Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 552.08:553.08:550.42

DOI: 10.19110/geov.2021.11.1

Минералого-геохимическая специфика углеродистых пород окружения Усть-Карской астроблемы (Пай-Хой)

Н. С. Ковальчук¹, Б. А. Макеев¹, С. А. Светов²¹ Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, kovalchuk@geo.komisc.ru² Институт геологии КарНЦ РАН, Петрозаводск

Изучены верхнепалеозойские (P_{1pt-ng}) углеродистые сланцы и алевролиты окружения Усть-Карской астроблемы (Пай-Хой). Проведен анализ минералогических и геохимических особенностей углеродистых пород окружения Усть-Карской астроблемы с применением комплекса современных методов исследований для выявления возможной мобилизации, переотложения и концентрирования рудного вещества в условиях интенсивной постимпактной гидротермальной переработки. Определены геохимические особенности углеродистых отложений, претерпевших постимпактные гидротермальные изменения, в районе Усть-Карской импактной структуры. Выявлены повышенные содержания Ti, Mn, Cr, Zr, Ni, Li, Co, Sc и PЗЭ. Диагностированы собственные редкометалльные и редкоземельные минералы (монацит, флоренсит), сульфиды (пирит, халькопирит, марказит, сфалерит), апатит, барит, анатаз, хромшпинелиды.

Ключевые слова: углеродистые породы, металлоносность, гидротермальные процессы, постимпактные преобразования, рудоносный потенциал.

Mineralogical and geochemical specificity of carbonaceous rocks from the area of Ust'-Kara astrobleme (Pay-Khoy)

N. S. Kovalchuk¹, B. A. Makeev¹, S. A. Svetov²¹Yushkin Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, Syktывkar, Russia² Institute of geology KarSC RAS, Petrozavodsk, Russia

We studied Upper Paleozoic (P_{1pt-ng}) carbonaceous shales and siltstones from the area of the Ust'-Kara astrobleme (Pay-Khoy). We analyzed mineralogical and geochemical features of carbonaceous rocks of the target in the vicinity of the Ust'-Kara astrobleme event using a complex of modern methods to identify possible mobilization, redeposition and concentration of ore substance under intensive post-impact hydrothermal activity. Geochemical features of carbon deposits, altered by post-impact hydrothermal processes in the vicinity of the Ust'-Kara impact structure, have been determined. We found anomalous contents of Ti, Mn, Cr, Zr, Ni, Li, Co, Sc and REE. Inherent rare metal and rare earth minerals (monazite, florensite), sulfides (pyrite, chalcopirite, marcasite, sphalerite), apatite, barite, anatase, chrome spinels were diagnosed.

Keywords: carbonaceous rocks, metal content, hydrothermal processes, post-impact transformations, ore potential.

Введение

К настоящему времени на Земле достоверно установлены более 200 импактных структур, в том числе 20 на территории России. Их геологическое строение и происходящие при кратерообразовании специфические процессы изменения вещества — ударный метаморфизм, плавление, дробление, переотложение, фазовые преобразования и т. д. — сравнительно детально изучены [2, 3, 7, 22], однако гидротермальная деятельность исследована лишь в общем виде [9, 26]. Между тем проявления гидротермальной деятельности известны в большинстве импактных структур на Земле [17, 25, 26], а в ряде астроблем с ней связаны рудопроявления, в том числе и уникальные месторождения,

такие, например, как золотоурановое месторождение Витватерсранд в Южной Африке или медно-никелевое месторождение Садбери в Канаде.

Любое событие, связанное с падением космических тел на земную поверхность, где присутствует жидкая и/или твердая фаза H_2O , создает термальную аномалию и вызывает формирование систем конвекционного водообмена, тем самым иницируя гидротермальные процессы [9]. Источником растворов при этих процессах являлись поверхностные и подземные воды, а также флюиды, высвобожденные из минералов под воздействием ударных нагрузок, а источником растворенных минералов компонентов — ударно-метаморфизованные породы мишени и продукты импактного плавления.

Для цитирования: Ковальчук Н. С., Макеев Б. А., Светов С. А. Минералого-геохимическая специфика углеродистых пород окружения Усть-Карской астроблемы (Пай-Хой) // Вестник геонаук. 2021. 11(323). С. 3–15. DOI: 10.19110/geov.2021.11.1.

For citation: Kovalchuk N. S., Makeev B. A., Svetov S. A. Mineralogical and geochemical specificity of carbonaceous rocks from the area of Ust'-Kara astrobleme (Pay-Khoy). Vestnik of Geosciences, 2021, 11(323), pp. 3–15, doi: 10.19110/geov.2021.11.1.

Особенностью Усть-Карской астроблемы является специфический состав пород мишени, представленный углеродсодержащими сланцами и алевролитами, первично обогащенными полезными компонентами [15]. Данное обстоятельство теоретически может быть основанием для формирования объектов с высокими концентрациями рудных компонентов как в результате формирования самих импактитов, так и при последующих преобразованиях в существенном объеме закратерного пространства [29]. В условиях интенсивной постимпактной гидротермальной переработки могли происходить мобилизация, перетолжение и концентрирование рудного вещества в палеозойских углеродистых толщах окружения Усть-Карской астроблемы.

Объект и методы исследования

Объектом исследований являются верхнепалеозойские углеродистые породы нерасчлененных пэтаркинской свиты и нгбетаяхинской толщи (P_{1pt-ng}) окружения Усть-Карской астроблемы, которая образовалась около 70 млн лет назад [7].

В результате экспедиционных работ 2019 г. подробно описаны и опробованы коренные выходы углеродистых пород вверх по разрезу — от приконтактной зоны с импактитами в незатронутые постимпактными преобразованиями толщи в долинах рек Лабияха, Б. Хондейяха, Пэкоцяяха и вдоль побережья Байдарацкой губы.

Проведен анализ петрологических, минералогических и геохимических особенностей углеродистых сланцев и алевролитов мишени в районе Усть-Карского импактного события с применением комплекса современных методов исследований для выявления возможной мобилизации, перетолжения и концентрирования рудного вещества в условиях интенсивной постимпактной гидротермальной переработки.

Структурно-текстурные особенности пород изучались в петрографических шлифах с помощью поляризационного микроскопа POLAM R-312 (LOMO).

Содержание микроэлементов в углеродистых породах определено методом ИСП-МС (масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой) на спектрометре ICP-MS X Series 2+UP-266 mastro (ЦКП, ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, аналитик А. С. Парамонов, по методике [11]). Разложение образцов растертой породы проводилось путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа использовались навески образцов массой 0.1 г.

Последующие аналитические исследования проведены в ЦКП «Геонаука», ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Содержание основных оксидов в породе определено силикатным анализом на 14 компонентов по стандартным методикам (аналитик О. В. Кокшарова). Состав минералов определялся на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой Oxford Instruments X-Max (аналитик Е. М. Тропников) в аншлифах с углеродным напылением, подготовленных стандартным способом. Изображения получены в режиме обратнорассеянных электронов (BSE) при ускоряющем напряжении 20 кВ. Использованная модификация оборудования не определяет содержания СО- и ОН-групп.

Фазовая диагностика углеродного вещества в углеродистых сланцах и алевролитах (в петрографических шлифах без покровного стекла) проводилась с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света на рамановском микроспектрометре 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).

Термический анализ углеродистых пород проводился на дериватографе Shimadzu DTG-60H. Нагревание растертого образца породы до 1000 °С происходило при атмосферном давлении в платиновых тиглях, скорость нагрева 10 °С/сек, погрешность измерения массы ± 1 % (аналитик Е. М. Тропников).

Определение изотопного состава углерода в породах производилось в режиме непрерывного потока гелия (CF-IRMS) на аналитическом комплексе, включающем элементный анализатор Flash EA 1112, соединенный через газовый коммутатор Conflo IV с масс-спектрометром Delta V Advantage (Thermo Fisher Scientific; аналитик И. В. Смолева). В процессе работы были использованы международный стандарт USGS-40 (L-Glutamic acid) и лабораторный стандарт Acetanilide ($\text{C}_8\text{H}_9\text{NO}$). Значения $\delta^{13}\text{C}$ даны относительно стандарта PDB, ошибка измерения σ составляет ± 0.15 ‰.

Содержание органического углерода в породе определялось на экспресс-анализаторе АН-7529 после получения нерастворимого в концентрированной соляной кислоте остатка породы (НОП). В качестве стандарта использовались глюкоза и малоуглеродистая сталь. Данные по $\text{C}_{\text{орг}}$, полученные при анализе, пересчитывались на исходную породу. Стандартное отклонение в результате 4-кратного сжигания малоуглеродистой стали, содержащей 0.804 % С, составило 0.008 % (аналитик В. А. Лобанов).

Геологическая характеристика Усть-Карской астроблемы

Район работ находился в зоне Усть-Карского импактного события. Эта астроблема представляет собой кратер диаметром около 25 км и находится в 5–15 км к северу от борта Карской астроблемы. Ударные кратеры расположены на северо-востоке европейской части России и относятся к структуре Пай-Хойского хребта Югорского полуострова. Усть-Карская астроблема находится в 240 км к северу от г. Воркуты, на побережье Байдарацкой губы, северная часть астроблемы скрыта под акваторией Карского моря (рис. 1).

В геологическом строении района, где располагается Усть-Карский импактный кратер, палеозойские породы представлены отложениями нижней перми (P_{1pt-ng}), которые смяты в мелкие симметричные складки преобладающего северо-западного простирания, с углами падения крыльев 40–65°, образующие каньонообразные долины рек с высотой стенок до 40 м [7]. В составе отложений преобладают песчаники, алевролиты, аргиллиты, глинистые и углеродисто-глинистые слан-

Рис. 1. Положение Усть-Карской астроблемы: а — административно-территориальная карта; б — фрагмент Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:1 000 000 [13] с добавлениями.

Условные обозначения: 1 — сааяхинская толща: глины опокovidные, песчаные, алевролиты, переотложенные коптокластиты; 2 — коптогенный комплекс: аллогенные брекчии, тагамиты, зювиты, коптокластиты; 3 — нерасчлененные пэтаркинская свита и нгебетаяхинская толща: флишоидное переслаивание известковистых и слабоуглеродистых аргиллитов с редкими прослоями кремнистых мергелей в нижней части, ритмичное чередование известковистых полимиктовых песчаников, алевролитов, алевролитистых аргиллитов — в верхней; 4 — харапешорская свита: алевролиты, известняки алевролитистые, глинистые, петельчатые; 5 — торасовейский сиенит-монцодиоритовый плутонический комплекс: кварцевые монцониты, монцодиориты, сиениты; 6 — нерасчлененные аллохтонные породы (зювиты, глыбовые брекчии); 7 — границы астроблем; 8 — разрывные нарушения, скрытые под вышележащими образованиями: без достоверного разделения по морфокинетическим особенностям; 9 — разрывные нарушения, выходящие на картографируемую поверхность: шарьяжи главные (а — достоверные, б — предполагаемые); 10 — населенный пункт

Fig. 1. Ust'-Kara astrobleme geological position: a — administrative-territorial map; b — fragment of the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1:1 000 000, modified after [13].

1 — Saayakhinskaya strata: opokamorphic clays, sandy, siltstones, redeposited coptoclastites; 2 — coptogenic complex: allogeneic breccias, tagamites, suevites, coptoclastites; 3 — undifferentiated Patarkinskaya formation and Ngebetayakhinskaya strata: flyschoid interlayer of calcareous and low-carbon argillites with rare interlayers of siliceous marls in the lower part, rhythmic alternation of calcareous polymictic sandstones, siltstones, siltstone mudstones — in the upper; 4 — Kharapeshorskaya formation: siltstone limestones, clay, looped, siltstone; 5 — Torasovian syenite-monzodiorite plutonic complex: quartz monzonites, monzodiorites, syenites; 6 — allochthonous rocks undifferentiated (suevites, block breccias); 7 — boundaries of astroblemes; 8 — discontinuous disturbances hidden under overlying formations: reliable without separation by morphokinetic features; 9 — discontinuous disturbances emerging on the mapped surface: main nappes (a — reliable, b — assumed); 10 — locality

цы общей мощностью толщи более 1 км. Меловые платформенные отложения, наиболее молодые среди вмещающих пород мишени, сохранились лишь в обломках импактитов и брекчий. Они сложены полимиктовыми песчаниками, алевролитами, глинами с прослоями бурых углей, опок, сидеритов, известняков. Повсеместно образования палеозойского структурного этажа перекрыты рыхлыми осадками плиоцен-четвертичного возраста, представленными песками, супесями с прослоями и линзами торфа или мелкой гальки морских террас. В долинах рек Лабияха и Б. Хондейяха породы цокольного комплекса разбиты многочисленными разноориентированными трещинами, а в устье р. Лабияха имеют контакты с породами коптогенного комплекса (мегабрекциями и зювитами), которые, в свою очередь, содержат обломки цокольного комплекса [5].

Коптогенный комплекс вдоль побережья Байда-рацкой губы представлен мегабрекциями и агломерато-глыбовыми зювитами, около 3—5 % от общего объ-

ема импактитов составляют тагамиты. Видимая мощность пород коптогенного комплекса не превышает 80 м. Нижняя его часть образует мегабрекции мощностью 30—40 м, которые повсеместно залегают на перемещенных и в разной степени деформированных блоках пород перми [7].

Минералогия углеродистых пород

Углеродистые породы окружения Усть-Карской астроблемы представлены нижнепермскими алевролитами, аргиллитами, глинистыми и углисто-глинистыми сланцами с интенсивно проявившейся кварц-кальцитовой жильной минерализацией, пиритизацией. Они метаморфизованы в условиях низкой степени регионально-го метаморфизма, о чем свидетельствует присутствие в породах хлорита. В углеродистых сланцах четко видна полосчатая текстура, проявленная в чередовании тонких прослоев алевролитового и слюдяного материала.

Структура основной массы сланцев — алевролитовая, пелитоморфная. Главными породообразующими минералами являются альбит, хлорит, кварц, мусковит (80—90 %). В меньших количествах (10—20 %) присутствуют карбонаты (кальцит, доломит). Методом КР-спектроскопии диагностированы сидерит и магнетит. Карбонаты в породе встречаются в виде кристаллов и сростков с альбитом, кварцем, в ассоциации с хлоритом, пиритом, апатитом и баритом (рис. 2, а, b, d). По составу доломит является железистым (FeO — до 9.10 мас. %). В кальците постоянно отмечаются примеси MnO (до 3.63 мас. %), MgO (до 2.92 мас. %) и FeO (до 2.76 мас. %), в единичном случае встречен SrO (0.41 мас. %).

Сульфидная минерализация в углеродистых породах представлена пиритом, марказитом и халькопиритом, реже сфалеритом. В породе отмечается присутствие лимонитизированного пирита в виде фрамбоидов, образующегося предположительно за счет процесса сульфат-редукции бактериями (рис. 2, а, b, e). Сульфиды в породе ассоциируют с кварцем, хлоритом и кальцитом. Повсеместно встречаются сростки кристаллов пирита с халькопиритом, на поверхности часто покрыты «рубашками» оксида железа (рис. 2, d). В качестве включений в пирите диагностированы сфалерит, халькопирит и галенит. Марказит представлен кристаллами уплощенно-клиновидной формы и их сростками с многочисленными микровключениями галенита, кроме того, часто образует линзовидные агрегаты в хлорите (рис. 2, e—g). У пирита выявлен неоднородный состав, отмечается постоянное присутствие Ni (до 1.93 мас. %), Co (до 1.38 мас. %) и зон, обогащенных мышьяком. Максимальные концентрации As достигают 3.45 мас. %. В химическом составе марказита выявлена примесь Ni (до 7.03 мас. %), Co (до 0.52 мас. %) и Cu (до 2.76 мас. %).

Углеродистое вещество равномерно распылено в породе, а также образует в основной массе вытянутые параллельно сланцеватости линзовидные прослои и удлиненно-призматические формы размером до 100 мкм; ассоциирует с хлоритом, пиритом, реже с мусковитом, апатитом и монацитом (рис. 2, b, c, k).

Содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в углеродистых породах окружения Усть-Карской астроблемы находится в пределах 0.80—1.46 мас. %.

Результаты исследования изотопии углеродистого вещества в породах показали типичные для органи-

ческого вещества облегченные изотопные характеристики ($-23.50 \dots -24.46 \delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$). Согласно проведенным термографическим исследованиям, все образцы углеродистых сланцев содержат УВ, выгорание которого сопровождается интенсивным экзотермическим эффектом с началом окисления $355\text{—}371^\circ\text{C}$ и окончанием выгорания $453\text{—}469^\circ\text{C}$. В редких случаях термограммы характеризуются появлением второго экзотермического эффекта меньшей интенсивности с максимумом $543\text{—}557^\circ\text{C}$, указывающим на преобразование углеродистого вещества пород мишени ближайшего окружения Усть-Карской астроблемы в условиях регионального метаморфизма зеленосланцевой фации [6, 14]. Выявленные различия в температурах начала выгорания УВ и в характере экзотермического эффекта, вероятно, связаны не только с агрегатным состоянием, но и степенью разупорядоченности УВ, которая уменьшается по мере повышения уровня метаморфизма.

Тонкодисперсное рассеянное УВ, по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света, характеризуется положением G-полосы в диапазоне $1597\text{—}1601 \text{ см}^{-1}$ при среднем значении 1599 см^{-1} . Ширина на половине высоты (FWHM) G-полосы варьирует в диапазоне от 40 до 52 см^{-1} и в среднем составляет 45 см^{-1} , что соответствует, по данным Б. Вopenка [32], слабоупорядоченному углеродистому веществу, образованному в сланцах пумпеллит-эпидотовой (низкотемпературной зеленосланцевой) стадии метаморфизма.

В результате микронзондового изучения пород была установлена редкоземельная минерализация, представленная монацитом и койвинитом. В качестве акцессорных минералов диагностированы апатит, циркон, барит, анатаз, сфалерит, галенит, хромшпинелиды.

Монацит формирует зерна неправильной формы и их скопления размером от $10\text{—}20$ до 50 мкм, заполняет микрополости в межзерновом пространстве породы (рис. 2, h, i). Монацит тесно ассоциирует с кальцитом, пиритом и апатитом. Наиболее представительные химические составы монацита представлены в таблице 1. Монацит является существенно цериевым, содержит примеси SiO_2 (до 2.44 мас. %) и CaO (до 1.16 мас. %). По соотношению главных минералообразующих компонентов (Ce_2O_3 , La_2O_3 и Nd_2O_3) были выделены три разновидности: монацит-(Ce-Nd), монацит-(Ce-La) и монацит-(Nd-Ce). В составе монацита в заметных количествах присутствуют Pr_2O_3 (2.09—

Рис. 2. Электронно-микроскопические изображения породообразующих и акцессорных минералов в углеродистых сланцах и алевролитах мишени Усть-Карской астроблемы (в отраженных электронах): а — выделения апатита (Ap), кальцита (Ca) и пирита (Py) в кварц-хлоритовой массе породы; b — выделения пирита (Py) двух генераций, анатаза (Ans) в сростании с апатитом (Ap) и углеродного вещества (CM); c — сростания углеродного вещества (CM) с хлоритом (Cl); d — сростания лимонитизированного пирита (Py) с халькопиритом (Chp); e—g — выделения пирита (Py) и марказита (Ms) с микровключениями галенита (Gn); h — включение монацита (Mz) в ассоциации с пиритом (Py); i — выделения анатаза (Ans), монацита (Mz), пирита (Py), циркона (Zr) и хрошпинелида (Crs) в кварц-хлоритовой массе породы; j — зональное зерно циркона (Zr); k — включения барита (Ba) в хлорите (Cl); l — зерно флоренсита (Flr) с микровключениями пирита (Py)

Fig. 2. Electron microscopic images of rock-forming and accessory minerals in carbonaceous shales and siltstones of the target of the Ust'-Kara astrobleme (in reflected electrons): a — isolation of apatite (Ap), calcite (Ca) and pyrite (Py) in quartz-chlorite rock mass; b — isolation of pyrite (Py) of two generations, anatase (Ans) in fusion with apatite (Ap) and carbonaceous matter (CM); c — coalescence of carbonaceous matter (CM) with chlorite (Cl); d — coalescence of limonitized pyrite (Py) with chalcopyrite (Chp); e—g — isolation of pyrite (Py) and marcasite (Ms) with microinclusions of galena (Gn); h — inclusion of monazite (Mz) in association with pyrite (Py); i — isolation of anatase (Ans), monazite (Mz), pyrite (Py), zircon (Zr) and chrospinelide (Crs) in quartz-chlorite rock mass; j — zonal grains of zircon (Zr); k — inclusions of barite (Ba) in chlorite (Cl); l — grain of fluorite (Flr) with microinclusions of pyrite (Py)

4.87 мас. %), Sm_2O_3 (до 5.42 мас. %) и Gd_2O_3 (до 2.97 мас. %). Нередко он обогащен ThO_2 (до 5.54 мас. %), что, вероятно, связано в некоторых случаях с микровключениями торита. Кроме того, было встречено зональное зерно монацита, центральная часть которого обогащена торием (14.60 мас. % ThO_2) (ан. 6, 7 в табл. 1; рис. 2, i). В единичных случаях отмечаются примеси Y_2O_3 (до 3.01 мас. %) и UO_2 (0.88 мас. %).

В углеродистых сланцах на р. Лабияха встречено корродированное зерно **флоренсита** с микровключениями пирита (рис. 2, l). По химическому составу оно предположительно является **койвинитом** — Ca-Mg-Fe -содержащей разновидностью флоренсита ($(\text{Ce}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Mg})_3(\text{PO}_4, \text{HPO}_4)_2(\text{OH})_6$).

Anatam распределен в породе неравномерно, образует зерна призматической формы размером от 5–10 до 80–100 мкм, ассоциирует с кварцем, пири-

том, углеродным веществом и монацитом, встречен в тесном сростании с анатазом (рис. 2, a, f, g). По химическому составу является фторапатитом (до 4.63 мас. % F). В виде микропримесей в его составе отмечены Cl (до 1.18 мас. %) и Fe (до 0.47 мас. %).

Хромшпинелиды в черных сланцах представлены кристаллами октаэдрического облика и их обломками в кварц-хлоритовой основной массе породы. Ассоциируются с кальцитом, пиритом, анатазом и монацитом. Размер зерен не превышает 100 мкм (рис. 2, i).

Изучение зерен хромшпинелидов показало в основном их однородное внутреннее строение. По химическому составу они характеризуются широкими вариациями содержаний основных компонентов: Cr_2O_3 (35.72–53.08 мас. %), FeO (17.86–23.49 мас. %), Al_2O_3 (8.76–24.94 мас. %), Fe_2O_3 (0.69–12.99 мас. %) и MgO (6.01–11.38 мас. %) (табл. 2). Во всех изученных зер-

Таблица 1. Нормированный химический состав (мас. %) и эмпирические формулы монацита

Table 1. Normalized chemical composition (wt. %) and empirical formulas of monazite

n	Номер обр./ан. Sample No.	P_2O_5	SiO_2	CaO	Y_2O_3	La_2O_3	Ce_2O_3	Pr_2O_3	Nd_2O_3	Sm_2O_3	Gd_2O_3	ThO_2	UO_2
1	УК 19-5-25/4-1	29.85	–	–	3.01	12.80	31.03	3.50	13.84	2.18	1.48	2.31	–
2	УК 19-5-25/5-1-1	30.28	–	–	–	10.52	35.14	3.90	16.06	2.43	1.67	–	–
3	УК 19-5-25/5-5-1	29.63	–	0.25	–	10.08	33.86	4.24	15.19	3.33	2.42	–	–
4	УК 19-5-25/6-1	29.53	–	–	–	13.73	37.44	4.14	11.45	1.96	1.74	–	–
5	УК 19-5-24/6-1	27.37	1.38	0.45	–	19.13	34.30	2.83	9.00	–	–	5.54	–
6	УК 19-6-26/2-3	25.81	2.44	1.02	1.79	10.40	27.30	2.60	10.26	2.19	1.60	14.60	–
7	УК 19-6-26/2-4	29.66	–	–	–	7.23	32.92	4.87	21.42	3.05	0.85	–	–
8	УК 19-3-18/4-1	30.11	–	0.90	–	14.28	30.16	3.14	11.85	2.30	1.63	4.77	0.88
9	УК 19-3-18/5-1	30.00	–	–	–	8.57	33.02	4.10	19.73	2.82	1.75	–	–
10	УК 19-3-18/6-1	30.18	–	0.30	–	10.49	34.23	3.90	17.85	1.95	–	1.09	–
11	УК 19-3-18/7-1	29.13	–	0.65	–	23.17	35.19	2.09	7.70	–	–	2.07	–
12	УК 19-БХ 3-2/1-1	29.68	–	–	–	11.83	35.47	3.93	14.82	2.47	1.81	–	–
13	УК 19-БХ 3-2/3-1	29.63	0.86	–	–	4.06	24.45	4.52	28.08	5.42	2.97	–	–
14	УК 19-БХ 3-2/5-1	30.08	–	0.38	–	9.01	33.89	4.17	17.85	2.62	2.00	–	–
15	УК 19-П5-47/6-1	29.79	1.02	1.16	–	12.24	33.74	3.45	15.76	1.39	–	1.45	–
16	УК 19-П5-47/8-1	30.18	0.70	0.75	–	12.10	29.67	3.88	16.86	2.88	1.57	1.40	–

Формулы / Formulas

1. $(\text{Ce}_{0.45}\text{Nd}_{0.20}\text{La}_{0.19}\text{Y}_{0.06}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.05}\text{Gd}_{0.02}\text{Th}_{0.02})_{1.02}[\text{PO}_4]$; 2. $(\text{Ce}_{0.50}\text{Nd}_{0.22}\text{La}_{0.15}\text{Pr}_{0.06}\text{Sm}_{0.03}\text{Gd}_{0.02})_{0.99}[\text{PO}_4]$;
3. $(\text{Ce}_{0.49}\text{Nd}_{0.22}\text{La}_{0.15}\text{Pr}_{0.06}\text{Sm}_{0.05}\text{Gd}_{0.03}\text{Ca}_{0.01})_{1.04}[\text{PO}_4]$; 4. $(\text{Ce}_{0.55}\text{La}_{0.20}\text{Nd}_{0.16}\text{Pr}_{0.06}\text{Sm}_{0.03}\text{Gd}_{0.02})_{1.02}[\text{PO}_4]$;
5. $(\text{Ce}_{0.51}\text{La}_{0.29}\text{Nd}_{0.13}\text{Th}_{0.05}\text{Pr}_{0.04}\text{Gd}_{0.02})_{1.04}[(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4]$; 6. $(\text{Ce}_{0.41}\text{La}_{0.16}\text{Nd}_{0.15}\text{Th}_{0.14}\text{Ca}_{0.04}\text{Y}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{Sm}_{0.03}\text{Gd}_{0.02})_{1.03}[(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4]$;
7. $(\text{Ce}_{0.48}\text{Nd}_{0.30}\text{La}_{0.11}\text{Pr}_{0.07}\text{Sm}_{0.04}\text{Gd}_{0.01})_{1.01}[\text{PO}_4]$; 8. $(\text{Ce}_{0.43}\text{La}_{0.21}\text{Nd}_{0.17}\text{Th}_{0.04}\text{Ca}_{0.04}\text{Pr}_{0.04}\text{Sm}_{0.03}\text{Gd}_{0.02}\text{U}_{0.01})_{0.99}[\text{PO}_4]$;
9. $(\text{Ce}_{0.48}\text{Nd}_{0.28}\text{La}_{0.12}\text{Pr}_{0.06}\text{Sm}_{0.04}\text{Gd}_{0.02})_{1.00}[\text{PO}_4]$; 10. $(\text{Ce}_{0.49}\text{Nd}_{0.25}\text{La}_{0.15}\text{Pr}_{0.06}\text{Sm}_{0.03}\text{Ca}_{0.01}\text{Th}_{0.01})_{1.00}[\text{PO}_4]$;
11. $(\text{Ce}_{0.52}\text{La}_{0.35}\text{Nd}_{0.11}\text{Pr}_{0.03}\text{Ca}_{0.03}\text{Th}_{0.02})_{1.06}[\text{PO}_4]$; 12. $(\text{Ce}_{0.52}\text{Nd}_{0.21}\text{La}_{0.17}\text{Pr}_{0.06}\text{Sm}_{0.03}\text{Gd}_{0.02})_{1.02}[\text{PO}_4]$;
13. $(\text{Nd}_{0.39}\text{Ce}_{0.34}\text{Pr}_{0.06}\text{Sm}_{0.07}\text{La}_{0.06}\text{Gd}_{0.04})_{0.96}[(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4]$; 14. $(\text{Ce}_{0.49}\text{Nd}_{0.25}\text{La}_{0.13}\text{Pr}_{0.06}\text{Sm}_{0.04}\text{Gd}_{0.03}\text{Ca}_{0.02})_{1.01}[\text{PO}_4]$;
15. $(\text{Ce}_{0.47}\text{Nd}_{0.21}\text{La}_{0.17}\text{Ca}_{0.05}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.02}\text{Th}_{0.01})_{0.98}[(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4]$; 16. $(\text{Ce}_{0.41}\text{Nd}_{0.23}\text{La}_{0.17}\text{Pr}_{0.05}\text{Sm}_{0.04}\text{Ca}_{0.03}\text{Gd}_{0.02}\text{Th}_{0.01})_{0.97}[(\text{P}, \text{Si})\text{O}_4]$

Примечание: 6–7 — зональное зерно монацита (6 — центральная часть зерна, обогащенная ThO_2 , 7 — край зерна) (рис. 2, i).

Note. 6–7 — zonal grain of monazite (6 — central part of the grain enriched with ThO_2 , 7 — edge of the grain) (Fig. 2, i).

Таблица 2. Нормированный химический состав (мас. %) и эмпирические формулы хромшпинелидов

Table 2. Normalized chemical composition (wt. %) and empirical formulas of chrome spinelide

№ точки	№ обр./ан. / Sample No.	FeO	MgO	MnO	Cr_2O_3	Al_2O_3	V_2O_5	Fe_2O_3
1	УК 19-6-26/2-2	17.86	11.38	–	48.41	20.39	0.49	1.47
2	УК 19-6-26/1-1	19.97	9.67	–	52.15	17.10	0.42	0.69
3	УК 19-6-26/1-2	18.57	11.31	–	35.72	24.94	0.40	9.06
4	УК 19-6-26/1-3	22.21	7.52	–	53.08	10.92	0.27	6.00
5	УК 19-6-26/1-7-1 (центр)	18.37	11.29	–	45.13	22.75	0.34	2.12
6	УК 19-6-26/1-7-2 (край)	23.49	6.01	0.58	47.76	8.76	0.41	12.99
7	УК 19-6-26/7-1	21.06	9.20	–	48.15	19.54	0.47	1.57

Формулы / Formulas

1. $(\text{Mg}_{0.53}\text{Fe}_{0.47})(\text{Cr}_{1.20}\text{Al}_{0.75}\text{Fe}_{0.03}\text{V}_{0.01})_2\text{O}_4$; 2. $(\text{Fe}_{0.54}\text{Mg}_{0.46})(\text{Cr}_{1.33}\text{Al}_{0.65}\text{Fe}_{0.02}\text{V}_{0.01})_2\text{O}_4$;
3. $(\text{Mg}_{0.52}\text{Fe}_{0.48})(\text{Al}_{0.91}\text{Cr}_{0.87}\text{Fe}_{0.21}\text{V}_{0.01})_2\text{O}_4$; 4. $(\text{Fe}_{0.62}\text{Mg}_{0.38})(\text{Cr}_{1.41}\text{Al}_{0.43}\text{Fe}_{0.15}\text{V}_{0.01})_2\text{O}_4$;
5. $(\text{Mg}_{0.52}\text{Fe}_{0.48})(\text{Cr}_{1.11}\text{Al}_{0.83}\text{Fe}_{0.05}\text{V}_{0.01})_2\text{O}_4$; 6. $(\text{Fe}_{0.68}\text{Mg}_{0.31}\text{Mn}_{0.02})(\text{Cr}_{1.30}\text{Al}_{0.35}\text{Fe}_{0.34}\text{V}_{0.01})_2\text{O}_4$;
7. $(\text{Fe}_{0.56}\text{Mg}_{0.44})(\text{Cr}_{1.22}\text{Al}_{0.74}\text{Fe}_{0.04}\text{V}_{0.01})_2\text{O}_4$

нах отмечается присутствие V_2O_5 (0.27–0.49 мас. %), в единичном случае встречена примесь MnO (0.58 мас. %). Основная часть составов хромшпинелидов соответствует алюмохромитам, единичные составы соответствуют субферриалюмохромитам и субферрихромпикотиту. В краевых областях зерен хромшпинелидов встречены зоны, в которых наблюдается увеличение содержания железа и хрома со значительным уменьшением количества алюминия и магния, что характерно для проявления наложенных процессов (табл. 2, ан. 6).

Циркон встречается в основной массе породы в виде тетрагонально-дипирамидальных, хорошо ограненных кристаллов размером 30–40 мкм (рис. 2, i). В его химическом составе отмечены примеси HfO_2 (1.09–1.37 мас. %). Во вскрытом зерне установлено зональное строение, в центральной части которого присутствует ThO_2 (0.65 мас. %), при этом содержание HfO_2 снижается (рис. 2, j).

В силикатной матрице породы, в тесной ассоциации с пиритом и кальцитом развивается **анатаз** (рис. 2, b, d, i). Он встречается в виде вытянутых призматических кристаллов и их сростаний, образует поликристаллические агрегаты размером 20–40 мкм. В виде микровключений в анатазе встречен циркон. В составе циркона отмечены примеси Fe_2O_3 (до 2.60 мас. %), V_2O_5 (до 1.41 мас. %) и CaO (до 0.18 мас. %).

Барит встречается в виде пластинчатых и игольчатых кристаллов размером 10–20 мкм, чаще образует радиально-лучистые агрегаты, заполняя пустоты в карбонатах, а также выполняет микропрожилки в основной массе породы (рис. 2, k). В химическом составе барита отмечается примесь SrO (до 4.21 мас. %).

Геохимия углеродистых пород

В районе Усть-Карской астроблемы углеродистые сланцы и алевролиты по составу петрогенных элементов и значениям петрохимических модулей соответствуют нормо- и суперсиаллитам, т. е. глинисто-алевритистым осадочным породам [15]. Петрохимические

особенности углеродистых пород окружения Усть-Карской астроблемы заключаются в преобладании FeO над Fe_2O_3 при общем содержании железа, близком к кларковому, и резком преобладании MgO над CaO . В целом их химический состав характеризуется повышенными содержаниями MgO (4.37–5.71 мас. %), Na_2O (1.90–2.54 мас. %), TiO_2 (0.79–0.91 мас. %) и низкой карбонатностью (табл. 3).

Содержания редких и редкоземельных элементов в углеродистых породах окружения Усть-Карской астроблемы, по данным ИСП-МС, существенно не отличаются и большинство из них не превышают региональный фон (табл. 4). И только часть элементов-примесей в черных сланцах [16] превышают кларк в 1.5–3 раза и имеют значения (г/т): Ti (5415–6481), Mn (440–1400), Cr (142–190), Zr (148–171), Ni (121–189), Li (37–77), Co (24–32), Sc (22–27), Dy (4.14–5.18), Pr (4.06–5.28), Er (2.47–3.03), Ho (0.88–1.01), Tb (0.62–0.80) и Tm (0.39–0.45).

Концентрации литофильных элементов (Rb , Cs , Ba , Sr , Ta , Nb , V , Hf , Be) в изученных углеродистых породах несколько ниже, чем для кларков черных сланцев [16]. Группа высокозарядных некогерентных элементов (Ti , Zr , Sc , REE) характеризуется повышенными содержаниями, кроме того, углеродистые сланцы и алевролиты окружения Усть-Карской астроблемы существенно обогащены переходными металлами (Mn , Cr , Co , Ni). Распределение редких и редкоземельных элементов показаны на рисунке 3. Спектры элементов-примесей схожи, отмечаются существенные колебания содержаний Sr и Ba , что объясняется непостоянным присутствием в породах карбонатов и барита. Суммарное содержание REE составляет 93–120 г/т, при этом концентрации легких REE имеют значения ниже кларковых, а тяжелые REE характеризуются повышенными содержаниями относительно кларков. В целом кривые распределения REE для всех образцов похожи, спектры характеризуются Eu -минимумом и имеют отрицательный наклон, что подтверждается повышенными величинами $LREE/HREE = 6.45–7.99$, $La/Yb = 4.34–7.12$, $Gd/Yb = 1.54–1.77$ (табл. 4). Такие особенности яв-

Таблица 3. Петрохимический состав углеродистых пород окружения Усть-Карской астроблемы по данным силикатного анализа, мас. %

Table 3. Petrochemical composition of carbonaceous rocks around the Ust'-Kara astrobleme environment according to silicate analysis, wt. %

Компонент Component	УК 19-5-25	УК 19-6-26	УК 19-П12-67	УК 19-БХ4-3	УК 19-БХ3-2	УК 19-ПК3-4
SiO_2	54.02	56.60	57.82	54.28	52.94	55.84
TiO_2	0.79	0.91	0.87	0.82	0.85	0.90
Al_2O_3	16.24	16.13	16.07	15.54	15.98	16.33
Fe_2O_3	1.94	2.21	1.63	1.29	2.07	1.67
FeO	6.09	5.54	5.52	6.36	6.01	6.25
MnO	0.074	0.055	0.042	0.083	0.130	0.040
CaO	2.70	1.41	2.00	3.64	4.11	1.76
MgO	5.11	5.71	4.37	5.01	4.93	4.79
K_2O	2.38	2.18	2.00	2.12	2.14	2.60
Na_2O	1.90	2.54	2.50	2.23	2.16	1.93
P_2O_5	0.20	0.22	0.21	0.21	0.23	0.23
П. п. п.	8.46	6.53	6.52	7.92	8.17	7.38
Сумма	99.90	100.04	99.55	99.50	99.72	99.72
H_2O	0.83	0.69	0.63	0.59	0.60	0.82
CO_2	2.04	0.71	0.68	2.82	3.01	0.79

Таблица 4. Содержание элементов-примесей в углеродистых породах окружения Усть-Карской астроблемы, г/т

Table 4. The content of impurity elements in the carbonaceous rocks around the Ust'-Kara astrobleme, ppm

Li	43.30	36.75	45.46	47.57	43.84	46.45	50.26	53.67	43.57	49.99	76.81	47.46	48.16	47.73	43.43	38.02
Be	1.75	1.83	1.72	1.76	2.00	2.05	1.69	1.96	2.07	1.62	1.77	1.77	1.61	1.86	1.94	1.93
P	877.00	748.10	826.50	841.20	945.70	832.70	935.20	721.30	932.30	889.50	976.60	985.40	881.10	949.30	961.00	1015.00
Sc	24.74	22.32	24.76	24.69	25.33	24.70	23.54	24.94	23.79	24.78	27.22	23.58	22.68	25.90	24.10	27.37
Ti	5999.00	5969.00	5536.00	5542.00	6256.00	5724.00	5961.00	5801.00	5831.00	5998.00	6481.00	5633.00	5900.00	5707.00	5415.00	6083.00
V	176.70	168.00	180.00	188.20	180.90	185.50	187.40	183.60	188.40	187.40	195.40	177.40	167.40	186.60	167.90	200.40
Cr	172.30	171.40	162.30	178.00	214.80	142.20	148.80	153.40	150.70	169.90	190.10	144.20	164.30	161.40	172.70	170.80
Mn	676.40	789.50	1032.00	961.00	557.50	564.00	559.00	689.90	678.30	986.20	570.10	1116.00	439.80	1404.00	951.20	540.60
Co	27.70	27.31	26.89	29.20	26.75	24.97	27.25	28.27	23.78	28.18	30.97	25.07	31.68	29.16	24.11	27.43
Ni	165.60	154.70	159.00	177.40	188.70	121.40	147.90	133.40	129.00	145.50	161.20	125.00	146.80	139.70	145.20	149.80
Cu	67.66	61.33	67.51	71.48	67.62	64.06	63.06	76.91	68.76	72.42	79.87	62.93	57.93	75.03	63.47	88.54
Zn	109.10	106.80	106.50	103.50	105.30	106.90	113.50	118.00	110.40	112.60	120.90	104.00	96.73	114.30	100.80	114.00
Ga	19.38	18.78	18.90	19.34	20.16	19.38	20.05	19.58	20.29	18.99	19.05	18.31	16.84	20.16	17.02	19.82
Rb	61.57	65.12	66.06	68.41	63.65	70.25	67.45	73.24	75.51	65.37	69.76	68.68	57.02	67.58	63.80	75.10
Sr	127.00	168.10	156.20	119.60	121.10	89.92	119.80	91.41	113.10	94.21	88.81	128.10	126.40	154.20	195.70	84.38
Y	25.77	23.31	25.10	24.72	25.34	24.12	25.23	24.70	24.74	22.78	21.48	23.22	21.65	27.54	22.64	26.46
Zr	157.00	147.50	151.70	155.70	164.40	156.00	151.00	166.40	155.30	151.70	154.90	149.20	154.40	158.10	151.60	170.90
Nb	9.86	9.94	9.31	9.38	10.43	9.14	9.72	10.41	9.89	9.43	9.97	8.74	9.31	9.02	8.92	9.95
Mo	1.24	3.09	0.70	0.84	1.64	0.99	0.93	1.05	1.27	1.55	2.61	1.15	1.17	1.29	0.95	1.00
Ag	0.31	0.26	0.19	0.16	0.21	0.21	0.19	<по	0.24	0.19	<по	0.25	0.25	0.24	0.21	0.26
Cd	0.24	0.31	0.32	0.26	0.20	0.21	0.23	<по	<по	0.26	0.33	<по	0.23	0.24	0.18	0.43
Sn	2.81	3.05	2.45	2.43	2.17	2.35	2.17	2.13	2.35	2.02	2.13	2.00	1.87	2.15	0.58	0.84
Sb	0.67	1.86	0.75	0.74	0.73	0.67	1.07	0.60	1.00	1.04	0.65	0.95	0.78	1.07	0.63	0.55
Te	0.30	<по	<по	<по	<по	<по	0.21	<по	<по	0.21	<по	<по	<по	<по	<по	0.22
Cs	3.77	4.12	4.22	4.73	3.19	3.96	4.12	3.65	3.64	3.34	5.53	3.82	4.05	4.12	3.84	3.64
Ba	231.40	221.80	269.80	276.90	255.00	233.00	235.00	299.40	277.20	223.00	274.50	219.60	319.80	266.00	264.70	266.50
La	15.23	15.29	13.47	12.91	18.72	15.27	18.58	19.60	16.75	14.81	14.01	17.28	17.21	14.04	18.05	21.12
Ce	38.65	34.43	33.57	34.70	40.98	35.91	41.18	43.82	39.67	32.70	36.31	36.88	34.61	33.98	39.85	42.97
Pr	5.21	4.25	4.33	4.34	5.03	4.42	5.09	5.14	4.60	4.06	4.53	4.65	4.34	4.37	4.77	5.28

Nd	22.05	18.60	20.90	20.62	22.72	20.49	22.23	23.08	22.00	19.64	21.98	21.38	19.81	22.40	22.73	24.43
Sm	5.32	4.40	4.82	4.90	5.14	4.99	5.27	5.12	4.98	4.41	4.92	4.89	4.26	5.09	4.82	5.46
Eu	1.19	1.01	1.32	1.11	1.18	1.12	1.16	1.18	1.15	1.12	1.17	1.12	0.95	1.33	1.27	1.38
Gd	4.87	4.23	4.84	4.80	4.94	4.85	4.93	4.77	4.63	4.29	4.37	4.63	4.01	5.25	4.54	5.26
Tb	0.78	0.69	0.74	0.73	0.76	0.75	0.77	0.75	0.76	0.68	0.69	0.72	0.62	0.79	0.68	0.80
Dy	4.92	4.48	4.74	4.74	5.12	4.77	4.90	4.75	4.74	4.34	4.20	4.57	4.14	5.10	4.29	5.18
Ho	0.96	0.88	0.97	0.98	1.02	0.96	0.92	1.00	1.03	0.89	0.88	0.88	0.85	1.01	0.91	1.01
Er	2.83	2.55	2.68	2.69	2.85	2.71	2.73	2.91	2.79	2.69	2.47	2.61	2.47	2.95	2.67	3.03
Tm	0.45	0.39	0.42	0.40	0.45	0.39	0.42	0.43	0.43	0.40	0.41	0.40	0.39	0.43	0.43	0.43
Yb	2.98	2.64	2.80	2.98	2.80	2.83	2.84	3.04	2.94	2.76	2.83	2.71	2.60	2.93	2.64	2.97
Lu	0.43	0.39	0.39	0.42	0.41	0.42	0.38	0.44	0.44	0.39	0.39	0.36	0.38	0.42	0.39	0.44
Hf	4.07	3.93	3.97	4.18	4.08	4.04	4.29	4.24	4.41	3.95	3.94	3.99	3.93	3.99	3.74	4.45
Ta	0.66	0.65	0.64	0.59	0.62	0.61	0.56	0.65	0.61	0.61	0.63	0.55	0.67	0.59	0.63	0.65
W	0.95	1.04	1.04	1.02	1.01	0.93	1.01	1.00	1.00	1.08	1.09	1.01	1.00	0.95	0.91	1.00
Ir	<по	0.01	<по	0.00	<по	0.00	0.01	<по	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	<по	<по	0.00
Tl	0.35	0.45	0.37	0.37	0.36	0.36	0.35	0.38	0.42	0.33	0.40	0.36	0.34	0.37	0.31	0.42
Pb	13.94	14.66	12.93	12.44	11.46	12.97	15.20	16.23	15.42	15.85	15.48	15.72	13.21	15.14	14.67	12.11
Bi	0.20	0.23	0.25	0.21	0.23	0.24	0.23	0.25	0.23	0.23	0.24	0.25	0.19	0.23	0.22	0.28
Th	5.70	5.26	5.78	5.78	5.59	6.13	5.95	6.77	6.11	5.46	5.97	5.66	5.33	5.66	5.65	6.04
U	2.32	2.47	2.36	2.28	2.28	2.35	2.57	2.54	2.61	2.28	2.25	2.17	2.14	2.29	1.99	2.37
ΣREE	105.86	94.23	95.99	96.31	112.13	99.87	111.38	116.02	106.90	93.16	99.15	103.07	96.62	100.10	108.04	119.75
LREE/HREE	6.93	6.84	6.53	6.45	7.36	6.79	7.60	7.72	7.15	6.68	7.36	7.42	7.45	6.34	7.99	7.64
La/Yb	5.11	5.80	4.82	4.34	6.68	5.40	6.55	6.44	5.70	5.37	4.95	6.38	6.63	4.80	6.84	7.12
Gd/Yb	1.63	1.61	1.73	1.61	1.76	1.72	1.74	1.57	1.57	1.56	1.54	1.71	1.54	1.79	1.72	1.77
Th/Cr	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04

Примечание. 1–16 — углеродистые сланцы и алевролиты (1–7 — р. Лабияха; 8–13 — побережье Байдарцкой губы; 14, 15 — р. Б. Хондейяха; 16 — р. Пэкоцяаха); <по — ниже предела обнаружения.

Note. 1–16 — carbonaceous shales and aleurolite (1–7 — Labiyaha River; 8–13 — coast; 14, 15 — B. Hondeyaha River; 16 — Pekozuayaha River); <по — below detection limit.

Рис. 3. Распределение редких и редкоземельных элементов в углеродистых породах окружения Усть-Карской астроблемы, нормализованных по примитивной мантии [30]

Fig. 3. Distribution of rare and rare earth elements in carbonaceous rocks around the Ust'-Kara astrobaleme. Concentrations of rare elements are normalized by a primitive mantle [30]

ляются обычными для углеродистых сланцев, что может свидетельствовать о седиментации осадков на мелководном шельфе в условиях гумидного климата и спокойного тектонического режима [1; 23]. Стабильность тектонического режима подтверждается однообразием значений $Th/Cr = 0.03–0.04$ [19].

Обсуждение

Постимпактная гидротермальная деятельность распространена во всех структурно-литологических комплексах астроблем по всему миру, наиболее крупные из них — Садбери (Канада), Рис (Германия), Чикшулуб (Мексика), Попигай (Россия) и другие [17, 21, 24–28, 31]. Гидротермальные изменения проявляются в астроблемах в виде формирования соответствующих минеральных ассоциаций и перераспределения химических элементов в породах коптогенного комплекса [9]. При этом гидротермальные процессы для крупных кратеров могут продолжаться на протяжении сотен тысяч лет, образуя большие объемы гидротермальных изменений [17].

В окружении Усть-Карской астроблемы породы мишени обогащены углеродистым веществом и характеризуются повышенными кларками некоторых редких элементов [15]. Известно, что промышленно значимая рудная минерализация в углеродистых породах всегда связана с гидротермальной переработкой и привносом полезных компонентов. Согласно тектонической модели Масайтиса и Мелоша [2, 8, 22], ударно-тектонические преобразования пород предполагают изменения не только на глубину, но и по латерали, что может свидетельствовать о гидротермальных преобразованиях по периферии вплоть до поверхности астроблемы. Учитывая в целом восходящую направленность гидротерм и наличие существенного количества углеродистого вещества в породах коптогенного комплекса, в близповерхностных частях разреза возможны мобилизация, переотложение и концентрирование различных видов полезных ископаемых. Согласно известным моделям формирования крупных астроблем, импактный процесс должен был стимулировать интенсивную гидротермальную деятельность не только в самих импактиках, но и в породах окружения астроблемы [21,

22; 26–28], создавая условия для концентрирования редких и благородных металлов во вмещающих углеродистых породах. Таким образом, теоретически в гидротермально переработанных черных сланцах окружения Усть-Карской астроблемы возможна продуктивная рудная минерализация. Аналогичным примером переотложения рудного вещества черных сланцев, хотя и не связанным с импактными событиями, может служить продуктивная золотоносная минерализация крупнейшего черносланцевого месторождения Сухой Лог, в котором при наложенных гидротермальных изменениях произошло перераспределение и концентрирование золотосульфидной минерализации за счет окружающих месторождение углеродистых сланцев, что было доказано на основе изотопно-геохимических исследований [4, 18, 20]. М. В. Наумов [10] по данным изотопного состава серы пиритовой минерализации убедительно показал, что интенсивное гидротермальное обогащение зювитов сульфидной минерализацией происходит за счет пирита черных сланцев подложки. Кроме того, по имеющимся последним сведениям об импактиках Усть-Карской астроблемы, в зювитах также встречается минерализация с ультравысокой степенью восстановленности, включая самородные металлы (Fe, Ni, Al, Ag, Cu, Sn), интерметаллиды сложного состава, камасит [12]. В тагамитах отмечено повышенное в 3 раза содержание Ni и Cr по сравнению с породами цокольного комплекса [3], что, скорее всего, связано с веществом астероида, который мог быть источником данных компонентов с возможным их переотложением и концентрированием.

Известно, что степень гидротермального преобразования пород определяется их вещественной спецификой и проницаемостью [9]. Гидротермальная деятельность реализуется в формировании соответствующих минеральных ассоциаций, распределение которых изменяется по мере удаления от центра астроблемы, затрагивая ее окружение. Это обуславливает как геохимическую специфику процесса, так и состав возникающих минеральных фаз. В осадочных породах окружения Усть-Карской астроблемы, включая углеродистые породы, ассоциация типоморфных минералов постимпактной гидротермальной деятельности включает хлориты, цеолиты, кальцит и сульфиды.

Черносланцевые толщи окружения Усть-Карской астроблемы, по данным ИСП-МС относительно кларковых содержаний элементов в черных сланцах, характеризуются повышенными концентрациями Ti, Mn, Cr, Zr, Ni, Li, Co, Sc, Dy, Pr, Er, Ho, Tb и Tm. На основании анализа геохимических данных по распределению редких и редкоземельных элементов сделано предположение о седиментации осадков на мелководном шельфе в условиях гумидного климата и спокойного тектонического режима.

Надкларковые содержания Co, Ni и Cr объясняются присутствием примесей в сульфидах и хромшпинелидах. Высокое содержание титана в сланцах способствовало кристаллизации анатаза и рутила. Примесь Li может присутствовать в составе пирита и слоистых силикатов, примесь Mn — в карбонатах. Повышенные содержания REE и Sc в сланцах объясняются часто встречающимся в породе монацитом. Содержания редкоземельных элементов в углеродистых сланцах близки к кларкам черных сланцев, при этом тяжелые редкоземельные элементы показывают более высокие значения. Все это позволяет полагать, что редкоземельная минерализация обусловлена не только первичным обогащением протолита редкоземельными элементами в процессе осадконакопления, а в большей степени гидротермальными процессами в связи с импактным событием.

Кроме того, выявлен ряд минералогических особенностей, в том числе связанных с постимпактной гидротермальной деятельностью. К ним, в частности, относятся: повышение железистости (железистый кальцит, доломит); развитие в породе многочисленных сульфидных минералов (пирит, марказит, халькопирит, сфалерит, галенит); лимонитизация пирита, увеличение содержания железа и хрома в краевых областях зерен хромшпинелидов; обогащение кремнеземом (хлориты); редкоземельная минерализация, представленная фторапатитом, флоренситом (с микровключениями пирита) и монацитом (с включениями торита); консолидация УВ и его приуроченность к хлорит-пиритовой минерализации; развитие жильной минерализации с кальцитом и баритом. Проведенные термические и КР-спектроскопические исследования углеродистого вещества пород окружения Усть-Карской астроблемы позволили сделать вывод о том, что УВ претерпело преобразование на уровне низкотемпературной хлоритовой стадии метаморфизма [6; 32].

Таким образом, нами получены новые сведения о минералогических и геохимических особенностях углеродистых пород ближайшего окружения Усть-Карской астроблемы и проявлении в них постимпактных гидротермальных процессов. Установлен ряд элементов, имеющих аномально высокие концентрации. Полученные данные позволяют считать углеродистые сланцы и алевриты окружения Усть-Карской астроблемы перспективными на выявление рудных проявлений в связи с постимпактной гидротермальной деятельностью.

Авторы выражают благодарность Т. Г. Шумиловой за научные консультации, Е. М. Тропникову и С. И. Исаченко за помощь в проведении аналитических работ. Работа выполнена в рамках темы НИР ГР № АААА-А17-117121270036-7.

Литература

1. Балашов Ю. А. Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 286 с.
2. Вишневский С. А. Астроблемы. Новосибирск: Нонпарель, 2007. 288 с.
3. Геология астроблем / В. Л. Масайтис, А. Н. Данилин, М. С. Машак, А. И. Райхлин, Т. В., Е. М. Шаденков. Л.: Недра, 1980. 231 с.
4. Дубинина Е. О., Чугаев А. В., Иконникова Т. А., Авдеев А. С., Якушев А. И. Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье // Петрология. 2014. Т. 22. № 4. С. 347—379.
5. Зархидзе Д. В., Пискун П. П., Красножен А. С. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Вайгачско-Пайхойская. Листы R-41-XXVIII, XXIX (Усть-Кара). Объяснительная записка. М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. 180 с.
6. Иванова В. П., Касатов Б. К., Красавина Т. Н., Розинова Е. Л. Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. 399 с.
7. Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя / Отв. ред. В. Л. Масайтис. Л.: Наука, 1990. 185 с.
8. Масайтис В. Л., Машак М. С., Райхлин А. И., Селивановская Т. В. Алмазоносные импактиты Попигайской астроблемы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. 178 с.
9. Наумов М. В. Основные закономерности постимпактного гидротермального процесса // Астрономический вестник. 1996. Т. 30. № 1. С. 25—32.
10. Наумов М. В., Ляхницкая В. Д., Яковлева О. А. Сульфидная минерализация в Попигайской импактной структуре // Доклады АН. 2004. Т. 399. № 5. С. 665—670.
11. 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.
12. Сергиенко Е. С., Цельмович В. А., Попов В. В., Цибульская А. Е., Дробкина Е. А., Петров И. Н. Микроструктура, состав и магнитные свойства зювитов Карской астроблемы // Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: Материалы междунар. семинара. СПб., 2010. С. 227—233.
13. Шишкин М. А., Шкарубо С. И., Молчанова Е. В., Маркина Н. В., Молчанова Е. В. и др. 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.
14. Шумилова Т. Г. Минералогия самородного углерода. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2003. 318 с.
15. Юдович Я. Э., Беляев А. А., Кетрис М. П. Геохимия и рудогенез черносланцевых формаций Пай-Хоя. СПб.: Наука, 1998. 366 с.
16. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: Наука, 1994. 304 с.
17. Abramov O., Kring D. A. Numerical Modeling of an Impact-Induced Hydrothermal System at the Sudbury Crater // J. Geophys. Res. (Planets), 2004. V. 109. P. 10007—10023.
18. Chang Z., Large R. R., Maslennikov V. V. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an

early timing and a seawater sulfur source // *Geology*, 2008. V. 36. No. 12. P. 971–974.

19. Condie K. C., Wronkiewicz D. A. The Cr/Th ratio in pre-cambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990. V. 97. P. 256–267.

20. Distler V. V., Yudovskaya M. A., Mitrofanov G. L., Prokofev V. Yu., Lishnevskii E. N. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia // *Ore Geology Reviews*, 2004. V. 24. P. 7–44.

21. Koeberl C. The geochemistry and cosmochemistry of impacts. In: Holland H. D. and Turekian K. K. (eds.) // *Treatise on Geochemistry*, Second Edition. Oxford: Elsevier, 2014. V. 2. P. 73–118.

22. Melosh H. J. *Impact Cratering: A Geologic Process* // Oxford University Press. New York, 1989. 245 p.

23. Murray R. W., Buchholtz T., Brink M. R., Jones D. L., Gerlach D. C. and Russ G. P. Rare earths elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale // *Geology*, 1990. V. 18. P. 286–271.

24. Muttik N., Kirsimäe K., Vennemann T. W. Stable isotope composition of smectite in suevites at the Ries crater, Germany: Implications for hydrous alteration of impactites // *Earth and Planetary Science Letters*, 2010. V. 299. P. 190–195.

25. Osinski G. R. Hydrothermal activity associated with the Ries impact event, Germany // *Geofluids*, 2005. V. 5. No. 3. P. 202–220.

26. Osinski G. R., Tornabene L. L., Banerjee N. R., Cockell C. S., Flemming R. et al. Impact-generated hydrothermal systems on Earth and Mars // *Icarus*, 2012. V. 224. P. 347–363.

27. Reimold W. U., Koeberl C. Impact structures in Africa: A Review African // *Earth Sciences, Journal of African Earth Sciences*, 2014. V. 93. P. 57–175.

28. Stoffler D., Hamann C., Metzler K. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. Invited Review // *Meteoritics & Planetary Science*, 2017. P. 1–45.

29. 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. V. 10. 2591 p.

30. 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. V. 42. P. 313–345.

31. Velasco-Villareal M., Urrutia-Fucugauchi J., Rebolledo-Vieyra M., Perez-Cruz L. Paleomagnetism of impact breccias from the Chicxulub crater — Implications for ejecta emplacement and hydrothermal processes // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011. V. 186. P. 154–171.

32. Wopenka B., Pasteris J. D. Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: Applicability of Raman microprobe spectroscopy // *American Mineralogist*, 1993. V. 78. P. 533–557.

References

1. Balashov Yu. A. *Geokhimiya redkozemelnykh elementov* (Geochemistry of rare earth elements). Moscow: Nauka, 1976, 286 p.

2. Vishnevskiy S. A. *Astroblemy* (Astroblemes). Novosibirsk: Nonparel, 2007, 288 p.

3. *Geologiya astrobleme* (Geology of astroblemes). Masaitis V. L., Danilin A. N., Mashak M. S., Raikhlin A. I., Selivanovskaya T. V., Shadenkov E. M. Leningrad: Nedra, 1980, 231 p.

4. Dubinina E. O., Chugayev A. V., Ikonnikova T. A., Avdeyenko A. S., Yakushev A. I. *Istochniki veshchestva i fluidnyy rezhim formirovaniya kvarts-karbonatnykh zhil na mestorozhdenii zolota Sukhoi Log, Baykalo-Patomskoye nagor'ye* (Sources and fluid regime of quartz-carbonate veins at the Sukhoi Log gold deposit, Baikal-Patom Highland). *Petrology*, 2014, V. 22, No. 4, pp. 329–358.

5. Zarkhidze D. V., Piskun P. P., Krasnozhen A. S. et al. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200000. Izdaniye vtoroye. Seriya Vaygachskoye Paykhoykaya. Listy R-41-XXVIII, XXIX (Ust'-Kara). Obyasnitelnaya zapiska* (State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200000. Second edition. Vaygach-Paykhoy series. Sheets R-41-XXVIII, XXIX (Ust'-Kara). Explanatory letter). Moscow: Moscow branch of VSEGEI, 2017, 180 p.

6. Ivanova V. P., Kasatov B. K., Krasavina T. N., Rozinova E. L. *Termicheskiy analiz mineralov i gornykh porod* (Thermal analysis of minerals and rocks). Leningrad: Nedra, 1974, 399 p.

7. *Impaktnyye krateri na rubezhe mezozoya i kaynozoya* (Impact craters at the turn of the Mesozoic and Cenozoic) (Ed. V. L. Masaytis). Leningrad: Nauka, 1990, 185 p.

8. Masaytis V. L., Mashchak M. S., Raykhlin A. I., Selivanovskaya T. V. *Almazonosnyye impaktity Popigayskoy astroblemy* (Diamondiferous impactites of the Popigai astrobleme). St. Petersburg: VSEGEI, 1998, 178 p.

9. Naumov M. V. *Osnovnyye zakonomernosti postimpaktnogo gidrotermalnogo protsessa* (Main regularities of the post-impacted hydrothermal process). *Astronomical vestnik*, 1996, V. 30, No. 1, pp. 25–32.

10. Naumov M. V., Lyakhnitskaya V. D., Yakovleva O. A. *Sul'fidnaya mineralizatsiya v Popigayskoy impaktnoy structure* (Sulfide mineralization in the Popigai impact structure). *Dok. Akad. Nauk*, 2004, V. 399, No. 5, pp. 665–670.

11. Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Mikhailova A. I. et al. *Pretsizionnyy (ICP-MS, LA-ICP-MS) analiz sostava gornykh 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 using the example of the Early Precambrian mafic complexes). *Transactions of Karelian Research Center of Russian Academy of Science*, 2015, No. 7, pp. 54–73.

12. Sergiyenko E. S., Tsel'movich 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 the suvites of the Kara astroblema). Paleomagnetism and magnetism of rocks. Materials of the International Seminar, St. Petersburg, 2010, pp. 227–233.

13. Shishkin M. A., Shkarubo S. I., Molchanova E. V., Markina N. V., Molchanova E. V. et al. *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). Series South Kara. Sheet R-41, Amderma. Explanatory letter). St. Petersburg: Cartographic factory VSEGEI, 2012, 383 p.

14. Shumilova T. G. *Mineralogiya samorodnogo ugleroda* (Mineralogy of native carbon). Yekaterinburg: Publishing House of the UB RAS, 2003, 318 p.

15. Yudovich Ya. E., Belyayev A. A., Ketris M. P. *Geokhimiya i rudogenez chernoslantsevykh formatsiy Pay-Khoya* (Geochemistry and ore genesis of black-shale formations in Pai-Khoy). St. Petersburg: Nauka, 1998, 366 p.

16. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Elementy-primesi v chernykh slantsakh* (Impurity elements in black shales). Yekaterinburg: UIF Nauka, 1994, 304 p.
17. Abramov O., Kring D. A. Numerical Modeling of an Impact-Induced Hydrothermal System at the Sudbury Crater. *J. Geophys. Res. (Planets)*, 2004, V. 109, pp. 10007–10023.
18. Chang Z., Large R. R., Maslennikov V. V. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, 2008, V. 36, No. 12, pp. 971–974.
19. Condie K. C., Wronkiewicz D. A. The Cr/Th ratio in pre-cambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1990, V. 97, pp. 256–267.
20. Distler V. V., Yudovskaya M. A., Mitrofanov G. L., Prokof'ev V. Yu., Lishnevskii E. N. Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geology Reviews*, 2004, V. 24, pp. 7–44.
21. Koeberl C. The geochemistry and cosmochemistry of impacts. In: Holland H. D. and Turekian K. K. (eds.). *Treatise on Geochemistry*, Second Edition. Oxford: Elsevier, 2014, V. 2, pp. 73–118.
22. Melosh H. J. *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford University Press. New York, 1989, 245 p.
23. Murray R. W., Buchholtz T., Brink M. R., Jones D. L., Gerlach D. C. and Russ G. P. Rare earths elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale. *Geology*, 1990, V. 18, pp. 286–271.
24. Muttik N., Kirsimäe K., Vennemann T. W. Stable isotope composition of smectite in suevites at the Ries crater, Germany: Implications for hydrous alteration of impactites. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, V. 299, pp. 190–195.
25. Osinski G. R. Hydrothermal activity associated with the Ries impact event, Germany. *Geofluids*, 2005, V. 5, No. 3, pp. 202–220.
26. Osinski G. R., Tornabene L. L., Banerjee N. R., Cockell C. S., Flemming R. et al. Impact-generated hydrothermal systems on Earth and Mars. *Icarus*, 2012, V. 224, pp. 347–363.
27. Reimold W. U., Koeberl C. Impact structures in Africa: A Review African. *Earth Sciences, Journal of African Earth Sciences*, 2014, V. 93, pp. 57–175.
28. Stoffler D., Hamann C., Metzler K. Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. *Invited Review. Meteoritics & Planetary Science*, 2017, pp. 1–45.
29. 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, V. 10, 2591 p.
30. 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, V. 42, pp. 313–345.
31. Velasco-Villareal M., Urrutia-Fucugauchi J., Rebolledo-Vieyra M., Perez-Cruz L. Paleomagnetism of impact breccias from the Chicxulub crater — Implications for ejecta emplacement and hydrothermal processes. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, V. 186, pp. 154–171.
32. Wopenka B., Pasteris J. D. Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: Applicability of Raman microprobe spectroscopy. *American Mineralogist*, 1993, V. 78, pp. 533–557.

Поступила в редакцию / Received 25.10.2021