40	-0.01	0.39
Ti	-0.34	0.27	-0.48	0.55	0.15
V	-0.23	-0.12	-0.18	-0.87	-0.01
Cr	0.03	0.13	-0.42	0.01	0.53
Mn	0.36	-0.54	0.32	0.18	0.05
Co	0.20	-0.17	-0.68	0.45	-0.01
Ni	0.04	-0.16	-0.78	0.21	-0.01
Cu	0.63	0.13	-0.22	-0.08	-0.28
Zn	0.39	0.00	-0.66	-0.36	-0.16
Ga	-0.11	-0.08	0.08	0.13	0.75
Rb	-0.11	0.88	0.22	0.13	0.05
Sr	0.47	-0.27	0.39	0.11	-0.59
Y	0.94	-0.22	0.12	0.04	0.05
Zr	-0.11	0.20	-0.02	0.03	0.77
Nb	-0.13	0.82	-0.29	0.16	0.13
Mo	-0.03	-0.15	0.01	-0.95	-0.04
Cd	0.36	-0.22	0.40	-0.49	0.34
Sn	0.09	0.64	0.03	0.04	-0.15
Sb	-0.24	-0.02	0.41	-0.09	-0.56
Te	0.21	-0.38	0.79	0.14	-0.15
Cs	-0.01	0.90	0.06	0.09	-0.03
Ba	-0.14	0.45	0.67	-0.11	-0.11
La	0.14	0.18	0.22	0.02	0.40
Ce	0.62	0.29	0.33	0.06	0.54
Pr	0.76	0.38	0.20	0.08	0.18
Nd	0.87	0.23	0.05	0.09	0.23
Sm	0.96	0.02	-0.01	0.11	0.08
Eu	0.67	-0.04	0.61	0.10	-0.24
Gd	0.97	-0.10	0.10	0.06	0.03
Tb	0.98	-0.13	0.05	0.06	0.00
Dy	0.98	-0.11	-0.04	0.05	-0.05
Ho	0.98	-0.09	-0.05	0.03	-0.06
Er	0.99	-0.07	-0.05	0.01	-0.06
Tm	0.97	-0.01	-0.13	0.00	-0.07
Yb	0.96	0.05	-0.16	-0.01	-0.06
Lu	0.95	0.08	-0.09	-0.05	-0.07
Hf	-0.09	0.49	-0.24	0.06	0.68
Ta	-0.19	0.77	0.14	0.03	0.09
W	0.01	0.01	-0.05	0.00	0.02
Tl	-0.10	0.11	0.06	-0.94	-0.01
Pb	0.08	0.60	0.22	-0.07	0.24
Bi	-0.02	0.06	0.08	0.04	0.23
Th	0.24	0.83	-0.17	0.06	0.28
U	0.84	0.05	0.16	-0.41	-0.16
Собственные значения [Eigenvalues]	14.55	8.43	5.06	3.94	3.05
Вес фактора, % [Factor Weight, %]	30.31	17.56	10.54	8.22	6.36

Обсуждение

Породы мишени ближайшего окружения Карской астроблемы при импактном процессе подвергались дроблению, что спровоцировало гидротермальные изменения. Источником растворов при этих процессах могли быть как поверхностные (морские и подземные) воды, так и высвобожденные под воздействием ударных нагрузок флюиды из минералов пород мишени

и продуктов импактного плавления [29, 30].

Нами было ранее установлено, что углеродсодержащие сланцы и алевролиты, входящие в состав пород мишени Карской астроблемы, являются первично обогащенными редкими и редкоземельными элементами [31]. В результате интенсивной постимпактной гидротермальной переработки возможно формирование объектов с высокими концентрациями рудных компо-

нентов, как в самих импактитах, так и в породах мишени на обширных площадях [8, 13].

Проведенные статистические исследования вещественного состава пород мишени методами многомерной статистики позволяют глубже понять постимпактные процессы преобразования исходных пород, выявить их характерные признаки и отличительные особенности, что является важным для выделения главных факторов, обусловивших накопление тех или иных элементов в углеродсодержащих породах окружения Карской астроблемы.

Астроблемы и подстилающие их породы, как правило, не содержат фрагментов ударивших тел, но отмечается присутствие рассеянного космического вещества [2, 32, 33]. Ранее, М. С. Машак и В. Л. Масайтис [3] отмечали, что состав расплавных импактитов и подвергшихся плавлению пород мишени Карской астроблемы в целом аналогичен. Однако, химические составы импактитов Карского кратера заметно различаются, т.к. помимо сланцев, алевролитов, песчаников перми в доколе присутствует значительное количество карбонатных пород, глинисто-кремнистых и углисто-кремнистых сланцев и других пород от ордовика до карбона. Также, выше указанными авторами приведены данные о вполне достоверном привносе в импактиты ряда сидерофилов, исходя из сопоставлений содержаний Ni, Co и Cr в породах мишени и импактитах, и сделан вывод, что импактиты Карской астроблемы обогащены веществом тела ударника. Кроме того, известно, что для зювитов характерна минерализация высокой степени восстановленности, в том числе были

описаны металлы в самородном состоянии (Fe, Ni, Al, Ag, Cu, Sn), а также указывалось об обнаружении сложных интерметаллидов и камасита [34]. Ранее, в тагамитах отмечались повышенные содержания Ni и Cr, в три раза превышающие концентрации в породах цокольного комплекса [3]. Последнее, скорее всего, может быть связано с веществом астероида, который мог быть источником данных компонентов [35].

Согласно полученным нами данным ICP-MS, значения содержаний Ni, Co и Cr в породах мишени и импактитах в целом сопоставимы с данными М. С. Машака и В. Л. Масайтиса [3]. При этом, углеродсодержащие породы в непосредственной близости к борту импактной структуры и на удалении существенно отличаются концентрациями Ni, Co и Cr.

Установлено, что в зоне развития зювитов на р. Кара углеродсодержащие породы характеризуются более высокими содержаниями Ni, Co и Cr, по отношению к породам исходного субстрата на удалении от борта астроблемы на р. Малая Сeryю (рис. 1, табл. 5). Дезинтегрированные породы непосредственно на контакте с импактитами отличаются более высокими содержаниями Ni, Co и Cr, сопоставимыми с содержаниями в импактитах. Наибольшие концентрации этих элементов наблюдаются в импактных стеклах из зювитов и в тагамитах. Наблюдаемое распределение концентраций Ni, Co и Cr может свидетельствовать о вероятном привносе метеоритного вещества в импактиты и частичном привносе в породы мишени окружения Карской астроблемы в ходе постимпактных гидротермальных преобразований.

Табл. 5. Содержание Ni, Co и Cr (г/т) в углеродсодержащих породах мишени и импактитах Карской астроблемы
[Table 5. The content of Ni, Co and Cr (g/t) in carbonaceous target rocks and impactites of the Kara astrobleme]

№ обр. [№ sample]	Порода/привязка [Rock/location]	Ni	Co	Cr
1	2	3	4	5
Кр 15-21-195	Углеродсодержащий сланец (р. М. Сeryю) [Carbonaceous shale (M. Seryu River)]	42.15	14.82	82.43
Кр 15-21-197	Углеродсодержащий сланец (р. М. Сeryю) [Carbonaceous shale (M. Seryu River)]	23.16	6.02	102.75
Кр 15-22-198	Алевролит (р. М. Сeryю) [Siltstone (M. Seryu River)]	40.13	6.69	39.84
Кр 15-22-199	Углеродсодержащий сланец (р. М. Сeryю) [Carbonaceous shale (M. Seryu River)]	106.35	29.44	63.45
Кр 15-22-200	Углеродсодержащий сланец (р. М. Сeryю) [Carbonaceous shale (M. Seryu River)]	49.56	13.06	31.79
Кр 15-22-202	Углеродсодержащий сланец (р. М. Сeryю) [Carbonaceous shale (M. Seryu River)]	133.85	17.65	42.47
Кр 15-23-206	Углеродсодержащий сланец (р. М. Сeryю) [Carbonaceous shale (M. Seryu River)]	67.56	15.18	44.84
Кр 15-23-207	Дезинтегр. углерод. сланец (р. М. Сeryю) [Disintegrated carbonaceous shale (M. Seryu River)]	8.20	1.74	3.06
Кр 15-24-211	Алевролит (р. М. Сeryю) [Siltstone (M. Seryu River)]	10.70	0.57	30.42
Кр 15-25-218	Углеродсодержащий сланец (р. М. Сeryю) [Carbonaceous shale (M. Seryu River)]	14.09	1.03	116.83
Среднее		49.58	10.62	55.79

Продолжение Табл. 5
[Continued Table 5]

1	2	3	4	5
Кр 15-26-226	Углеродсодержащий сланец (о. Моранго) [Carbonaceous shale (Morango Island)]	39.54	10.79	75.91
Кр 15-1-2	Алевролит (р. Кара) [Siltstone (Kara River)]	97.21	13.66	132.50
Кр 15-13-124	Алевролит (руч. Тогорей) [Siltstone (Togorey Creek)]	167.40	37.51	151.90
Кр 15-10-83	Алевролит (руч. Лавовый) [Siltstone (Lavovuy Creek)]	145.40	23.28	159.00
Кр 17-64-478	Алевролит (р. Хановейяха) [Siltstone (Hanoveyakh River)]	125.20	19.10	119.60
Кр 17-58-412	Алевролит (р. Сибирчатаяха) [Siltstone (Sibirchatayakha River)]	158.60	7.29	94.14
Кр 17-57-411	Алевролит (р. Сопчаю) [Siltstone (Sopchayu River)]	29.24	0.82	78.36
Кр 17-34-263	Углеродсодержащий сланец (р. Сопчаю) [Carbonaceous shale (Sopchayu River)]	42.48	4.38	99.23
Среднее		100.63	14.60	113.83
Кр 15-7-61	Зювит (р. Кара) [Suevite (Kara River)]	93.33	18.47	136.60
Кр 15-12-115	Зювит (р. Кара) [Suevite (Kara River)]	130.80	22.35	223.50
Кр 17-67-546	Зювит (р. Кара) [Suevite (Kara River)]	101.70	20.32	156.70
Кр 17-67-553	Зювит (р. Кара) [Suevite (Kara River)]	111.40	21.36	172.10
Кр 17-67-557	Зювит (р. Кара) [Suevite (Kara River)]	86.73	18.97	103.70
Среднее		104.79	20.29	158.52
Кр 15-7-41	Импактное стекло (р. Кара) [Impact glass (Kara River)]	132.90	26.04	154.80
Кр 15-12-118	Стекло черное в зювите (р. Кара) [Glass black in suevite (Kara River)]	132.80	22.97	210.90
Кр 15-12-119	Стекло сиреневого цвета (р. Кара) [Lilac impact glass (Kara River)]	142.10	23.88	261.20
Среднее		135.93	24.30	208.97
Кр 15-8-63	Тагамит (р. Анарога) [Tagamite (Anaroga River)]	159.80	24.51	227.90
Кр 15-8-66	Тагамит (р. Анарога) [Tagamite (Anaroga River)]	125.40	22.16	225.30
Среднее		142.60	23.34	226.60

Однако не исключено и некоторое первичное обогащение Ni, Co и Cr углеродсодержащих пород исходного субстрата. По данным М. А. Назарова с соавторами [32] пермские породы Пай-Хоя по сравнению с усредненным составом верхней континентальной коры характеризуются более высокими содержаниями Ti, Sc, Cr, Ni, Co и V. Отмечено, что высокие концентрации Ti, Sc, V указывают на присутствие в породах базальтового вещества, а высокие концентрации Cr и Ni предполагают, что в состав пермских пород входит некоторая примесь ультраосновного состава. Источником этого базальтового и ультраосновного материала по мнению М. А. Назарова могли послужить продукты эрозии поднимающихся Уральских гор. Поэтому нельзя полностью исключить частичное обогащение Ni, Co и Cr пород мишени за счет уральского материала, а при интенсивной постимпактной гидротермальной деятельности в породах мишени и импактатах

возможны мобилизация, переотложение и концентрирование рудного вещества.

В углеродсодержащих породах окружения Карской астроблемы методами математической статистики установлена сильная корреляция между элементами Cu, Zn, Sr, Y, HREE и U, которая указывает на генетическую связь рудных и редкоземельных минералов. Ni, Co, Zn и Cr тесно связаны между собой и концентрируются в рудных минералах, при этом, установлено, что Ni и Co входят в состав сульфидных минералов в виде примесей. Элементы Mo, Tl и V обычно сорбируются аквагенным органическим веществом, поэтому имеют первично осадочную природу. Данные факторного анализа свидетельствуют о привносе редких компонентов (Cs, Rb, Th, Nb, Ta, Sn, Be, Sc и Pb), связанных с постимпактной гидротермальной деятельностью.

Заключение

В результате статистического анализа геохимической специфики углеродсодержащих пород окружения Карской астроблемы корреляционным, факторным и иерархическим кластерным методами выявлены положительные и отрицательные корреляционные связи между редкими и рудными компонентами. Данные факторного анализа свидетельствуют о мобилизации, переконцентрировании и привносе рудных и редкоземельных элементов в дезинтегрированные породы мишени постимпактными гидротермальными флюидами. В то же время, полученные данные указывают на вероятный привнос Ni, Co и Cr в углеродсодержащие породы окружения Карской астроблемы за счет частичного переноса рассеянного вещества метеорита при постимпактной гидротермальной деятельности.

Благодарности: Авторы выражают благодарность А. С. Парамонову, Е. М. Тропникову, С. И. Исаенко за помощь в проведении аналитических работ, Н. И. Максименко за предоставленные данные ICP-MS содержания рудных компонентов в зювитах Карской астроблемы. Работа выполнена в рамках государственного задания ИГ ФИЦ Коми НЦ и ИГ КарНЦ.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневский С. А. Астроблемы. Новосибирск: Нонпарель, 2007. 288 с.
2. Геология астроблем. Под ред. Масайтиса В.Л., Данилина А.Н., Машака М.С., Райхлина А.И., Селивановской Т.В., Шаденкова Е.М.. Л.: Недра, 1980. 231 с.
3. Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя. Отв. редактор В. Л. Масайтис. Л.: Наука, 1990. 185 с.
4. Trieloff M., Deutsch A., Jessberger E. K. The age of the Kara impact structure, Russia // *Meteorit. and Planet. Sci.* 1998. Vol. 33. No. 2. P. 361–372.
5. Мащак М. С., Езерский В. А., Масайтис В. Л. Геолого-петрографическое и минералогическое изучение измененных пород Карской структуры в связи с оценкой ее перспектив на полезные ископаемые. Л.: ВСЕГЕИ. ВО КРГФ, 1979. 293 с.
6. Mashchak M. S. Morphology and structure of the Kara and Ust'-Kara astroblemes // *International Geology Review*. 1991. Vol. 33. No. 5. P. 433–447.
7. Зархидзе Д. В., Пискун П. П., Красножен А. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000. Издание второе. Серия Вайгачско-Пайхойская. Листы R-41-XXVIII, XXIX (Усть-Кара). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. 180 с.
8. Удоратин В. В., Конанова Н. В., Попов И. В. Глубинное строение Карской кольцевой структуры // *Известия Коми научного центра УрО РАН*. 2010. Вып. 4. С. 47–52.
9. Шишкин М. А., Шкарубо С.И., Молчанова Е. В., Маркина Н. В., Молчанова Е. В., Ванштейн Б. Г., Зинченко А. Г., Зуйкова О. Н., Калаус С. В., Козлов С. А., Костин Д. А., Котляр Г. В., Парамонова М. С., Певзнер В. С., Попов М. Я., Пухонто С. К., Савенкова Г. Б., Солонина С. Ф., Чудакова Д. В., Шипилов Э. В., Яковлева Т. В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Южно-Карская. Лист R-41 – Амдерма. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 383 с.
10. Юшкин Н. П., Лысюк А. Ю. Сценарий и основные параметры Карского импактного события // *Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН*. 2001. № 8. С. 14–17.
11. Koeberl C., Nazarov M. A., Harrison T. M., Sharpton V. L., Murali A. V., Burke K. The Kara and Ust-Kara impact structures (USSR) and their relevance to the K/T boundary event. [Pap.] *Interdiscip. Conf. Impacts, Volcanism, and Mass Mor. tality, Snowbird, Utah, 20-23 Oct., IILPi Contrib.*, 1988. No. 676. P. 95–96.
12. Shumilova T. G., Isaenko S. I., Ulyashev V. V., Kazakov V. A., Makeev B. A. After-coal diamonds: an enigmatic type of impact diamonds // *European Journal of Mineralogy*. 2018. Vol. 30. No. 1. P. 61–76.
13. Shumilova T. G., Zubov A. A., Isaenko S. I., Karateev I. A. & Vasiliev A. L. Mysterious long-living ultrahigh-pressure or secondary impact crisis // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10. 2591 P.
14. Shumilova T. G., Ulyashev V. V., Kazakov V. A., Isaenko S. I., Vasil'ev E. A., Svetov S. A., Chazhengina Y., Kovalchuk N. S. Karite – diamond fossil: a new type of natural diamond // *Geoscience Frontiers*. 2020. Vol. 11. No. 4. P. 1163–1174.
15. Фишман М. В. Позднемезозойский вулканизм Карского побережья. Геология и полезные ископаемые северо-востока европейской части СССР. Ежегодник Ин-та геологии Коми фил. АН СССР, 1974. С. 118–122.
16. Маслов М. А. О происхождении Карской депрессии // *Метеоритика*. 1977. № 36. С. 123–130.
17. Бадюков Д. Д., Райтала Й. Норденшельдовская российско-финская Карская экспедиция // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2001. № 8. С. 18–19.
18. Мальков Б. А. На байдарке и вездеходе по Карской астроблеме // *Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН*. 2001. № 8. С. 20–21.
19. Nazarov M. A., Badjuiov D. D., Barsukova L. D., Alekseev A. S. Reconstruction of original morphology of the Kara impact structure and its relevance to the k/t boundary event // *Lunar and Planet. Sci., Houston (Tex.)*. 1991. Vol. 22. P. 959–960.
20. Shumilova T., Isaenko S., Zubov A. 3D Modeling of Suevite Massifs with UHPHT Glasses at the Kara Astrobleme and the Ust'-Kara Area (Pay-Khoy, Kara seashore, Arctic, Russia) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. Vol. 609. 012053 p. DOI:10.1088/1755-1315/609/1/012053
21. Ковальчук Н. С., Шумилова Т. Г. Минералого-геохимические особенности черных сланцев окружения Карской астроблемы (Пай-Хой) // *Литосфера*. 2020. Т. 20. № 2. С. 168–183.
22. Ковальчук Н. С., Макеев Б. А., Светов С. А. Минералого-геохимическая специфика углеродистых пород окружения Усть-Карской астроблемы (Пай-Хой) // *Вестник геонаук*. 2021 № 11. С. 3–15.
23. Максименко Н. И., Шумилова Т. Г., Ковальчук Н. С. Петрологическая характеристика разновидностей зювитов Карской астроблемы (Пай-Хой, Россия) // *Петрология*. 2020. № 6. С. 629–649.
24. Светов С. А., Степанова А. В., Чаженгина С. Ю., Светова Е. Н., Михайлова А. И., Рыбникова З. П., Парамонов А. С., Утицина В. Л., Колодей В. С., Эхова М. В. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // *Труды КарНЦ РАН*. 2015. № 7. С. 54–73.
25. Юдович Я. Э., Шишкин М. А., Лютиков Н. В., Кетрис М. П., Беляев А. А. Геохимия и рудогенез черных сланцев

- Лемвинской зоны Севера Урала. Сыктывкар: Пролог, 1998. 340 с.
26. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ Наука, 1994. 304 с.
27. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the Oceanic Basins // Geol. Soc. Spec. Publ.* 1989. Vol. 42. P. 313–345.
28. Бахтин А. И., Низамутдинов Н. М., Хасанова Н. М., Нуриева Е. М. Факторный анализ в геологии: Учебное пособие. Казань: Казанский государственный университет, 2007. 32 с.
29. Наумов М. В. Основные закономерности постимпактного гидротермального процесса // *Астрономический вестник.* 1996. Т. 30. № 1. С. 25–32.
30. Abramov O., Kring D. A. Numerical Modeling of an Impact-Induced Hydrothermal System at the Sudbury Crater // *J. Geophys. Res. (Planets).* 2004. Vol. 109. P. 10007–10023.
31. Юдович Я. Э., Беляев А. А., Кетрис М. П. Геохимия и рудогенез черносланцевых формаций Пай-Хоя. СПб: Наука, 1998. 366 с.
32. Назаров М. А., Бадюков Д. Д., Алексеев А. С., Колесников Е. М., Кашкаров Л. Л., Барсукова Л. Д., Супонева И. В., Колесов Г. М. Карская ударная структура и ее связь с мел-палеогеновым событием // *Бюл. МОИП, Отд. геол.* 1993. Т. 68. № 3. С. 13–32.
33. Koeberl C. Identification of meteoritic components in impactites. In: Grady M. M., Hutchison R., McCall G.J.H. Rothery D.A. (eds) // *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects. Geological Society, London, Special Publications.* 1998. Vol. 140. P. 133–153.
34. Сергиенко Е. С., Цельмович В. А., Попов В. В., Цибульская А. Е., Дрбкина Е. А., Петров И. Н. Микроструктура, состав и магнитные свойства зювитов Карской астроблемы. *Палеомагнетизм и магнетизм горных пород. Материалы Международного семинара.* СПб, 2010. С. 227–233.
35. Мальков Б. А., Филиппов В. Н. Сульфиды никеля и меди в жильных тагамитах Карской астроблемы. *Теория, история, философия и практика минералогии: материалы IV Международного минералогического семинара.* Сыктывкар: Геопринт, 2006. С. 162–165.

PETROLOGY, VOLCANOLOGY, GEOCHEMISTRY

UDC 552.08:553.08:550.42

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/82-99>

Received: 06.07.2023

Accepted: 11.09.2023

Published online: 29.09.2023

Features of carbonaceous rocks surrounding the Kara astrobleme: statistical analysis of geochemical data

©2023 N. S. Kovalchuk¹✉, T. G. Shumilova¹, S. A. Svetov²

¹*Institute of Geology of Komi Science Centre of the Ural Branch of Russian Academy of Sciences, 54 Pervomaiskaya ul., Syktывkar, 167000, Russian Federation*

²*Institute of Geology of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 11 Pushkinskaya ul., Petrozavodsk, 185910, Russian Federation*

Abstract

Introduction: The Kara astrobleme is specific by the composition of the target rocks, represented by carbonaceous shales and siltstones, primarily enriched with useful components. Large astroblemes reveal intensive hydrothermal processing of host rocks, which can stimulate the mobilization, redeposition and concentration of ore matter. In this regard, to establish a possible post-impact hydrothermal effect on the target rocks, including with the participation of asteroid matter, we analyzed the geochemical composition of carbon-containing rocks of the surrounding of the Kara astrobleme using multidimensional statistics.

Methodology: We conducted the analysis of the material composition of carbonaceous rocks of the Kara astrobleme surrounding by methods of multidimensional statistics – correlation, factorial and hierarchical cluster methods.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Natalia S. Kovalchuk, e-mail: kovalchuk@geo.komisc.ru

Results and discussion: In the carbonaceous rocks of the Kara astrobleme surrounding, a strong relationship between the elements Cu, Zn, Sr, Y, HREE and U has been established by mathematical statistics, which indicates a genetic relationship between ore and rare earth minerals. Ni, Co, Zn and Cr are strongly correlated with each other and are concentrated in ore minerals. The elements Mo, Tl and V are genetically connected with aquagenic organic matter. The factor analysis data indicate the introduction of rare components (Cs, Rb, Th, Nb, Ta, Sn, Be, Sc and Pb) resulted with hydrothermal activity. We have established that the carbonaceous rocks of the target around the zone of the suevites distribution are characterized by higher contents of Ni, Co and Cr, relative to the rocks of the initial substrate set far from the rim of the astrobleme.

Conclusion: As a result, we revealed the geochemical specificity of the components, generally indicating the contamination of the target rocks of the Kara astrobleme by some ore and rare earth elements by the post-impact hydrothermal activity, mobilization, redeposition and concentration of the substance. The analysis of the contents of Ni, Cr and Co indicates partial enrichment of the target rocks by cosmic matter in the area of intense impact crushing, disintegration and hydrothermal mineralization.

Keywords: carbon shales, geochemistry, multidimensional statistics, Kara astrobleme.

For citation: Kovalchuk N. S., Shumilova T. G., Svetov S. A. Features of carbonaceous rocks surrounding the Kara astrobleme: statistical analysis of geochemical data // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 3, pp. 82–99. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/3/82-99>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

- Vishnevskiy S. A. *Astroblemy* [Astroblems]. Novosibirsk, Nonparel' publ., 2007, 288 p. (In Russ.)
- Geologiya astroblem* [Geology of astroblemes]. Ed. Masaytisa V. L., Danilina A. N., Mashchaka M. S., Raykhlina A. I., Selivanovskoy T. V., Shadenkova E. M.. Leningrad, Nedra publ., 1980, 231 p. (In Russ.)
- Impaktnyye kratery na rubezhe mezozoya i kaynozoya* [Impact craters at the turn of the Mesozoic and Cenozoic]. Otv. redaktor V. L. Masaytis. Leningrad, Nauka publ., 1990, 185 p. (In Russ.)
- Trieff M., Deutsch A., Jessberger E. K. The age of the Kara impact structure, Russia. *Meteorit. and Planet. Sci.*, 1998, vol. 33, no. 2, pp. 361–372.
- Mashchak M. S., Yezerskiy V. A., Masaytis V. L. *Geologo-petrograficheskoye i mineralogicheskoye izucheniye izmenennykh porod Karskoy struktury v svyazi s otsenkoy yeye perspektiv na poleznyye iskopayemye* [Geological-petrographic and mineralogical study of altered rocks of the Kara structure in connection with the assessment of its prospects for minerals]. Leningrad, VSEGEI. VO KRGF publ., 1979, 293 p. (In Russ.)
- Mashchak M. S. Morphology and structure of the Kara and Ust'-Kara astroblemes. *International Geology Review*, 1991, vol. 33, no. 5, pp. 433–447.
- Zarkhidze D. V., Piskun P. P., Krasnozhen A. S. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200 000. Izdaniye vtoroye. Seriya Vaygachskopaykhoyskaya. Listy R-41-XXVIII, XXIX (Ust'-Kara). Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:200 000. Second edition. Vaigach-Paikhoi series. Sheets R-41-XXVIII, XXIX (Ust'-Kara). Explanatory letter]. Moscow, VSEGEI publ., 2017, 180 p. (In Russ.)
- Udoratin V. V., Konanova N. V., Popov I. V. Glubinnoye stroyeniye Karskoy koltsevoy struktury [Deep structure of the Kara ring structure]. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN – News of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2010, vol. 4, pp. 47–52 (In Russ.)
- Shishkin M. A., Shkarubo S. I., Molchanova E. V., Markina N. V., Vanshteyn B. G., Zinchenko A. G., Zuykova O. N., Kalas S. V., Kozlov S. A., Kostin D. A., Kotlyar G. V., Paramonova M. S., Pevzner V. S., Popov M. Ya., Pukhonto S. K., Savenkova G. B., Solonina S. F., Chudakova D. V., Shipilov E. V., Yakovleva T. V. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Yuzhno-Karskaya. List R-41 – Amderma. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). South Kara series. Sheet R-41 – Amderma. Explanatory letter]. Saint Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI publ., 2012, 383 p. (In Russ.)
- Yushkin N. P., Lysyuk A. Yu. Stsenariy i osnovnyye parametry Karskogo impaktnogo sobytiya [Scenario and main parameters of the Kara impact event]. *Vestnik IG Komi NC UrO RAN – Bulletin of the IG Komi NC UrO RAS*, 2001, no. 8, pp. 14–17 (In Russ.)
- Koerberl C., Nazarov M. A., Harrison T. M., Sharpton V. L., Murali A. V., Burke K. The Kara and Ust'-Kara impact structures (USSR) and their relevance to the K/T boundary event. [Pap.] *Interdiscip. Conf. Impacts, Volcanism, and Mass Mor. talyty, Snawbird, Utah, 20-23 Oct. IILPi Contrib.*, 1988, no. 676, pp. 95–96.
- Shumilova T. G., Isaenko S. I., Ulyashev V. V., Kazakov V. A., Makeev B. A. After-coal diamonds: an enigmatic type of impact diamonds. *European Journal of Mineralogy*, 2018, vol. 30, no. 1, pp. 61–76.
- Shumilova T. G., Zubov A. A., Isaenko S. I., Karateev I. A. & Vasiliev A. L. Mysterious long-living ultrahigh-pressure or secondary impact crisis. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, 2591 p.
- Shumilova T. G., Ulyashev V. V., Kazakov V. A., Isaenko S. I., Vasil'ev E. A., Svetov S. A., Chazhengina Y., Kovalchuk N. S. Karite – diamond fossil: a new type of natural diamond. *Geoscience Frontiers*, 2020, vol. 11, no. 4, pp. 1163–1174.
- Fishman M. V. Pozdnemezozoyeskiy vulkanizm Karskogo poberezh'ya [Late Mesozoic volcanism of the Kara coast]. *Geologiya i poleznyye iskopayemye severo-vostoka yevropeyskoy chasti SSSR. Yezhegodnik Instituta geologii Komi filiala. AN SSSR – Yearbook of the Institute of Geology of Komi phil. USSR Academy OF Sciences*, 1974, pp. 118–122 (In Russ.)
- Maslov M.A. O proiskhozhdenii Karskoy depressii [On the origin of the Kara depression]. *Meteoritika – Meteoritics*, 1977, no. 36, pp. 123–130 (In Russ.)
- Badyukov D. D., Raytala Y. Nordenshel'dovskaya rossiysko-finskaya Karskaya ekspeditsiya [Nordensheldovsky Russian-Finnish Kara Expedition]. *Vestnik Instituta geologii Komi NC UrO RAN – Bulletin of the Institute of Geology of Komi NC UrO RAS*, 2001, no. 8, pp. 18–19 (In Russ.)

18. Mal'kov B. A. Na baydarke i vezdekhode po Karskoy astrobleme [On a kayak and an all-terrain vehicle on the Kara astrobleme]. *Vestnik Instituta geologii Komi NC UrO RAN – Bulletin of the Institute of Geology of Komi NC UrO RAS*, 2001, no. 8, pp. 20–21 (In Russ.)
19. Nazarov M. A., Badjuiov D. D., Barsukova L. D., Alekseev A. S. Reconstruction of original morphology of the Kara impact structure and its relevance to the k/t boundary event. *Lunar and Planet. Sci., Houston (Tex.)*, 1991, vol. 22, pp. 959–960.
20. Shumilova T., Isaenko S., Zubov A. 3D Modeling of Suevite Massifs with UHPHT Glasses at the Kara Astrobleme and the Ust'-Kara Area (Pay-Khoy, Kara seashore, Arctic, Russia). *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2020, vol. 609, 012053 p. DOI:10.1088/1755-1315/609/1/012053
21. Kovalchuk N. S., Shumilova T. G. Mineralogo-geokhimicheskiye osobennosti chernykh slantsev okruzheniya Karskoy astroblemy (Pay-Khoy) [Mineralogical and geochemical features of black shales surrounding the Kara astrobleme (Pay-Khoy)]. *Litosfera – Litosfera*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 168–183 (In Russ.)
22. Kovalchuk N. S., Makeyev B. A., Svetov S. A. Mineralogo-geokhimicheskaya spetsifika uglerodistykh porod okruzheniya Ust'-Karskoy astroblemy (Pay-Khoy) [Mineralogical and geochemical specificity of carbonaceous rocks surrounding the Ust'-Kara astrobleme (Pay-Khoy)]. *Vestnik geonauk – Bulletin of Geosciences*, 2021, no. 11, pp. 3–15 (In Russ.)
23. Maksimenko N. I., Shumilova T. G., Kovalchuk N. S. Petrological Characteristics of Suevite Varieties in the Kara Astrobleme, Pay-Khoy, Russia. *Petrology – Petrology*, 2020, vol. 28, no. 6, pp. 549–568. DOI: 10.1134/S0869591120050033
24. Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Mikhaylova A. I., Rybnikova Z. P., Paramonov A. S., Utitsina V. L., Kolodey V. S., Ekhovala M. V. Pretsizionnyy (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornyx porod i mineralov: metodika i otsenka tochnosti rezul'tatov na primere rannedokembriyskikh mafitovykh kompleksov [Precision (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of the composition of rocks and minerals: methodology and assessment of the accuracy of the results on the example of the Early Precambrian mafic complexes]. *Trudy KarNC RAN – Proceedings of the KarNC RAN*, 2015, no. 7, pp. 54–73 (In Russ.)
25. Yudovich Ya. E., Shishkin M. A., Lyutikov N. V., Ketris M. P., Belyayev A. A. *Geokhimiya i rudogenez chernykh slantsev Lemvinskoy zony Severa Urala* [Geochemistry and ore genesis of black shales of the Lemva zone of the Northern Urals]. Syktyvkar, Prolog publ., 1998, 340 p. (In Russ.)
26. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Elementy-primesi v chernykh slantsakh* [Elements-impurities in black shales]. Ekaterinburg, UIF Nauka publ., 1994, 304 p. (In Russ.)
27. Sun S. S., McDonough W. F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Magmatism in the Oceanic Basins. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, 1989, vol. 42, pp. 313–345.
28. Bakhtin A. I., Nizamutdinov N. M., Khasanova N. M., Nuriyeva E. M. *Faktornyy analiz v geologii: Uchebnoye posobiye* [Factor analysis in geology: Textbook]. Kazan, Kazanskiy gosudarstvennyy universitet publ., 2007, 32 p. (In Russ.)
29. Naumov M. V. Osnovnyye zakonomernosti postimpaktnogo gidrotermal'nogo protsesssa [The main regularities of the post-impact hydrothermal process]. *Astronomicheskii vestnik – Astronomical Bulletin*, 1996, vol. 30, no. 1, pp. 25–32 (In Russ.)
30. Abramov O., Kring D. A. Numerical Modeling of an Impact-Induced Hydrothermal System at the Sudbury Crater. *J. Geophys. Res. (Planets)*, 2004, vol. 109, pp. 10007–10023.
31. Yudovich Ya. E., Belyayev A. A., Ketris M. P. *Geokhimiya i rudogenez chernoslantsevyykh formatsiy Pay-Khoya* [Geochemistry and ore genesis of Pai-Khoy black shale formations]. Saint Petersburg, Nauka publ., 1998, 366 p. (In Russ.)
32. Nazarov M. A., Badyukov D. D., Alekseyev A. S., Kolesnikov E. M., Kashkarov L. L., Barsukova L. D., Suponeva I. V., Kolesov G. M. Karskaya udarnaya struktura i yeye svyaz' s mel-paleogenovym sobytiyem [Kara impact structure and its relationship with the Cretaceous-Paleogene event]. *Bulletin MOIP, Department of Geology*, 1993, vol. 68, no. 3, pp. 13–32 (In Russ.)
33. Koeberl C. Identification of meteoritic components in impactites. In: Grady M.M., Hutchison R., McCall G.J.H. Rothery D. A. Ed. *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects. Geological Society, London, Special Publications*, 1998, vol. 140, pp. 133–153.
34. Sergiyenko E. S., Tselmovich V. A., Popov V. V., Tsibul'skaya A. E., Drabkina E. A., Petrov I. N. Mikrostruktura, sostav i magnitnyye svoystva zyuvitov Karskoy astroblemy [Microstructure, composition and magnetic properties of suevites of the Kara astrobleme]. *Paleomagnetizm i magnetizm gornyx porod. Materialy Mezhdunarodnogo seminarra* [Paleomagnetism and magnetism of rocks. Proceedings of the International Seminar]. Saint Petersburg publ., 2010, pp. 227–233 (In Russ.)
35. Malkov B. A., Filippov V. N. Sulfidy nikelya i medi v zhil'nykh tagamitakh Karskoy astroblemy [Nickel and copper sulfides in vein tagamites of the Kara astrobleme]. *Teoriya, istoriya, filosofiya i praktika mineralogii: materialy IV Mezhdunarodnogo mineralogicheskogo seminarra* [Theory, History, Philosophy and Practice of Mineralogy: proceedings of the IV International Mineralogical Seminar]. Syktyvkar, Geoprint publ., 2006, pp. 162–165 (In Russ.).

Ковальчук Наталья Сергеевна, к.г.-м.н., н.с., Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация; e-mail: kovalchuk@geo.comisc.ru; ORCID 0000-0003-4153-6517.

Шумилова Татьяна Григорьевна, д.г.-м.н., гл.н.с., Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Российская Федерация; e-mail: tg_shumilova@mail.ru; ORCID 0000-0002-1772-3606.

Светов Сергей Анатольевич, д.г.-м.н., директор института, Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск, Российская Федерация; e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru; ORCID 0000-0002-4872-1662.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Natalya S. Kovalchuk, PhD in Geol.-Min., Researcher, Institute of Geology of Komi NC UrO RAN, Syktyvkar, Russian Federation; e-mail: kovalchuk@geo.comisc.ru; ORCID 0000-0003-4153-6517.

Tatyana G. Shumilova, PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Senior Researcher, Institute of Geology of Komi NC UrO RAN, Syktyvkar, Russian Federation; e-mail: tg_shumilova@mail.ru; ORCID 0000-0002-1772-3606.

Sergey A. Svetov, PhD, Dr. habil. in Geol.-Min., Director of the Institute, Institute of Geology KarSC RAN, Petrozavodsk, Russian Federation; e-mail: ssvetov@krc.karelia.ru; ORCID 0000-0002-4872-1662.

Authors have read and approved the final manuscript.