

УДК 552.08:553.08:550.42

DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-168-183

## Минералого-геохимические особенности черных сланцев окружения Карской астроблемы (Пай-Хой)

Н. С. Ковальчук, Т. Г. Шумилова

ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, 167000, г. Сыктывкар, ул. Первомайская, 54, e-mail: kovalchuk@geo.komisc.ru

Поступила в редакцию 06.02.2019 г., принята к печати 08.05.2019 г.

**Объект исследования.** Изучены позднепалеозойские ( $D_3-P_1$ ) черносланцевые толщи окружения Карской астроблемы (Пай-Хой). **Материалы и методы.** Опробование пород проводилось радиально по профилю от борта астроблемы – приконтактной зоны с импактитами – с выходом в не затронутые постимпактными преобразованиями черные сланцы. Проведен анализ минералогических и геохимических особенностей черных сланцев окружения Карской астроблемы с применением комплекса современных методов исследований (ЦКП “Геонаука”, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) для выявления возможной мобилизации, переотложения и концентрирования рудного вещества в условиях интенсивной постимпактной гидротермальной переработки. **Результаты исследований и выводы.** Определены геохимические особенности углеродистых отложений, претерпевших постимпактные гидротермальные процессы в районе окружения Карской импактной структуры. Выявлены резко аномальные содержания Mn, B, Zr, Sr, Ge, Cd, Hf, Se, Eu и аномальные Ti, Ba, Cr, Rb, Li, Ce, La, Ga, Sc, Co, Cs, Gd, Dy, W. Установлена геохимическая специфика концентрирования компонентов в различных районах Карской астроблемы, связанная со специализацией пород мишени. Диагностированы собственные редкометалльные и редкоземельные минералы, сульфиды, тиманнит (HgSe).

**Ключевые слова:** черные сланцы, редкоземельные минералы, металлоносность, гидротермальные процессы, постимпактные преобразования, рудоносный потенциал, Карская астроблема, Пай-Хой

### Благодарность

Авторы выражают благодарность Е.М. Тропникову, С.И. Исаенко, С.С. Шевчуку, Д.В. Кузьмину и В.Н. Филиппову за помощь в проведении аналитических работ.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИР ГР № АААА-А17-117121270036-7.

## Mineralogical and geochemical features of the black shales surrounding the Kara Astrobleme (Pay-Khoy)

Natalia S. Kovalchuk, Tatyana G. Shumilova

IG FRC Komi SC UB RAS, 54 Pervomaiskaya st., Syktyvkar 167000, Russia, e-mail: kovalchuk@geo.komisc.ru

Received 06.02.2019, accepted 08.05.2019

**Research subject.** The Late Paleozoic ( $D_3-P_1$ ) black shale strata surrounding the Kara Astrobleme (Pay-Khoy) were studied. **Materials and methods.** The rocks were sampled radially along the profile from the edge of the astrobleme (the at the contact zone with impactites) with access to black shales that were not affected by post-impact transformations. An analysis of the mineralogical and geochemical features of the black shales surrounding the Kara astrobleme was carried out using a complex of modern research methods (Geonauka Centre for Collective Use, IG FRC Komi Scientific Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences) in order to identify the possible mobilisation, re-deposition and concentration of ore matter under the conditions of intensive post-impact hydrothermal altering. **Results and conclusions.** The geochemical features of the black shale deposits altered by post-impact hydrothermal processes in the vicinity of the Kara impact structure were determined. The sharp abnormal contents of Mn, B, Zr, Sr, Ge, Cd, Hf, Se and Eu as well as the abnormal contents of Ti, Ba, Cr, Rb, Li, Ce, La, Ga, Sc, Co, Cs, Gd, Dy and W were revealed. The geochemical concentration specificity of components in different regions of the Kara astrobleme associated with the specialisation of target rocks was established. Rare-metal and rare-earth minerals, sulphides and thymannite (HgSe) were diagnosed.

**Keywords:** black shales, rare-earth minerals, metal mineralisation, hydrothermal processes, post-impact transformations, ore-bearing potential, Kara astrobleme, Pay-Khoy

**Для цитирования:** Ковальчук Н.С., Шумилова Т.Г. (2020) Минералого-геохимические особенности черных сланцев окружения Карской астроблемы (Пай-Хой). *Литосфера*, 20(2), 168–183. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-168-183

**For citation:** Kovalchuk N.S., Shumilova T.G. (2020) Mineralogical and geochemical features of the black shales surrounding the Kara Astrobleme (Pay-Khoy). *Litosfera*, 20(2), 168–183. DOI: 10.24930/1681-9004-2020-20-2-168-183

© Н.С. Ковальчук, Т.Г. Шумилова, 2020

#### Acknowledgments

The authors are grateful to E.M. Tropnikov, S.I. Isaenko, S.S. Shevchuk, D.V. Kuzmin and V.N. Filippov for their help in conducting analytical work.

This work was financially supported by Project NIR GR No. AAAA-A17-117121270036-7.

## ВВЕДЕНИЕ

Черные сланцы, как известно, представляют собой весьма благоприятную геохимическую среду для первичного накопления и наложенного концентрирования многих промышленно важных элементов и на протяжении нескольких десятилетий вызывают повышенный интерес у геологов. Рудоносность углеродсодержащих пород широко изучается (Летников и др., 1996; Юдович и др., 1998а; А.Ф. Карпузов, А.А. Карпузов, 2005; Данилова и др., 2007, 2015; Жмодик и др., 2008; Ханчук и др., 2010; Рафаилович и др., 2011; Сазонов и др., 2011; и др.), среди наиболее значимых объектов выделяются в первую очередь месторождения черносланцевого (сухоложского) типа с гидротермальной минерализацией (Буряк, Хмелевская, 1997; Вуд, Попов, 2006; Дубинина и др., 2014; и др.). При относительно невысоких содержаниях редких и благородных металлов аналогичные объекты черносланцевого типа могут иметь огромные запасы, что делает добычу рентабельной.

Несмотря на значительную степень изученности черных сланцев на территории Пай-Хоя и Лемвинской зоны севера Урала (Юдович и др., 1998а, б), подобных системных специализированных работ по рудоносности и выявлению потенциально промышленных объектов черносланцевого типа как на Полярном и Приполярном Урале, так и на Тимане и Пай-Хое не проводилось. Данная территория наименее изучена в отношении выявления потенциальных рудоносных объектов черносланцевого типа.

В то же время направление по изучению, выявлению новых объектов черносланцевого типа и вовлечению их в эксплуатацию активно развивается в мире и в других российских регионах (А.Ф. Карпузов, А.А. Карпузов, 2005; Карпузов и др., 2008; Марченко, 2011; Wang et al., 2014). На данный момент уже накоплен достаточно богатый опыт по изучению рудопроявлений, связанных с черными сланцами, который будет полезен для Тимано-Североуральского региона и Пай-Хоя и может способствовать повышению рудоносного потенциала территории. Особый интерес представляют черные сланцы с проявлением постимпактной гидротермальной минерализации. Проявления гидротермальной минерализации в черносланцевых толщах известны в большинстве импактных структур на Земле, а в ряде астроблем с ней связаны рудные месторождения и рудопроявления (Масайтис и др.,

1994; Наумов, 1996). Среди таких объектов весьма перспективны черносланцевые толщи окружения Карской астроблемы, подверженные гидротермальным процессам, спровоцированным импактным событием.

## ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являются позднепалеозойские ( $D_3-P_1$ ) черносланцевые толщи окружения Карской астроблемы (Пай-Хой). Опробование толщ проводилось по профилю радиально от центра астроблемы – приконтактной зоны с импактитами (борт астроблемы) с выходом в не затронутые постимпактными преобразованиями черные сланцы. Нами проведен анализ минералогических и геохимических особенностей черных сланцев мишени окружения Карского импактного события с применением комплекса современных методов исследований для выявления возможной мобилизации, переотложения и концентрирования рудного вещества в условиях интенсивной постимпактной гидротермальной переработки. Аналитические исследования проведены в ЦКП “Геонаука”, ИГ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН.

Структурно-текстурные особенности пород изучены с помощью поляризационного микроскопа POLAM R-312 (ЛОМО). Содержание микроэлементов в черных сланцах определено методом ICP-MS (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой) на спектрометре ICP-MS Agilent 7700х (аналитик Д.В. Кузьмин). Состав отдельных минеральных фаз проводился с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света на рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon). Условия регистрации спектров: Ar<sup>+</sup> лазер ( $\lambda = 514.5$  нм, мощность = 10 мВ); конфокальное отверстие – 300 мкм, щель – 100 мкм, решетка спектрометра – 600 ш/мм, время экспозиции – 10 с, количество циклов накопления сигнала в участке спектра – 3, диапазон регистрации спектров – 100–4000 см<sup>-1</sup>. Регистрация спектров осуществлялась при комнатной температуре (аналитик С.И. Исаенко). Термические исследования черных сланцев проводились на дериватографе Shimadzu DTG-60H (аналитик Е.М. Тропников). Определение изотопного состава углерода в породах было выполнено на масс-спектрометре Finnigan Delta V Advantage (Thermo Fisher Scientific, аналитик И.В. Смолева). Для определения содержания органического углерода ( $C_{org}$ ) в породе ис-

пользовался экспресс-анализатор на углерод АН-7529 (аналитик С.А. Забоева). Диагностика и состав минералов осуществлялись на сканирующих электронных микроскопах JSM-6400 с энергодисперсионной приставкой Link, ISIS-300 (аналитик В.Н. Филиппов) и Tescan Vega 3 LMN с энергодисперсионной приставкой OxfordInstruments X-Max (аналитики С.С. Шевчук, Е.М. Тропников) в аншлифах, подготовленных стандартным способом с углеродным напылением. В связи с использованной модификацией оборудования при определении минералов содержания  $\text{CO}_2$ , F,  $\text{H}_2\text{O}$  были основаны на расчетных данных.

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Карская астроблема является одной из крупнейших в России (Масайтис и др., 1980; Вишневский, 2007), она расположена на северо-восточном склоне горного кряжа Пай-Хой Югорского полуострова примерно в 200 км к северу от г. Воркуты в бассейнах рек Кара, Сибирчатая-Яха, Сопча-Ю и др.

Район исследований относится к Залаиро-Лемвинской структурно-формационной зоне (СФЗ), которая включена в Западно-Уральскую мегазону (СФМЗ). Залаиро-Лемвинская СФЗ на территории Карской астроблемы представлена Пайхойской подзоной, которая, в свою очередь, занимает осевую часть Пайхойского кряжа, а ее западная граница проходит по линии Главного Пайхойского надвига. Основание разреза подзоны сложено хенгурской свитой позднекембрийско-среднеордовикского возраста, которая на Югорском полуострове с резким угловым несогласием залегает на рифейско-вендских отложениях амдерминской, морозовской и сокольнинской свит. Далее разрез наращивается тальбейтивисской свитой среднего ордовика, сопчинской свитой верхнего ордовика, оюской и ливановской свитами силура-нижнего девона, падейской свитой нижнего-среднего девона, путыюской и громашорской свитами верхнего девона. С девона в Карском районе накапливается последовательность из батинальных осадков силовых хинской (верхний девон-нижний карбон), карской (нижний карбон) и карасиловской (средний карбон-верхняя пермь) свит (Шишкин и др., 2012). Углеродистые толщи мишени Карской астроблемы представлены верхнедевонско-нижнепермскими кремнисто-глинистыми, углисто-известковисто-кремнистыми сланцами и алевролитами.

В строении Карской импактной структуры выделяется два структурных этажа: нижний – верхнепротерозойский – и верхний – палеозойский (рис. 1). Нижний, сложенный нерасчлененными верхнепротерозойскими образованиями мощностью более 6 км и имеющий выходы лишь в ядре Пай-Хойского антиклинория, в пределах Карской астроблемы

мы вскрыт скважинами на глубине  $\approx 500$  м в области центрального поднятия. Верхний структурный этаж, по породам которого сформирован Карский метеоритный кратер, имеет мощность более 5 км и включает в себя отложения от ордовика до перми. Палеозойские отложения сложены карбонатными, глинистыми, кремнисто-глинистыми, углисто-известковисто-кремнистыми, терригенными песчано-глинистыми породами с прослоями и линзами известняков и углей. Породы смяты в мелкие складки северо-западного простирания ( $290\text{--}320^\circ$ ), близкого к простиранию пород Пай-Хойского антиклинория. Падение крыльев складок меняется от  $5\text{--}10$  до  $60\text{--}80^\circ$  (Импактные кратеры..., 1990).

В окрестностях Карской астроблемы дезинтеграция и постимпактные гидротермальные преобразования просматриваются на расстоянии 15–20 км от борта астроблемы.

### ПЕТРОХИМИЯ И ГЕОХИМИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦЕВ

В районе Карской астроблемы углеродистые сланцы по составу петрогенных элементов и значениям петрохимических модулей (Юдович и др., 19986) соответствуют силитам и сиаллитам. В целом их химический состав характеризуется повышенными содержаниями  $\text{MgO}$  (0.64–5.56 мас. %) и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (0.47–4.56 мас. %) (табл. 1).

По данным ICP-MS, распределение элементов-примесей в углеродистых сланцах неравномерно. Черносланцевые толщи в районе Карской астроблемы относительно кларков “черных сланцев” мира (Юдович, Кетрис, 1994) обогащены литофильными элементами (Li, Sr, Ba, Ti, Mn, B, Zr, Rb, Hf, Sc, Cs и РЗЭ), халькофильными (Cd, Ge, Ga, Se) и сидерофильными (Co, Ni, W) (Ковальчук, Шумилова, 2017а). Распределение редких и редкоземельных элементов в черных сланцах Карской астроблемы показаны на рис. 2. Содержание РЗЭ в сланцах в зоне импактитов и на удалении существенно не различается и в среднем  $\Sigma\text{РЗЭ}$  составляет 470–580 г/т. При этом значительные вариации отношений  $\text{La/Yb}$  (2.63–28.29),  $\text{Ce/Lu}$  (15.30–395.28) и содержания иттрия (4.01–140.03 г/т), вероятно, связаны со спецификой перераспределения вещества в процессе гидротермальных изменений. Распределение редких элементов в дезинтегрированных черных сланцах, вблизи развития зювитов на р. Кара и о-ве Моранго, сходно, спектры имеют четкие Sr- и Y-минимумы и Ba-максимум (см. рис. 2). Однако сильно измененные сланцы с руч. Тогорей отличаются Hf- и Zr-минимумами, U- и Eu-максимумами и пологим распределением РЗЭ, что свидетельствует о высоких концентрациях в породах тяжелых РЗЭ. Спектры из ритмично-чередующихся верхнедевонско-нижнепермских пачек сланцев на удалении от центра астроблемы



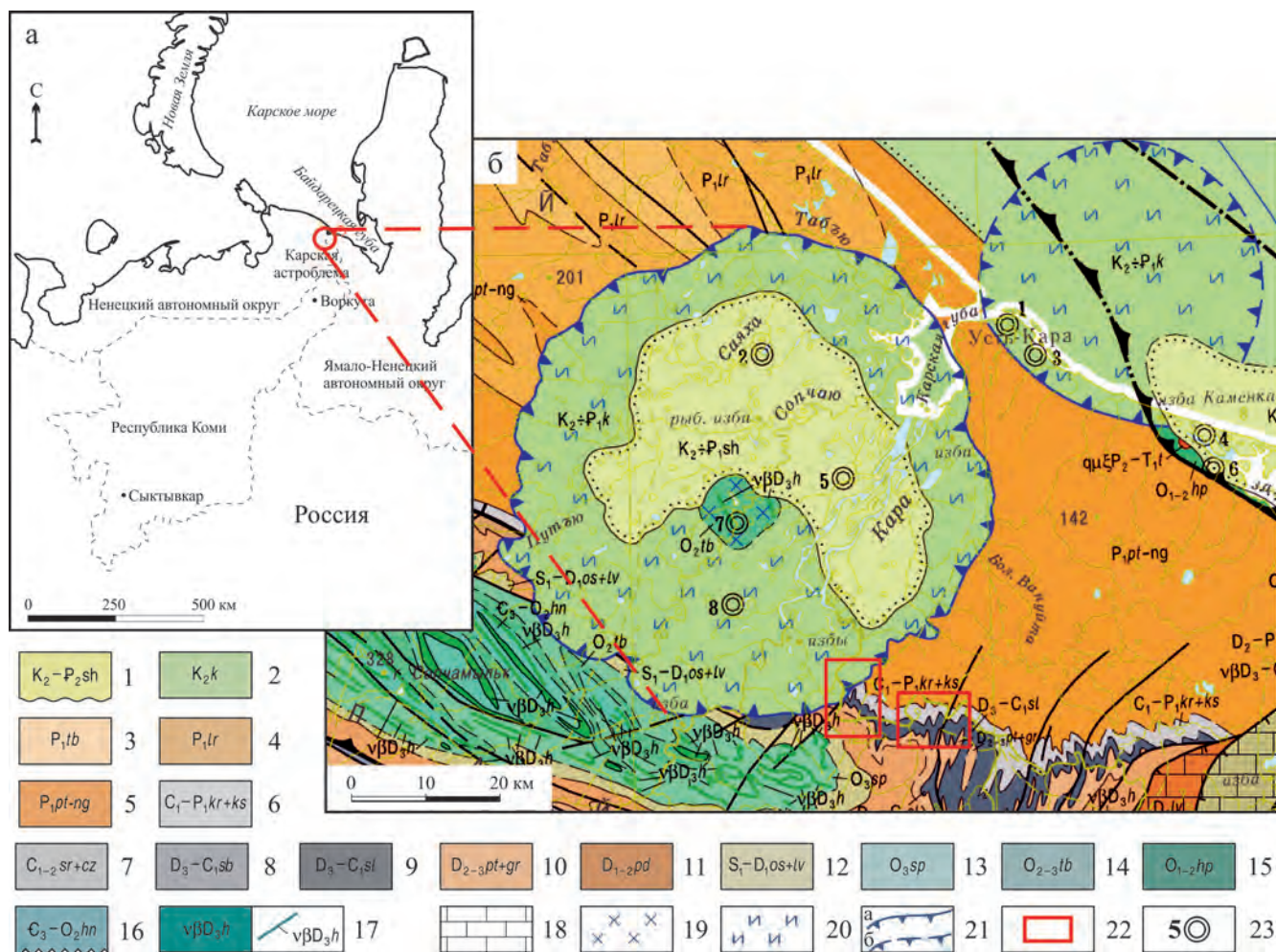


Рис. 1. Геологическая позиция Карской астроблемы.

а – административно-территориальная карта, б – фрагмент Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (Шишкин и др., 2012).

1 – сааяхинская толща: глины опоковидные, песчаные, алевролиты, переотложенные коптокlastиты; 2 – карский коптотгенный комплекс: аллогенные брекчии, тагамиты, зювиты, коптокlastиты; 3 – табьуская свита: полимиктовые песчаники, алевролиты, аргиллиты, углистые аргиллиты, угли; 4 – лиуриягинская свита: полимиктовые песчаники и алевролиты с мергелистыми и песчано-кальцитовыми конкрециями; 5 – пэтаркинская свита и нгебетаахинская толща нерасчлененные: флишоподное переслаивание известковистых и слабоуглеродистых аргиллитов с прослоями кремнистых мергелей, известковистых песчаников, алевролитов, алевролитистых аргиллитов; 6 – карская и карасиловская свиты объединенные: сланцы углеродисто-глинисто-кремнистые, фтаниты, силициты, прослои известняков, кремнистые и детритовые известняки с линзами кремней; 7 – сартыюская и цементнозаводская свиты объединенные: известняки доломитизированные, органогенно детритовые, глинистые, доломиты, водорослевые известняки и с желваками углей; 8 – сибирчатаяхинская толща: ритмичное переслаивание кремнистых известняков, известняков с линзами кремней, прослоев черных кремней; 9 – силоваяхинская свита: переслаивание фтанитов, черных сланцев, силицитов, углеродисто-кремнистых известняков, фосфоритовые конкреции; 10 – путьюская и громашорская свиты объединенные: сланцы карбонатно-кремнисто-глинистые ленточно-слоистые и углеродисто-кремнисто-глинистые, силициты с линзами и конкрециями известняков; в кровле – маркирующий горизонт яшмоидов с карбонатами и силикатами марганца, фтаниты и черные сланцы с конкрециями; 11 – падейская свита: песчаники кварцевые, сланцы кремнисто-глинистые, силициты, линзы манганокarbonатов и баритов; 12 – оюская и ливановская свиты объединенные: ритмичное переслаивание сланцев, углеродисто-глинисто-кремнистых и их карбонатных разностей с углеродисто-кремнистыми известняками, известняки с тентакулитами, прослои сланцев (локально встречаются потоки базальтов); 13 – сопчинская свита: переслаивание известняков, кремнистых, детритовых, глинистых и сланцев глинисто-кремнистых, кремнисто-глинистых; 14 – тальбейтывисская свита: ритмичное переслаивание известковистых песчаников, алевролитов, песчаных известняков, кремнисто-глинистых сланцев (локально базальты, туфолафы); 15 – харапшорская свита: известняки алевролитистые, глинистые, петельчатые, алевролиты; 16 – хенгурская свита: сланцы глинисто-кремнистые, кремнисто-глинистые и их углеродистые разности, редкие прослои известняков, локально развиты туфолавы, песчаники и алевролиты, гравелиты, конгломераты, прослои алевросланцев и углеродисто-глинистых сланцев; 17 – хенгурская свита: сланцы глинисто-кремнистые, кремнисто-глинистые и их углеродистые разности, редкие прослои известняков, локально развиты туфолавы, песчаники и алевролиты, гравелиты, конгломераты, прослои алевросланцев и углеродисто-глинистых сланцев; 18 – хенгурская свита: сланцы глинисто-кремнистые, кремнисто-глинистые и их углеродистые разности, редкие прослои известняков, локально развиты туфолавы, песчаники и алевролиты, гравелиты, конгломераты, прослои алевросланцев и углеродисто-глинистых сланцев; 19 – автохтонные породы (коптокатакlastиты); 20 – аллохтонные породы (зювиты, глыбовые брекчии); 21 – границы астроблем (а – установленные, б – предполагаемые); 22 – район работ; 23 – главнейшие буровые скважины и их номера.

**Fig. 1.** Kara astrobleme geological position.

a – administrative-territorial map, б – fragment of the State Geological Map of the Russian Federation at a scale of 1 : 1 000 000 (Shishkin et al., 2012).

1 – Saayakhinskaya strata: opoka clays, sandstone, aleurolites, redeposited coptoclastites; 2 – Kara coptogenic complex: allogenic breccias, tagamites, suevites, coptoclastites; 3 – Tabyusskaya suite: polymictic sandstones, aleurolites, argillites, carbonaceous argillites, coals; 4 – Liuryaginskaya suite: polymictic sandstones and aleurolites with marl and sandy-calcite nodules; 5 – Petarkinskaya suite and Ngebetayakhinskaya suite undifferentiated: flysch interbedding of calcareous and low-carbonaceous argillites with interlayers of siliceous marls, calcareous sandstones, aleurolite, silvic argillites; 6 – Kara and Karasilovskaya suites combined: carbonaceous-clay-siliceous schists, phtanites, silicites, limestone interlayers, siliceous and detrital limestones with silicon lenses; 7 – Sartyuskaya and Cementnozavodskaya suites combined: dolomitized limestone, organogenic detrital, argillaceous, dolomites, algal limestone and with coal nodules; 8 – Sibirchatayakhinskaya strata: rhythmic interbedding of siliceous limestones, limestones with silica lenses, layers of black flint; 9 – Silovakhinskaya suite: interbedded phtanite, black shales, silicites, carbonaceous siliceous limestones, phosphate concretions; 10 – Putyuskaya and Gromashorskaya suites combined: carbonate-siliceous-argillaceous tape-layered and carbonaceous-siliceous clay shales, silicites with lenses and limestone nodules; in the cap – marking horizon of jasperoids with carbonates and manganese silicates, phtanites and black shales with nodules; 11 – Padeyskaya suite: quartz sandstones, siliceous-clay shales, silicites, manganocarbonate and barite lenses; 12 – Oyuskaya and Livanovskaya suites combined: rhythmic interbedding of shale, carbonaceous-argillaceous-siliceous and their carbonate varieties with carbonaceous-siliceous limestones, limestones with tentaculites, interlayers of shales (basalt flows locally occur); 13 – Sopchinskaya suite: interbedded limestone, siliceous, detrital, clay, and clay-siliceous, siliceous-clay shales; 14 – Talbeytyvisskaya suite: rhythmic interbedding of calcareous sandstones, aleurites, sandy limestones, siliceous-clay shales (locally basalts, tuffolavas); 15 – Kharapeshorskaya suite: aleuritic, clay, looped limestones, aleurolite; 16 – Hengurskaya suite: clay-siliceous shales, siliceous-clay and their carbonaceous varieties, rare interlayers of limestone, locally developed tuffolavas, sandstone and aleurolites, gravelites, conglomerates, interlayers of aleuroshales and carbonaceous-clay shales; 17 – Hengursky gabbro-doleritic complex: gabbro-dolerites, picrodolerites, dolerites; 18 – reef limestone; impact (coptogenic) rocks: 19 – autochthonous rocks (coptocataclastites); 20 – allochthonous rocks (suevites, lumpy breccias); 21 – astrobleme boundaries (a – established, б – assumed); 22 – work area; 23 – main boreholes and their numbers.

на р. Мал. Серью характеризуются менее пологими распределениями РЗЭ и выраженной отрицательной Eu-аномалией, не свойственных для черных сланцев в зоне импактитов. В целом кривые распределения РЗЭ для черносланцевых пород в районе Карской импактной структуры соответствуют “черным сланцам” Урала (Козырева, 1996).

Согласно полученным данным, сланцы в непосредственной близости к кольцевому поднятию импактной структуры и на удалении несущественно различаются содержаниями микроэлементов. В то же время в разных районах наблюдается геохимическая специфика ряда компонентов. Так, в зоне развития зювитов на р. Кара черные сланцы по отношению к кларкам для “черных сланцев” мира (Юдович, Кетрис, 1994; Козырева, 1996) характеризуются резко аномальными содержаниями (в среднем, г/т): Mn (3200), B (800), Sr (450), Ge (32), Se (7.7), Cd (4.1), Eu (2.7) и аномальными – Ti (3600), Ba (1280), Cr (180), Ce (52), La (41), Ga (20), Gd (7.2), Dy (5.8), Cs (3.8), W (3.3). Черносланцевые толщи на удалении от центра астроблемы на р. Мал. Серью отличаются резко аномальными содержаниями (в среднем, г/т): Mn (5870), B (1730), Zr (630), Ge (60), Cd (18), Hf (14) и аномальными – Ti (4120), Ba (1000), Rb (160), Li (72), Ce (62), La (41), Ga (33), Sc (30), Co (27), Cs (7.8) и Eu (1.8). Остальные элементы имеют околосларковые значения.

## МИНЕРАЛОГИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СЛАНЦЕВ

Углеродистые толщи в районе Карской астроблемы представлены верхнедевонско-нижнепермскими кремнисто-глинистыми, углисто-известковисто-кремнистыми сланцами и алевролита-

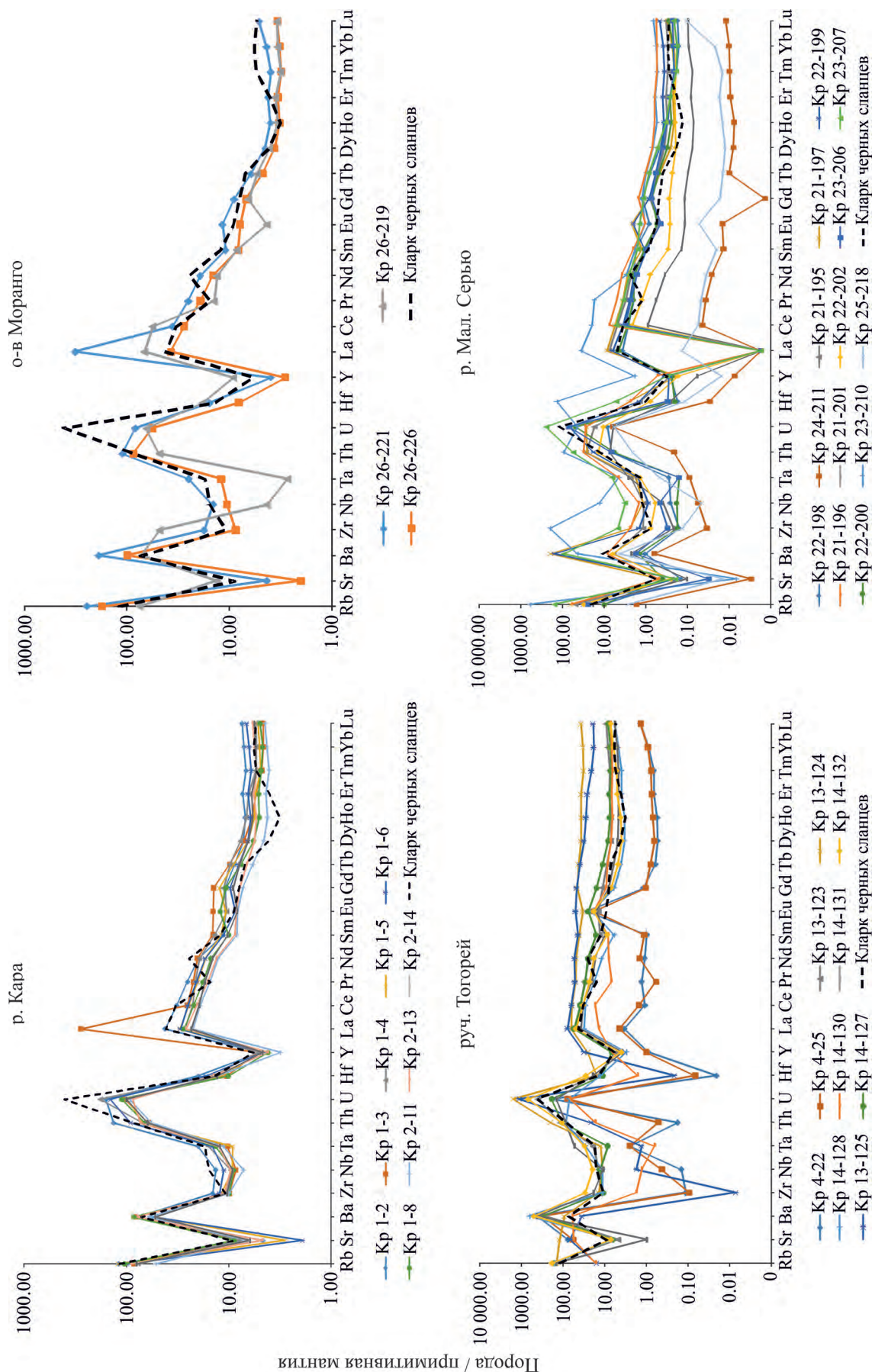
ми с интенсивно проявившейся жильной минерализацией, пиритизацией, формированием интенсивной редкоземельной минерализации. Породы метаморфизованы в условиях относительно низкого уровня регионального метаморфизма, о чем свидетельствует присутствие в породах хлорита и мусковита. В черных сланцах четко проявляется полосчатая текстура. Структура основной массы сланцев алевролитовая, пелитоморфная. Главные породообразующие минералы – кварц, мусковит, хлорит. Второстепенными являются плагиоклаз (альбит), калиевый полевой шпат, карбонаты (кальцит, доломит). Доломит в породе встречается в виде ромбоэдрических кристаллов и их сростков в ассоциации с кварцем, цирконом и монацитом. По составу доломит является железистым ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – до 18 мас. %), с поверхности нередко замещается сидеритом (Ковальчук, Шумилова, 2017). Также встречаются единичные зерна пироксена.

Сульфидная минерализация представлена чаще всего пиритом, халькопиритом, реже сфалеритом. В породе постоянно отмечается присутствие лимонитизированного пирита в виде фрамбоидов, образующегося предположительно за счет процесса сульфат-редукции бактериями (рис. 3а, б). Пирит в черных сланцах ассоциирует с хлоритом и углеродным веществом, образуя тесные агрегаты. Также встречаются сростки кристаллов пирита с монацитом. В качестве включений в пирите диагностированы сфалерит, халькопирит, апатит и микроскопические неидентифицируемые фазы PbO. В кварц-кальцитовых и кварц-ангидритовых микропрожилках встречен новообразованный пирит, образующий редкие кубические кристаллы и их сростки (см. рис. 3к). Общее количество сульфидов в сланцах достигает 3%.

**Таблица 1.** Петрохимический состав черных сланцев Карской астроблемы по данным силикатного анализа, мас. %  
**Table 1.** Petrochemical composition of black shales of the Kara Astrobleme according to silicate analysis, wt %

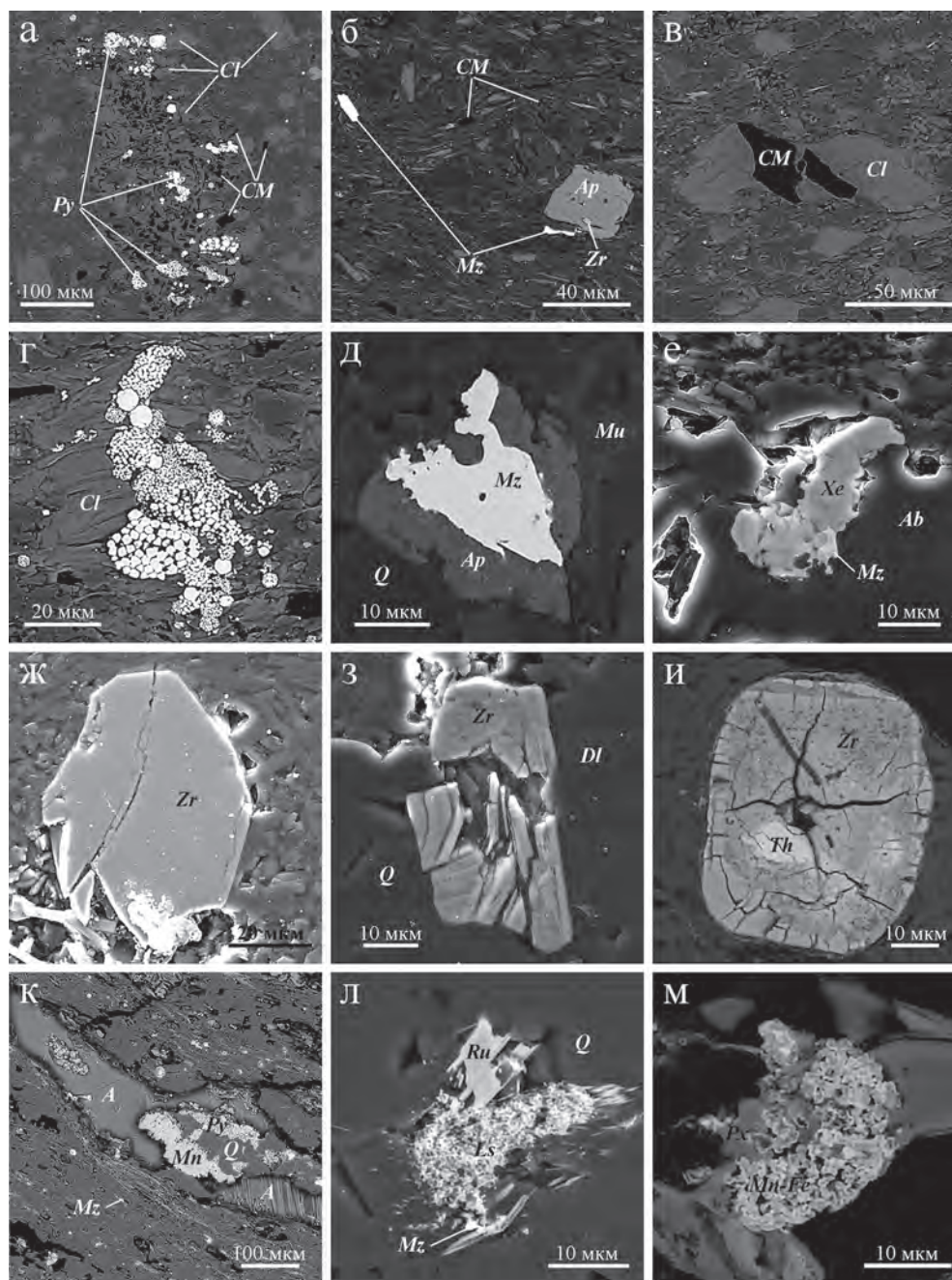
Характеристика породы (привязка)	№ обр.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> общ.	MnO	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	П.п.п.	SO <sub>3</sub>	Сумма с п.п.п.	FeO	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
Углеродистый алевролит черного цвета (Кара)	Кр 15-1-2	58.78	0.77	15.52	6.05	0.063	1.66	4.22	2.71	2.44	0.15	6.17	—	98.53	4.09	0.32	1.13	1.96	—
Алевролит тонкодисло- цированный с жильн минер (Кара)	Кр 15-1-8	56.72	0.74	15.17	7.1	0.11	3.6	4.88	1.9	2.25	0.16	7.04	0.1	99.77	5.09	0.36	2.34	2.01	—
Глинистый алевролит (Кара)	Кр 15-2-11	60.18	0.75	14.5	6.45	0.068	2.6	4.37	1.62	3.43	0.17	5.21	—	99.35	4.72	0.32	1.89	1.73	—
Алевролит углистый, се- кущий жилы (Тогорей)	Кр 15-13-124	45.46	0.47	11.4	5.69	0.23	9.15	2.49	2.09	0.33	0.093	18.22	10.86	106.48	1.02	5.45	1.74	4.67	—
Алевролит толстоплит- чатый (Тогорей)	Кр 15-13-125	31.64	0.1	2.99	4.96	1.73	24.48	5.01	0.26	0.41	6.67	20.37	0.49	99.11	3.14	0.25	17.67	1.82	—
Алевролит рыхлый (Тогорей)	Кр 15-14-132	65.44	0.56	11.6	2.15	0.03	0.5	1.17	2.83	1.06	0.1	12.96	1.18	99.57	0.1	0.79	0.18	2.05	0.44
Углеродистый сланец (о-в Моранго)	Кр 15-26-219	81.26	0.2	1.5	2.58	0.28	4.7	1.72	0.25	0.15	0.02	6.38	0.1	99.14	1.9	0.28	6.2	0.68	—
Углеродистый сланец де- зинтегрированный (о-в Моранго)	Кр 15-26-221	54.6	0.87	23.86	5.15	0.03	0.5	2.11	5.73	0.63	0.09	5.2	0.18	98.95	3.21	0.46	0.11	1.94	0.32
Углеродистый сланец (о-в Моранго)	Кр 15-26-226	61.7	0.74	18.87	6.1	0.03	0.5	2.11	4.19	0.44	0.07	4.5	0.13	99.39	4.63	0.36	0.17	1.47	0.44
Углеродистый сланец (Мал. Серью)	Кр 15-21-195	66.8	0.6	15.17	4.2	0.39	2.29	1.42	2.5	0.91	0.08	5.37	0.1	99.83	2.11	0.67	2.12	2.09	—
Алевролит углеродистый (Мал. Серью)	Кр 15-21-198	53.42	0.27	5.97	6.15	2.27	11.36	3.32	0.81	0.3	0.39	14.52	0.13	98.91	4.66	0.2	13.67	1.49	—
Углеродистый сланец де- зинтегрированный (Мал. Серью)	Кр 15-22-200	47.66	0.22	5.48	4.6	1.52	16.6	0.64	0.8	0.29	0.25	16.97	3.87	98.9	0.62	1.89	10.65	3.98	—
Углеродистый сланец тонкоплитчатый (Мал. Серью)	Кр 15-23-206	68.56	0.37	7.15	3.9	0.01	1.75	1.1	1.78	0.54	0.21	12.47	2.83	100.67	0.59	1.63	0.1	3.31	—
Алевролит тонкоплитча- тый (Лавовый)	Кр 15-10-83	54.74	0.86	15.08	8.31	0.091	3.54	5.56	2.32	1.75	0.2	7.52	—	99.97	5.64	0.34	2.79	2.67	—





**Рис. 2.** Распределение редких и редкоземельных элементов в черных сланцах. Концентрации редких элементов нормализованы по примитивной мантии (Sun, McDonough, 1989).

**Fig. 2.** Distribution of rare and rare earth elements in black shales. Concentrations of rare elements are normalized by a primitive mantle (Sun, McDonough, 1989).



**Рис. 3.** Электронно-микроскопические изображения породообразующих и акцессорных минералов черных сланцев мишени Карской астроблемы (а–д, и–м – в отраженных электронах, е–з – во вторичных электронах).

а – хлорит-углеродистое стяжение с пиритом (Py); б – выделения монацита (Mz), апатита (Ap) и углеродного вещества (CM) в хлорит-мусковитовой массе породы; в – включение углеродного вещества (CM) в хлорите (Cl); г – фрамбонды лимонитизированного пирита; д – включение монацита (Mz) в апатите (Ap); е – ксенотим (Xe) в сростании с монацитом (Mz); ж–и – зерна циркона (Zr), и – с включениями торита (Th); к – кварц-ангидритовый микропрожилкок с новообразованным пиритом (Py) и Mn-оксидами (Mn); л – сростание лейкоксена (Ls) с рутилом (Ru) и монацитом (Mz); м – пористый агрегат Mn-Fe-окислов в сростании с пироксеном (Px).

**Fig. 3.** Scanning electron microscopy data of rock-forming and accessory minerals of black shales of target of the Kara Astrobleme (а–д, и–м – back scattered electron images, е–з – scattered electron images).

а – chlorite-carbon bundle with pyrite (Py); б – isolations of monazite (Mz), apatite (Ap) and carbon matter (CM) in chlorite-muscovite mass of rocks; в – inclusion of carbon matter (CM) in chlorite (Cl); г – limonitized pyrite framboids; д – inclusion of monazite (Mz) in apatite (Ap); е – xenotime (Xe) in accretion with monazite (Mz); ж–и – zircon grains (Zr), и – with inclusions of thorite (Th); к – quartz-anhydrite microprophyloids with newly formed pyrite (Py) and Mn-oxides (Mn); л – intergrowth of leucoxene (Ls) with rutile (Ru) and monazite (Mz); м – porous aggregate of Mn-Fe-oxides in accretion with pyroxene (Px).



Углеродистое вещество в черных сланцах находится в тонкодисперсном состоянии, равномерно рассеяно в породе, окрашивая минералы в черный цвет, а также образует вытянутые параллельные сланцеватости линзовидные прослои; ассоциирует с хлоритом, пиритом, реже с мусковитом, апатитом и редкоземельными минералами (см. рис. 3а–в). Содержание  $C_{орг}$  в углеродистых породах окружения Карской астроблемы находится в пределах 0.65–5.45 мас. %.

В результате микронзондового изучения пород была установлена редкоземельная минерализация, представленная монацитом и ксенотимом. В качестве акцессорных минералов диагностированы апатит, циркон, лейкоксен, рутил, сфалерит, халькопирит. В ксенотиме встречены микровключения тиманнита ( $HgSe$ ).

Самым распространенным редкоземельным минералом в углеродистых сланцах является монацит, который формирует крупные зерна неправильной формы, размером от 10–20 до 200 мкм. Он образует уплощенные выделения между прослоями углеродисто-слюдистых слоев (см. рис. 3б, к), а также заполняет микрополости в межзерновом пространстве карбоната. Монацит тесно ассоциирует с апатитом, ксенотимом и пиритом, нередко образует сростки с ними (см. рис. 3д, е). Кроме того, он постоянно наблюдается в кварц-кальцитовых и ангидритовых микропрожилках и стяжениях, ассоциируя с пиритом и УВ (углеродное вещество). Наиболее представительные химические составы монацита представлены в табл. 2. Монацит является существенно цериевым, содержит примесь кальция (до 0.72 мас. %  $CaO$ ). По соотношению главных минералообразующих компонентов ( $Ce_2O_3$ ,  $La_2O_3$  и  $Nd_2O_3$ ) были выделены три основные разновидности монацита: монацит-(La-Ce), монацит-(Nd-Ce) и монацит-(Ce-Nd) (рис. 4). При этом установлено, что составы зерен монацита являются не-

однородными, содержание РЗЭ в одном и том же зерне существенно варьирует. В составе монацита наиболее высокие концентрации установлены для церия (16.26–38.05 мас. %  $Ce_2O_3$ ), лантана (2.89–34.97 мас. %  $La_2O_3$ ) и неодима (6.81–27.82 мас. %  $Nd_2O_3$ ). Кроме того, в заметных количествах присутствуют празеодим (2.07–5.31 мас. %  $Pr_2O_3$ ), самарий (0.26–8.69 мас. %  $Sm_2O_3$ ) и гадолиний (0.30–2.70 мас. %  $Gd_2O_3$ ). Монацит нередко обогащен торием (до 8.59 мас. %  $ThO_2$ ), что, вероятно, связано в некоторых случаях с микровключениями  $ThO_2$ . При этом установлено, что монациты из черных сланцев с о-ва Моранго отличаются более высокими содержаниями  $Nd_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  и  $ThO_2$ .

Ксенотим образует зерна неправильной формы размером 10–50 мкм, выполняет полости в породообразующих силикатах (кварц, альбит), тесно ассоциирует с углеродным веществом и рутилом, нередко образует сростания с монацитом (см. рис. 3е), реже с цирконом. В качестве включений в ксенотиме встречены циркон, торит (с высоким содержанием  $UO_2$ ) и тиманнит ( $HgSe$ ), в составе последнего обнаруживается высокое содержание S (9.08–20.38 мас. %). Кроме того, отмечены микровключения  $UO_3$  с  $ThO_2$ . Химический состав ксенотима характеризуется присутствием примесей  $Dy_2O_3$  (5.20–9.17 мас. %),  $Er_2O_3$  (2.52–5.52 мас. %),  $Gd_2O_3$  (1.96–4.58 мас. %),  $Yb_2O_3$  (0.82–3.38 мас. %),  $Ho_2O_3$ ,  $Tm_2O_3$ ,  $Sm_2O_3$  и  $Eu_2O_3$  (табл. 3).

Апатит распределен в породе неравномерно, образует зерна призматической формы размером 10–40 мкм, ассоциирует с углеродным веществом и монацитом, нередко образует сростки с ним, в качестве мелких включений встречен циркон (см. рис. 3б, д). По химическому составу является фтор-apatитом (F до 4 мас. %). В виде микропримеси в его составе отмечен стронций ( $SrO$  до 0.2 мас. %).

Циркон встречается в виде многочисленных тетрагонально-дипирамидальных хорошо огранен-

**Таблица 2.** Химический состав монацита в черных сланцах разных районов обрамления Карской астроблемы по данным микронзондового анализа, мас. %

**Table 2.** Chemical composition of monazite in black shales from different framing areas of the Kara Astrobleme according to microprobe analysis, wt %

Компонент	р. Кара		руч. Тогорей		о-в Моранго				р. Мал. Серью			
	2/3	2/5-1	125/11	125/15	219/38	221/1-1	221/4-1	226/4	206/13	206/14	207/1-1	210/6
$SiO_2$	—	—	0.42	0.35	—	—	—	—	—	—	—	0.56
$P_2O_5$	30.3	29.68	30.02	29.44	28.18	28.24	30.65	29.52	22.79	25.64	28.61	29.98
$CaO$	—	0.17	—	0.58	0.26	0.61	0.27	0.55	0.21	0.70	0.19	—
$La_2O_3$	6.89	7.18	11.81	13.94	16.65	3.01	16.70	5.07	19.95	12.17	12.39	7.12
$Ce_2O_3$	30.19	30.53	36.05	32.62	37.08	16.26	32.94	19.45	36.06	32.88	33.34	35.26
$Pr_2O_3$	4.21	4.16	3.99	2.88	3.45	4.21	2.61	3.41	3.78	2.91	4.00	4.19
$Nd_2O_3$	20.39	18.95	16.26	12.32	12.51	25.79	10.17	25.91	12.21	15.62	13.72	18.61
$Sm_2O_3$	4.05	3.88	1.25	1.94	1.30	8.69	0.86	8.42	2.87	2.83	2.85	2.30
$Gd_2O_3$	2.01	2.16	—	1.39	1.10	2.70	0.74	2.02	1.38	1.27	1.27	1.66
$ThO_2$	—	—	0.54	1.92	0.74	6.96	3.37	4.97	0.73	3.11	1.14	0.54
Сумма	98.04	96.71	100.34	97.38	101.27	96.47	98.31	99.32	99.98	97.13	97.51	100.22

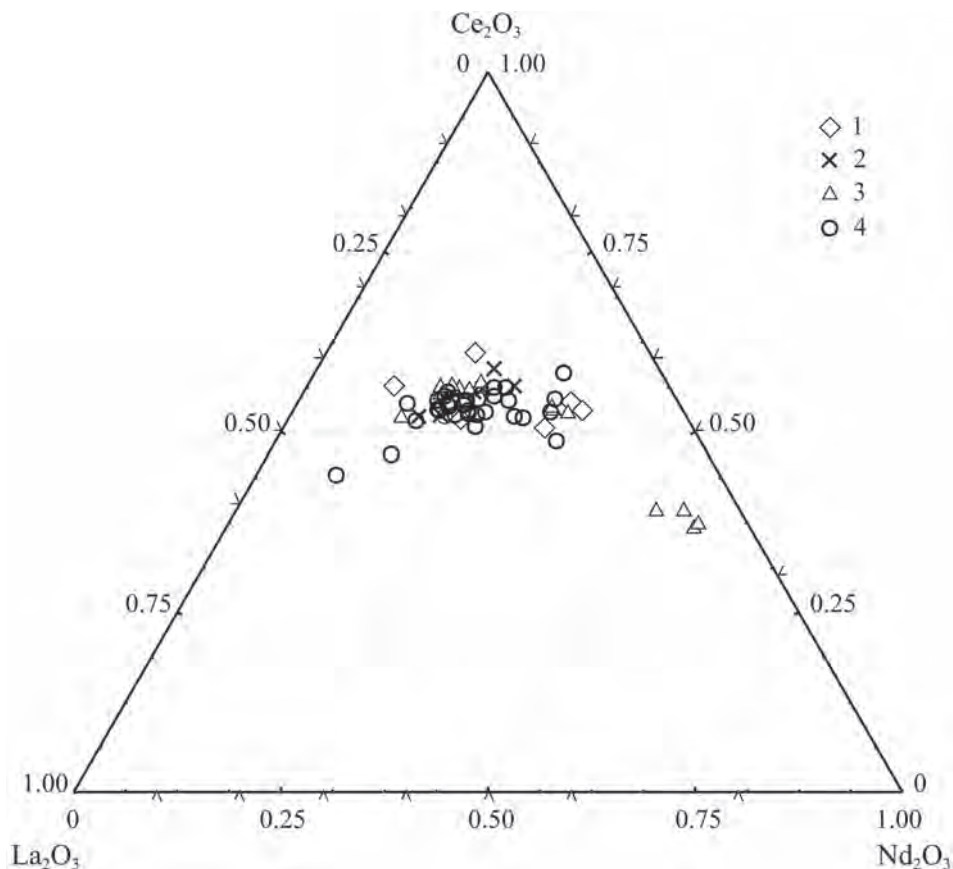


Рис. 4. Монациты в углеродистых сланцах на диаграмме  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Ce}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$ .

1 – р. Кара, 2 – руч. Тогорей, 3 – о-в Моранго, 4 – р. Мал. Серью.

Fig. 4. Monazites in carbon shales on diagram  $\text{La}_2\text{O}_3\text{--Ce}_2\text{O}_3\text{--Nd}_2\text{O}_3$ .

1 – Kara River, 2 – Togorey Stream, 3 – Morango island, 4 – Mal. Seryu River.

Таблица 3. Химический состав ксенотима по данным микрозондового анализа, мас. %

Table 3. Chemical composition of xenotime according to microprobe analysis, wt %

Компонент	р. Мал. Серью										о-в Моранго	
	206/1	206/5	206/35	206/36	206/43	206/44	206/45	206/46	206/50	206/52	226/6-2	226/10-1
$\text{P}_2\text{O}_5$	29.82	32.57	34.35	33.63	33.60	32.59	32.30	32.95	32.36	31.59	35.49	34.82
$\text{Y}_2\text{O}_3$	48.83	52.54	54.26	49.36	52.18	50.64	50.06	54.21	52.77	52.23	43.40	43.39
$\text{Sm}_2\text{O}_3$	—	—	—	—	—	—	—	—	1.02	—	1.14	0.64
$\text{Gd}_2\text{O}_3$	2.26	2.49	2.27	2.38	1.96	2.9	3.73	2.03	4.01	3.05	4.58	3.25
$\text{Dy}_2\text{O}_3$	6.11	5.71	7.25	7.15	5.99	7.57	7.14	5.38	7.19	6.23	6.55	5.20
$\text{Ho}_2\text{O}_3$	—	—	1.79	2.01	1.54	1.2	0.81	1.1	—	0.67	1.10	0.96
$\text{Er}_2\text{O}_3$	3.64	3.17	4.75	4.53	5.52	3.82	3.56	2.88	3.19	2.53	3.39	3.46
$\text{Yb}_2\text{O}_3$	2.48	1.57	3.28	1.81	3.38	1.96	1.26	2.30	2.84	0.82	2.22	2.68
$\text{ThO}_2$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.12
Сумма	93.14	98.05	107.95	100.87	104.17	100.68	98.86	100.85	103.38	97.12	97.87	95.52

ных кристаллов размером от 30 до 80 мкм в основной массе породы. Зерна циркона из углеродистых сланцев с о-ва Моранго часто раздроблены (шокированы), что, вероятно, свидетельствует о механическом влиянии импактного процесса (см. рис. 3ж-и). Нередко можно встретить сrostки зерен цирко-

на с ксенотимом. В химическом составе циркона отмечены примеси гафния (1.19–1.90 мас. %  $\text{HfO}_2$ ) и ниобия (до 1.24 мас. %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ). Во вскрытом зерне установлено зональное строение, центральная часть его характеризуется повышенными содержаниями тория (30.16 мас. %  $\text{ThO}_2$ ) и примесью урана

(0.91 мас. %  $\text{UO}_3$ ), предположительно минеральная фаза отвечает ториту (см. рис. 3и).

В силикатной матрице породы в тесной ассоциации друг с другом развиваются лейкоксен и рутил (см. рис. 3л). Рутил образует игольчатые кристаллы и их скопления размером до 100 мкм. Лейкоксен представлен пористыми агрегатами с включениями кварца и слюд. Рутил нередко образует сростки с монацитом. В виде примеси в рутиле отмечен ниобий (до 0.65 мас. %  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ).

Ангидрит в углеродистых сланцах образует микропрожилки с кварцем, пиритом и монацитом мощностью до 200 мкм (см. рис. 3к). Встречен только на удалении от центра астроблемы в мощной пачке сланцев на р. Мал. Серью.

Обнаруженный в углеродистых сланцах пироксен по составу представлен ферросилитом ( $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ ) и каноитом ( $\text{MnMgSi}_2\text{O}_6$ ). В основной массе породы образует сростания с пористыми агрегатами Mn-Fe- окислов (см. рис. 3м).

В породе широко развиты марганецсодержащие железистые гидроксиды (Mn-содержащий лимонит), представленные в виде тонких корочек на кристаллах пирита или почти полностью их замещающих, а также древовидных и губчатых агрегатов в полостях кварц-слюдистой массы породы (см. рис. 3л). Описываемые гидроксиды имеют сложный состав, в них постоянно отмечаются примеси MnO, CaO,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$ , они являются продуктами разложения сульфидов, образованных, вероятно, в окислительных условиях гипергенеза.

В результате исследования изотопии углеродистого вещества в черных сланцах были установлены типичные для органического вещества облегченные изотопные характеристики (–25.00...–25.03 ‰ $^{13}\text{C}$ ‰), соответствующие типичному УВ органического происхождения (Галимов, 1968). Согласно проведенным термографическим исследованиям, все образцы черных сланцев содержат УВ, выгорание которого сопровождается интенсивным экзотермическим эффектом с началом окисления 476–544°C и окончанием выгорания 621–691°C. Значения максимумов экзотермического эффекта (546–598°C) указывают на преобразование углеродистого вещества пород мишени ближайшего окружения Карской астроблемы в условиях регионального метаморфизма зеленосланцевой фации (Иванова и др., 1974; Шумилова, 2003). Выявленные различия в температурах начала выгорания УВ и в характере экзотермического эффекта, вероятно, связаны не только с агрегатным состоянием, но и со степенью разупорядоченности УВ, которая уменьшается по мере повышения уровня метаморфизма.

Согласно данным рамановской спектроскопии, положение G-полосы изученного УВ лежит в пределах от 1596 до 1603  $\text{см}^{-1}$ , ее полуширина – от 49 до 54  $\text{см}^{-1}$ . По характеристикам КР-спектров УВ во всех типах углеродистых пород мишени ближай-

шего окружения Карской астроблемы идентичны и соответствуют слабоупорядоченному углеродистому веществу, образованному в углистых карбонатно-силикатных сланцах (Wopenka, Pastoris, 1993).

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Постимпактная гидротермальная деятельность, по данным исследования (Наумов, 1996), проявляется в астроблемах в виде формирования соответствующих минеральных ассоциаций и перераспределения химических элементов в породах коптогенного комплекса. Такие проявления установлены более чем в 60 астроблемах по всему миру. Гидротермальная минерализация распространена во всех структурно-литологических комплексах астроблем на Земле (Abramov, Kring, 2004; Osinski, 2005; Muttik et al., 2010; Velasco-Villareal et al., 2011; Osinski et al., 2012; Koeberl, 2014; Reimold, Koeberl, 2014; Stoffler et al., 2017). При этом гидротермальные процессы для крупных кратеров могут продолжаться на протяжении сотен тысяч лет (Abramov, Kring, 2004), образуя большие объемы гидротермальных изменений, например, для кратера 50 км – порядка 1000  $\text{км}^3$ . Среди наиболее ярких объектов можно привести в качестве примера постимпактные гидротермальные медно-свинцово-цинковые месторождения астроблемы Садбери диаметром около 250 км (Ames et al., 1998), где гидротермальная деятельность продолжалась на протяжении около 1 млн лет. Гидротермальная постимпактная деятельность предполагается даже на Марсе и других планетах (Osinski et al., 2012).

Согласно модели (Масайтис, Наумов, 1993), основанной на анализе эволюции термального поля импактного кратера, выделены три последовательные стадии единого регрессивного гидротермального процесса: 1) начальная, отвечающая послеударной конфигурации изотерм; 2) терминальная, происшедшая после инверсии термального поля в центре кратера и характеризовавшаяся градиентом температуры порядка 30–100°C/км; 3) заключительная, на которой этот градиент не превышал 10–30°C/км, и гидротермальная конвекция, которая имела место лишь в приповерхностной зоне кратера. Источником флюидного компонента растворов в данной модели предполагаются поверхностные и метеорные воды, относящиеся к постимпактной гидротермальной деятельности. Другим источником могли быть продукты дегидратации и дегазации минералов при их ударной деформации и плавлении. Источником минерального вещества, в соответствии с составом гидротермальной минерализации и вмещающих пород, служат ударно-преобразованные породы мишени. В результате схема формирования гидротермальной минерализации сводится к следующему: при взаимодействии



щелочных обогащенных Ca, Mg, Fe, SO<sub>3</sub> и CO<sub>2</sub> растворов с ударно- и термально-преобразованными породами субстрата формируются кальциевые и кальциево-железистые минеральные ассоциации.

В пределах коптогенного комплекса Карской депрессии породы мишени имеют довольно мощные отложения, обогащенные углеродистым веществом. Глубина тектонически разупорядоченных пород коптогенного и цокольного комплексов оценивается от 3.5 до 10 м и более (Масайтис и др., 1980; Удоратин и др., 2010). Согласно тектонической модели Масайтиса и Мелоша (Масайтис и др., 1998; Вишневский, 2007; Melosh, 1989), ударно-тектонические преобразования пород имеют распространение в форме полусферы, что предполагает не только изменения на глубину, но и преобразования по латерали, что может свидетельствовать о гидротермальных преобразованиях по периферии, вплоть до поверхности астроблемы. Объем импактного расплава, формирующего тагамиты и зювиты, составляет порядка 100 км<sup>3</sup> (Масайтис и др., 1980), в то время как потенциальный объем мобилизации вещества с учетом изменения пород окружения астроблемы может составлять до 65 000 км<sup>3</sup>. 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.

Уникальность Карской астроблемы состоит в том, что породами мишени являются широко распространенные черные сланцы, характеризующиеся повышенными кларками многочисленных редких элементов (Юдович и др., 1998а). Известно, что промышленно значимая рудная минерализация в черных сланцах всегда связана с гидротермальной переработкой и привнесом полезных компонентов. Согласно известным моделям формирования крупных астроблем, импактный процесс в связи с Карским событием должен был стимулировать интенсивную гидротермальную деятельность не только в самих импактиках, но и в породах окружения астроблемы (Melosh, 1989; Osinski et al., 2012; Koeberl, 2014; Reimold, Koeberl, 2014; Stoffler et al., 2017), создавая условия для концентрирования редких и благородных металлов во вмещающих черных сланцах. Таким образом, теоретически в гидротермально переработанных черных сланцах окружения Карской астроблемы возможна продуктивная рудная минерализация. Неким своеобразным 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 концентри-

рование золотосульфидной минерализации за счет окружающих месторождение черных сланцев, что было доказано на основе изотопно-геохимических исследований (Distler et al., 2004; Chang et al., 2008; Дубинина и др., 2014).

Ранее вопрос возможной рудоносности гидротермально переработанных черных сланцев периферийного окружения Карской астроблемы на редкие и благородные металлы не рассматривался. Однако в той или иной мере отмечались гидротермальные изменения черносланцевых пород, проявляющиеся в их обогащении марганцем, барием, медью, цинком, ванадием (Юдович, Шулепова, 1992; Юдович и др., 1998а). Между тем рудоносность непосредственно импактитов изучалась довольно подробно. Так, М.В. Наумов с соавторами (Наумов и др., 2004) на основе данных 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 по изучению импактитов Карской астроблемы в зювитах также встречается минерализация с ультравысокой степенью восстановленности, включая самородные металлы (Fe, Ni, Al, Ag, Cu, Sn), интерметаллиды сложного состава, камасит (Сергиенко и др., 2010). В тагамитах отмечено повышенное в 3 раза содержание Ni и Cr по сравнению с породами цокольного комплекса (Масайтис и др., 1980), 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. 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 Карской астроблемы, в том числе в черных сланцах, ассоциация типоморфных минералов постимпактной гидротермальной деятельности включает в себя хлориты, цеолиты, кальцит, пирит, эпидот. В карбонатных породах широко развита кварц-сульфидная минерализация.

В результате проведенных исследований в районе Карской астроблемы в черных сланцах установлены аномальные и резко аномальные содержания Ti, Ba, Cr, Rb, Li, Ga, Sc, Co, Cs, W, Mn, B, Zr, Sr, Ge, Cd, Hf, Se и PЗЭ. В то же время в различных районах импактного события выявлена геохимическая специфика концентрирования разных компонентов, вероятно связанная с локальной специфи-

кой пород подложки. С помощью микрозондового анализа пород диагностирована редкоземельная минерализация, представленная монацитом и ксенотимом, а также апатит, циркон, лейкоксен, рутил, сфалерит, халькопирит, в качестве включений в ксенотиме встречены микровключения тиманнита (HgSe). Кроме того, выявлен ряд особенностей в составах различных минералов. К ним, в частности, относятся: повышение железистости (ожелезненный доломит, замещающийся сидеритом, лимонитизация пирита, развитие в породе многочисленных марганецсодержащих железистых окислов); обогащение кремнеземом (хлориты, ферросилит); редкоземельная минерализация, представленная фторапатитом, монацитом и ксенотимом (с включениями циркона и тиманнита); монацит в виде зерен скелетной формы с неправильными очертаниями и изъеденными краями, с высоким содержанием Nd и Th; консолидация УВ и его приуроченность к хлорит-пиритовой минерализации; развитие жильной минерализации с новообразованным пиритом и монацитом; часто корродированные и раздробленные зерна циркона. Проведенные термографические и КР-спектроскопические исследования углеродистого вещества пород окружения Карской астроблемы позволили сделать вывод, что УВ претерпело преобразование на уровне хлоритовой стадии метаморфизма.

Таким образом, нами впервые получены детальные сведения о литологических, минералогических и геохимических особенностях и проявлении постимпактных гидротермальных процессов в черных сланцах ближайшего окружения Карской астроблемы. Установлен ряд элементов, имеющих аномально высокие концентрации. Полученные данные позволяют считать черные сланцы окружения Карской астроблемы перспективными на выявление рудных проявлений в связи с постимпактной гидротермальной деятельностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Буряк В.А., Хмелевская Н.М. (1997) Сухой Лог – одно из крупнейших месторождений мира. Владивосток: Дальнаука, 156 с.
- Вишневецкий С.А. (2007) Астроблемы. Новосибирск: Нонпарель, 288 с.
- Вуд Б.Л., Попов Н.П. (2006) Гигантское месторождение золота. Сухой Лог (Сибирь). *Геология и геофизика*, 47(3), 315-341.
- Галимов Э.М. (1968) Геохимия стабильных изотопов углерода. М.: Недра, 226 с.
- Данилова Ю.В., Шумилова Т.Г., Данилов Б.С. (2007) Минералого-геохимические особенности графитизированных пород Чернорудско-Баракчинской тектонической зоны. *Зап. РМО*, 136(3), 66-76.
- Данилова Ю.В., Савельева В.Б., Данилов Б.С., Шумилова Т.Г. (2015) Углеродное вещество и сопутствующая рудная минерализация апокарбонатных метасоматитов зоны Тункинского разлома, Восточный Саян. *Руды и металлы*, (2), 5-19.
- Дубинина Е.О., Чугаев А.В., Иконникова Т.А., Авдеев А.С., Якушев А.И. (2014) Источники вещества и флюидный режим формирования кварц-карбонатных жил на месторождении золота Сухой Лог, Байкало-Патомское нагорье. *Петрология*, 22(4), 347-379.
- Жмодик С.М., Миронов А.Г., Жмодик А.С. (2008) Золотоконцентрирующие системы офиолитовых поясов (на примере Саяно-Байкало-Муйского пояса). Новосибирск: Гео, 304 с.
- Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розина Е.Л. (1974) Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 399 с.
- Импактные кратеры на рубеже мезозоя и кайнозоя (Отв. ред. В.Л. Масайтис). (1990) Л.: Наука, 185 с.
- Карпузов А.Ф., Карпузов А.А. (2005) Крупнообъемные золоторудные месторождения в углеродистых формациях как возможная основа расширения сырьевой базы золота России. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*, (3), 12-18.
- Карпузов А.Ф., Карпунин А.М., Соболев Н.Н., Мозолева И.Н., Карпузов А.А. (2008) Минерально-сырьевой потенциал черносланцевых формаций платформенных комплексов России. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*, (5), 2-15.
- Ковальчук Н.С., Шумилова Т.Г. (2017а) Геохимическая специфика черных сланцев в зоне Карского импактного события (Пай-Хой). "Геодинамика, вещество, рудогенез Восточно-Европейской платформы и ее складчатого обрамления". Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием. Сыктывкар: Геопринт, 260-261.
- Ковальчук Н.С., Шумилова Т.Г. (2017б) Черные сланцы окружения Карской астроблемы (Пай-Хой). Материалы Юбилейного съезда Российского минералогического общества "200 лет РМО". СПб.: ЛЕМА, 236-238.
- Козырева И.В. (1996) Геохимия редких и редкоземельных элементов в черносланцевых формациях Севера Урала и Пай-Хоя. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Сыктывкар, 22 с.
- Летников Ф.А., Савельева В.Б., Аникина Ю.В., Смагунова М.М. (1996) Высокоуглеродистые тектониты – новый тип концентрирования золота и платины. *Докл. АН*, 347(6), 795-798.
- Марченко Л.Г. (2012) Генезис и минеральные ассоциации золота и платиноидов в месторождениях "черносланцевого" типа Казахстана. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб., 53 с.
- Масайтис В.Л., Данилин А.Н., Мащак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В., Шаденков Е.М. (1980) Геология астроблем. Л.: Недра, 231 с.
- Масайтис В.Л., Мащак М.С., Наумов М.В., Райхлин А.И. (1994) Гигантские астроблемы России. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 32 с.
- Масайтис В.Л., Мащак М.С., Райхлин А.И., Селивановская Т.В. (1998) Алмазонасные импактиты Попигаийской астроблемы. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 178 с.
- Масайтис В.Л., Наумов М.В. (1993) Принципиальная модель гидротермальной циркуляции в импактных кратерах. *Докл. АН*, 333(1), 70-72.
- Наумов М.В. (1996) Основные закономерности постимпактного гидротермального процесса. *Астроном. вестник*, 30(1), 25-32.

- Наумов М.В., Ляхницкая В.Д., Яковлева О.А. (2004) Сульфидная минерализация в Попигайской импактной структуре. *Докл АН*, **399**(5), 665-670.
- Рафаилович М.С., Мизерная М.А., Дьячков Б.А. (2011) Крупные месторождения золота в черносланцевых толщах: условия формирования, признаки сходства. Алматы, Luxe media Group, 272 с.
- Сазонов В.Н., Коротеев В.А., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Великанов А.Я. (2011) Золото в "черных сланцах" Урала. *Литосфера*, (4), 70-92.
- Сергиенко Е.С., Целмович В.А., Попов В.В., Цибульская А.Е., Драбкина Е.А., Петров И.Н. (2010) Микроструктура, состав и магнитные свойства зювитов Карской астроблемы. "Палеомагнетизм и магнетизм горных пород". Мат-лы Международного семинара. СПб., 227-233.
- Удоротин В.В., Конанова Н.В., Попов И.В. (2010) Глубинное строение Карской кольцевой структуры. *Изв. Коми НЦ УрО РАН*, **4**(4), 47-52.
- Ханчук А.И., Плюснина Л.П., Молчанов В.П., Медведев Е.И. (2010) Графитизированные комплексы северной части Ханкайского террейна – новый тип комплексных благороднометаллических месторождений. *Вестн. ОНЗ РАН*, **2**(NZ11003), 1-13.
- 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. (2012) Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Южно-Карская. Лист R-41 – Амдерма. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 383 с.
- Шумилова Т.Г. (2003) Минералогия самородного углерода. Екатеринбург: УрО РАН, 318 с.
- Юдович Я.Э., Беляев А.А., Кетрис М.П. (1998а) Геохимия и рудогенез черносланцевых формаций Пай-Хоя. СПб.: Наука, 366 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (1994) Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ Наука, 304 с.
- Юдович Я.Э., Шишкин М.А., Лютиков Н.В., Кетрис М.П., Беляев А.А. (1998б) Геохимия и рудогенез черных сланцев Лемвинской зоны Севера Урала. Сыктывкар: Пролог, 340 с.
- Юдович Я.Э., Шулепова А.Н. (1992) Рудоносные импактиты на р. Каре. *Народн. хоз-во Респ. Коми*, (2), 357-363.
- Abramov O., Kring D.A. (2004) Numerical Modeling of an Impact-Induced Hydrothermal System at the Sudbury Crater. *J. Geophys. Res. (Planets)*, **109**, 10007-10023.
- Ames D.E., Watkinson D.H., Parrish R.R. (1998) Dating of a regional hydrothermal system induced by the 1850 Ma Sudbury impact event. *Geology*, **26**, 447-450.
- Chang Z., Large R.R., Maslennikov V.V. (2008) Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source. *Geology*, **36**(12), 971-974.
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokofiev V.Yu., Lishnevskii E.N. (2004) Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Rev.*, **24**, 7-44.
- Koeberl C. (2014) The geochemistry and cosmochemistry of impacts. Holland H.D. and Turekian K.K. (Eds). *Treatise on Geochemistry, Second Edition*, **2**, 73-118. Oxford: Elsevier.
- Melosh H.J. (1989). Impact Cratering: A Geologic Process. Oxford University Press, N. Y., 245 p.
- Muttik N., Kirsimäe K., Vennemann T.W. (2010) Stable isotope composition of smectite in suevites at the Ries crater, Germany: Implications for hydrous alteration of impactites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **299**, 190-195.
- Osinski G.R. (2005) Hydrothermal activity associated with the Ries impact event, Germany. *Geofluids*, **5**(3), 202-220.
- Osinski G.R., Tornabene L.L., Banerjee N.R., Cockell C.S., Flemming R. et al. (2012) Impact-generated hydrothermal systems on Earth and Mars. *Icarus*, **224**, 347-363.
- Reimold W.U., Koeberl C. (2014) Impact structures in Africa: A Review. *J. African Earth Sci.*, **93**, 57-175.
- Stoffler D., Hamann C., Metzler K. (2017) Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. Invited Review. *Meteor. Planet. Sci.*, 1-45.
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the Oceanic Basins. Geol. Soc. Spec. Publ.*, **42**, 313-345.
- Velasco-Villareal M., Urrutia-Fucugauchi J., Rebolledo-Vieyra M., Perez-Cruz L. (2011) Paleomagnetism of impact breccias from the Chicxulub crater – Implications for ejecta emplacement and hydrothermal processes. *Phys. Earth Planet. Inter.*, **186**, 154-171.
- Wang J., Liu J., Peng R., Liu Z., Zhao B., Li Z., Wang Y., Liu C. (2014) Gold mineralization in Proterozoic black shales: Example from the Haoyaoerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton. *Ore Geol. Rev.*, **63**, 150-159.
- Wopenka B., Pasteris J.D. (1993) Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: Applicability of Raman microprobe spectroscopy. *Am. Mineral.*, **78**, 533-557.

## REFERENCES



- ralization in apokarbonate metasomatites in the Tunkinsk fault zone, East Sayan. *Rudy i Metally*, (2), 5-19. (In Russian)
- Distler V.V., Yudovskaya M.A., Mitrofanov G.L., Prokof'ev V.Yu., Lishnevskii E.N. (2004) Geology, composition, and genesis of the Sukhoi Log noble metals deposit, Russia. *Ore Geol. Rev.*, **24**, 7-44.
- Dubinina E.O., Chugaev A.V., Ikonnikova T.A., Avdeenko A.S., Yakushev A.I. (2014) Sources and fluid regime of quartz-carbonate veins at the Sukhoi Log gold deposit, Baikal-Patom Highland. *Petrology*, **22**(4), 329-358. (translated from *Petrologiya*, **22**(4), 347-379).
- Galimov E.M. (1968) *Geokhimiya stabil'nykh izotopov ugleroda* [Geochemistry of stable carbon isotopes]. Moscow, Nedra Publ., 226 p. (In Russian)
- Impaktnyye krateri na rubezhe mezozoya i kainozoya* [Impact craters at the turn of the Mesozoic and Cenozoic] (Ed. V.L. Masaitis). (1990) Leningrad, Nauka Publ., 185 p. (In Russian)
- Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinova E.L. (1974) *Termicheskii analiz mineralov i gornykh porod* [Thermal analysis of minerals and rocks]. Leningrad, Nedra Publ., 399 p. (In Russian)
- Karpuzov A.F., Karpunin A.M., Sobolev N.N., Mozoleva I.N., Karpuzov A.A. (2008) The mineral resource potential of black shale formations of the Russian fold belts. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i Upravlenie*, (5), 2-15. (In Russian)
- Karpuzov A.F., Karpuzov A.A. (2005) Large-volume gold-ore deposits in carbonaceous formations as a practicable basis for expansion of the gold resource base of Russia. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i Upravlenie*, (3), 12-18. (In Russian)
- Khanchuk A.I., Plyusnina L.P., Molchanov V.P., Medvedev E.I. (2010) Graphitized rocks of north part of the Khanka terrane as a new type of complex noble metals deposits. *Vestnik ONZ RAN*, **2**(NZ11003), 1-13. (In Russian)
- Koeberl C. (2014) The geochemistry and cosmochemistry of impacts. Holland H.D. and Turekian K.K. (Eds). *Treatise on Geochemistry, Second Edition*, **2**, 73-118. Oxford, Elsevier.
- Koval'chuk N.S., Shumilova T.G. (2017a) Geochemical specificity of black shale in the zone of the Kara Impact Event (Pai-Khoi). "*Geodinamika, veshchestvo, rudogenez Vostochno-Evropeiskoi platformy i ee skladchatogo obramleniya*". Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem [Geodynamics, substance, ore genesis of the East European platform and its folded framing. Materials All-Russian scientific conference with international participation]. Syktyvkar, Geoprint Publ., 260-261. (In Russian)
- Koval'chuk N.S., Shumilova T.G. (2017b) Black shales of the environment of the Kara Astrobleme (Pai-Khoi). *Materialy Yubileynogo s"ezda Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva "200 let RMO"* [Materials of the anniversary Congress of the Russian Mineralogical Society "200th years of RMS"]. St.Petersburg, LEMA Publ., 236-238. (In Russian)
- Kozyreva I.V. (1996) *Geokhimiya redkikh i redkozemel'nykh elementov v chernoslantsevykh formatsiyakh Severa Urala i Pai-Khoya*. Avtoref. Dis. ... cand. geol.-min. nauk [Geochemistry of rare and rare earth elements in black shale formations of the North of the Urals and Pai-Khoi. Cand. geol. and min. sci. diss.]. Syktyvkar, 22 p. (In Russian)
- Letnikov F.A., Savel'eva V.B., Anikina Yu.V., Smagunova M.M. (1996) High carbon tectonites as a new type of concentration of gold and platinum. *Dokl. Akad. Nauk*, **347**(6), 795-798. (In Russian)
- Marchenko L.G. (2012) *Genezis i mineral'nye assotsiatsii zolota i platinoidov v mestorozhdeniyakh "chernoslantsevogo" tipa Kazakhstana*. Avtoref. dokt. dis. ... geol.-min. nauk [Genesis and mineral associations of gold and platinoids in deposits of "black shale" type of Kazakhstan. Dr. geol. and min. sci. diss.]. St.Petersburg, 53 p. (In Russian)
- Masaitis V.L., Danilin A.N., Mashchak M.S., Raikhlin A.I., Selivanovskaya T.V., Shadenkov E.M. (1980) *Geologiya astroblem* [The geology of astroblems]. Leningrad, Nedra Publ., 231 p. (In Russian)
- Masaitis V.L., Mashchak M.S., Naumov M.V., Raikhlin A.I. (1994) *Gigantskiye astroblemy Rossii* [Giant astroblems of Russia]. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 32 p. (In Russian)
- Masaitis V.L., Mashchak M.S., Raikhlin A.I., Selivanovskaya T.V. (1998) *Almazonosnye impaktity Popigaiskoi astroblemy* [Diamondiferous impactites of the Popigay astrobleme]. St.Petersburg, VSEGEI Publ., 178 p. (In Russian)
- Masaitis V.L., Naumov M.V. (1993) *Printsipial'naya model' gidrotermal'noi tsirkulyatsii v impaktnykh kraterakh* [The principal model of hydrothermal circulation in impact craters]. *Dokl. Akad. Nauk*, **333**(1), 70-72. (In Russian)
- Melosh H.J. (1989) Impact Cratering: A Geologic Process. Oxford University Press, N. Y., 245 p.
- Muttik N., Kirsimäe K., Vennemann T.W. (2010) Stable isotope composition of smectite in suevites at the Ries crater, Germany: Implications for hydrous alteration of impactites. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **299**, 190-195.
- Naumov M.V. (1996) Main regularities of the post-impacted hydrothermal process. *Astronomicheskii vestnik*, **30**(1), 25-32. (In Russian)
- Naumov M.V., Lyakhnitskaya V.D., Yakovleva O.A. (2004) Sulfide mineralization in the Popigay impact structure. *Dokl. Earth Sci.*, **399**(9), 1283-1288 (translated from *Dok. Akad. Nauk*, **399**(5), 665-670).
- Osinski G.R. (2005) Hydrothermal activity associated with the Ries impact event, Germany. *Geofluids*, **5**(3), 202-220.
- Osinski G.R., Tornabene L.L., Banerjee N.R., Cockell C.S., Flemming R. et al. (2012) Impact-generated hydrothermal systems on Earth and Mars. *Icarus*, **224**, 347-363.
- Rafailovich M.S., Mizernaya M.A., D'yachkov B.A. (2011) *Krupnye mestorozhdeniya zolota v chernoslantsevykh tolshchakh: usloviya formirovaniya, priznaki skhodstva* [Large gold deposits in black shale strata: formation conditions, signs of similarity]. Almaty Luxe media Grup Publ., 272 p. (In Russian)
- Reimold W.U., Koeberl C. (2014) Impact structures in Africa: A Review. *J. African Earth Sci.*, **93**, 57-175.
- Sazonov V.N., Koroteev V.A., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Velikanov A.Ya. (2011) Gold in the Black Shale of the Urals. *Litosfera*, (4), 70-92. (In Russian)
- Sergienko E.S., Tsel'movich V.A., Popov V.V., Tsubul'skaya A.E., Drabkina E.A., Petrov I.N. (2010) Microstructure, composition and magnetic properties of the

- zuvit Kara astrobleme. "Paleomagnetizm i magnetizm gornyykh porod". Mat-ly Mezhdunarodnogo seminar [Paleomagnetism and magnetism of rocks. Materials of the International Seminar]. St.Petersburg, 227-233. (In Russian)
- Shishkin M.A., Shkarubo S.I., Molchanova E.V., Markina N.V., Molchanova E.V., Vanshtein B.G., Zinchenko A.G., Zuikova O.N., Kalaus 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. (2012) *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoi Federatsii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokoleniye). Seriya Yuzhno-Karskaya. List R-41 – Amderma. Ob'yasnitel'naya zapiska* [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1 000 000 (third generation). Series South Kara. Sheet R-41, Amderma. Explanatory letter]. St.Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 383 p. (In Russian)
- Shumilova T.G. (2003) *Mineralogiya samorodnogo ugljoda* [Mineralogy of native carbon]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 318 p. (In Russian)
- Stoffler D., Hamann C., Metzler K. (2017). Shock metamorphism of planetary silicate rocks and sediments: Proposal for an updated classification system. Invited Review. *Meteor. Planet. Sci.*, 1-45.
- Sun S.S., McDonough W.F. (1989) Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Magmatism in the Oceanic Basins. *Geol. Soc. Spec.*, **42**, 313-345.
- Udoratin V.V., Konanova N.V., Popov I.V. (2010) Deep structure of the Kara ring structure. *Izvestiya Komi nauchnogo tsentra UrO RAN*, **4**(4), 47-52. (In Russian)
- Velasco-Villareal M., Urrutia-Fucugauchi J., Rebolledo-Vieyra M., Perez-Cruz L. (2011) Paleomagnetism of impact breccias from the Chicxulub crater – Implications for ejecta emplacement and hydrothermal processes. *Phys. Earth Planet. Interiors*, **186**, 154-171.
- Vishnevskiy S.A. (2007) *Astroblemy* [Astroblems]. Novosibirsk, Nonparel' Publ., 288 p. (In Russian)
- Vud B.L., Popov N.P. (2006) *Gigantskoe mestorozhdenie zolota. Sukhoi Log (Sibir')* [The giant Sukhoi Log gold deposit (Siberia)]. *Geol. Geofiz.*, **47**(3), 315-341. (In Russian)
- Wang J., Liu J., Peng R., Liu Z., Zhao B., Li Z., Wang Y., Liu C. (2014) Gold mineralization in Proterozoic black shales: Example from the Haoyaoerhudong gold deposit, northern margin of the North China Craton. *Ore Geol. Rev.*, **63**, 150-159.
- Wopenka B., Pasteris J.D. (1993) Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: Applicability of Raman microprobe spectroscopy. *Amer. Miner.*, **78**, 533-557.
- Yudovich Ya.E., Belyaev A.A., Ketris M.P. (1998a) *Geokhimiya i rudogenez chernoslantsevykh formatsii Pai-Khoya* [Geochemistry and ore genesis of black-shale formations in Pai-Khoy]. St.Petersburg, Nauka Publ., 366 p. (In Russian)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (1994) *Elementy-primesi v chernykh slantsakh* [Impurity elements in black shales]. Yekaterinburg, UIF Nauka Publ., 304 p. (In Russian)
- Yudovich Ya.E., Shishkin M.A., Lyutikov N.V., Ketris M.P., Belyaev A.A. (1998b) *Geokhimiya i rudogenez chernykh slantsev Lemvinskoi zony Severa Urala* [Geochemistry and ore genesis of the black shales of the Lemva zone of the North in the Urals]. Syktyvkar, Prolog Publ., 340 p. (In Russian)
- Yudovich Ya.E., Shulepova A.N. (1992) Ore impactites on the Kara river. *Narodn. khoz-vo Resp. Komi*, (2), 357-363. (In Russian)
- Zhmodik S.M., Mironov A.G., Zhmodik A.S. (2008) *Zoloto-kontsentriruyushchie sistemy ofiolitovykh poyasov (na primere Sayano-Baikalo-Muiskogo poyasa)* [Gold-concentrating systems of ophiolite belts (by the example of the Sayan-Baikal-Muya belt)]. Novosibirsk, Geo Publ., 304 p. (In Russian)