

УДК 552.08:553.08:550.42

DOI: 10.35597/2313-545X-2020-6-4-5

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЧЕРНЫХ СЛАНЦЕВ
ОКРУЖЕНИЯ ЯЙЮСКОГО МАГМАТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА
(ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ)****Н.С. Ковальчук¹, Т.Г. Шумилова¹, С.А. Светов²**¹ *Институт геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, ул. Первомайская 54,
г. Сыктывкар, 167982 Россия; kovalchuk@geo.komisc.ru*² *Институт геологии КарНЦ УрО РАН, ул. Пушкинская 11, г. Петрозаводск, 185910 Россия***MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL FEATURES OF BLACK SHALES
FROM THE FRAME OF THE YAYU IGNEOUS COMPLEX, POLAR URALS****N.S. Kovalchuk¹, T.G. Shumilova¹, S.A. Svetov²**¹ *Institute of Geology, FRC Komi SC UB RAS, ul. Pervomayskaya 54, Syktyvkar, 167982 Russia;
kovalchuk@geo.komisc.ru*² *Institute of geology KarSC UB RAS, ul. Pushkinskaya 11, Petrozavodsk, 185910 Russia*

Аннотация. В статье приводятся результаты исследований минералогических и геохимических особенностей черных сланцев окружения Яйюского магматического комплекса (Полярный Урал) с применением современных методов исследований для выявления возможной мобилизации, переотложения и концентрирования рудного вещества в условиях интенсивной гидротермальной переработки. Выявлены надкларковые содержания Li, Be, Ba, Ti, Mn, Zr, Rb, Sc, Cs, P, Nb, Ta, Th и РЗЭ. Диагностированы редкометалльные и редкоземельные минералы, установлены собственная форма нахождения серебра – Ag₂Te (предположительно, гессит) и присутствие россыпного золота в аллювии. Определены металлогенические особенности углеродистых отложений, претерпевших гидротермальные процессы в зоне контакта с магматическими породами. Делается вывод о возможном обнаружении коренного золота в связи с гидротермальными изменениями черных сланцев района.

Ключевые слова: Полярный Урал, Яйюский магматический комплекс, черные сланцы, редкоземельная минерализация.

Abstract. The results of study of mineralogical-geochemical features of black shales from the frame of the Yayu igneous complex (Polar Urals) are presented on the basis of modern analytical methods in order to identify possible mobilization, redeposition and concentration of ore material during intensive hydrothermal alteration. The high contents of Li, Be, Ba, Ti, Mn, Zr, Rb, Sc, Cs, P, Nb, Ta, Th, and REE are revealed. Rare metal and rare-earth minerals and a silver mineral (most likely, hessite) are found, the presence of alluvial gold in alluvium is established. The metallogenic features of carbonaceous sedimentary rocks affected by hydrothermal processes at the contact zone with igneous rocks are determined. The conclusion is made on a possible finding of primary gold related to hydrothermal mineralisation in black shale of the region.

Key words: Polar Urals, Yayusky magmatic complex, black shales, rare-earth mineralization.

Введение

Черные сланцы, благодаря своей уникальной металлоносности, в ряде случаев представляют большой практический интерес. Золото и благород-

ные металлы концентрируются в черных сланцах в небольших количествах – от десятых долей до первых единиц, реже первых десятков грамм на тонну. Но благодаря исключительно широкому развитию

черносланцевых толщ в геологических разрезах Земли, высокоуглеродистые образования представляют собой один из новых нетрадиционных источников прироста ресурсов и запасов XXI столетия.

Эталонными объектами золоторудных месторождений сухоложского типа являются Мурунтау, Сухой Лог, Кумтор и другие месторождения (Гурская, 2000). Для месторождений данного типа характерна длительная история формирования, в которой по-разному оценивается вклад седиментогенных, метаморфогенных и плутоногенных гидротермальных процессов в формировании руд (Буряк, 1982; Иванов, 1984; Large et al., 2008). Однако для образования крупных золоторудных месторождений черносланцевого типа благоприятным условием является наложение на черные сланцы гидротермальной минерализации за счет близко расположенных гранитоидов (непосредственно в рудных полях или под ними) (Гурская, 2000; Шишкин, 2003; Вихтер, 2011; Сазонов и др., 2011; Петров, 2014; Кряжев, 2017).

В результате проведенных предварительных исследований углеродсодержащих пород в метаморфических комплексах Северо-Уральского региона ранее были установлены аномально высокие концентрации золота и редкоземельная минерализация (Шумилова и др., 2016). В отчете Воркутинской ГСП за 2001–2005 гг. «Геологическое доизучение масштаба 1 : 200 000 листов Q-41-V, VI, XI (Воркутинский район)» обобщены геологические материалы по Полярному Уралу, рассмотрено геологическое строение территории, выделены стратифицированные образования и интрузивные комплексы (Попов и др., 2005). Проведено минерогеническое районирование территории Полярного Урала и сделан прогноз на выявление крупных месторождений золота, минералов платиновой группы, молибдена, железа, хрома, в том числе благородно-редкометалльной минерализации в черных сланцах. В связи с этим перспективным является исследование черносланцевых толщ в районе выходов магматических пород Яйюского комплекса, представляющего собой многофазную интрузию, прорывающую черные сланцы на р. Яйю.

В данной работе приводятся результаты исследований минералогических и геохимических особенностей черных сланцев окружения Яйюского магматического комплекса (Полярный Урал) с применением комплекса современных методов исследований, оценивается возможность мобилизации, переотложения и концентрирования рудного

вещества в ходе гидротермальных преобразований углеродсодержащих пород.

Объект и методы исследования

В результате экспедиционных работ 2018 г. подробно описаны и опробованы разрезы коренных выходов черных сланцев грубеинской (O_1gr) и няньворгинской свит (D_3-C_1nv) в зоне контакта с магматическими породами Яйюского комплекса ($v, \delta, \gamma, \rho, C_3-Pj$) в верхнем течении р. Яйю и ее притоках (Полярный Урал). Опробование толщ проводилось по профилю: от приконтактовой зоны с магматическими породами до незатронутых преобразованиями черных сланцев (рис. 1). Методом шлихового анализа опробованы аллювиальные отложения в верхнем течении рек Яйю и Елец и их притоках на выявление благороднометалльной минерализации.

Аналитические исследования проведены в ЦКП «Геонаука» Института геологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (г. Сыктывкар). Структурно-текстурные особенности пород изучены с помощью поляризационного микроскопа POLAM R-312 (LOMO). Содержание основных оксидов в породе определено силикатным анализом на 14 компонентов (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, подготовленных стандартным способом с углеродным напылением. Изображения получены в режиме обратно-рассеянных электронов (BSE) при ускоряющем напряжении 20 кВ. Используемая модификация оборудования содержания СО и ОН групп не определяет. Калибровка прибора осуществлялась по заводским эталонам.

Фазовая диагностика углеродного вещества проводилась с использованием спектроскопии комбинационного рассеяния света на рамановском спектрометре LabRam HR800 (Horiba Jobin Yvon). Условия регистрации спектров: Ar^+ 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 $100-4000\text{ см}^{-1}$. Регистрация спектров производилась при комнатной температуре (аналитик С.И. Исаенко).

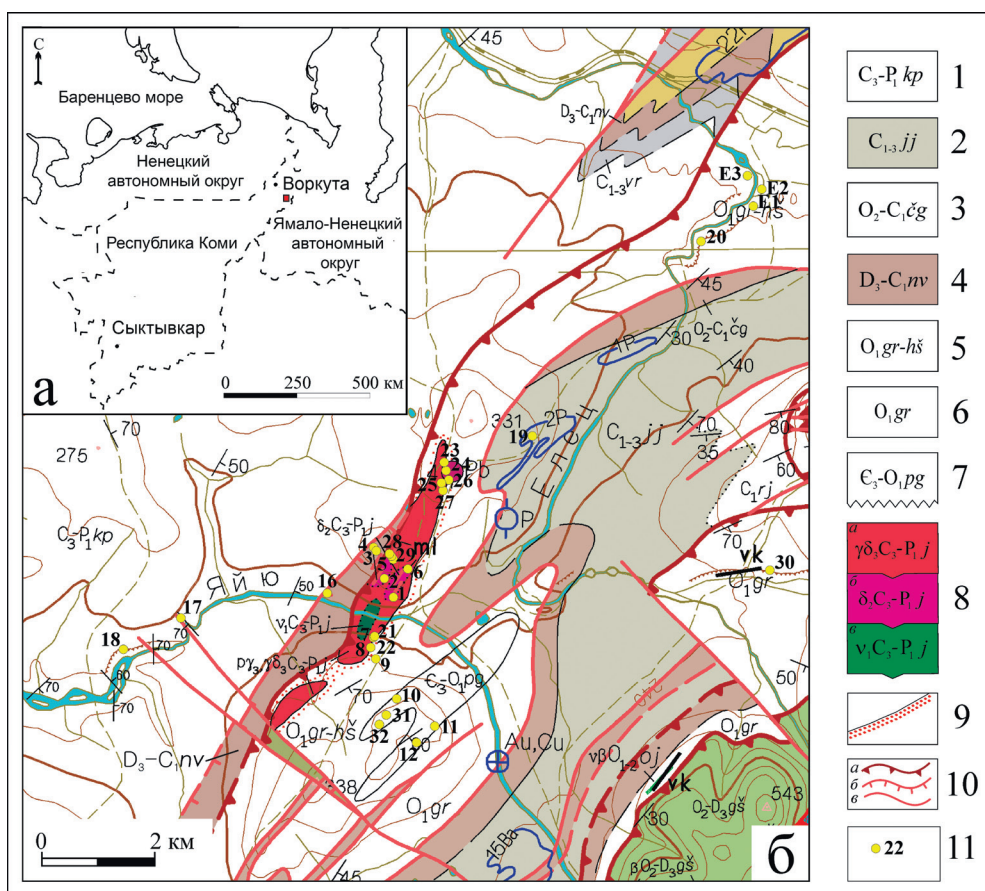


Рис. 1. Схема расположения района работ:

а – местоположение участка работ на административно-территориальной карте; б – фрагмент Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1:200 000 (Попов и др., 2005) с дополнениями.

1 – кечпельская свита: темно-серые глинистые сланцы, полимиктовые алевролиты и песчаники; 2 – яйюская свита: черные аргиллиты, алевролиты, глинисто-кремнистые и углеродисто-кремнистые сланцы, известковистые песчаники и алевролиты; 3 – черногорская серия: кремнистые сланцы, полосчатые силициты и фтаниты с прослоями углеродисто-кремнисто-глинистых сланцев и линзами черных кварцевых песчаников; 4 – няньворгинская свита: черные, зеленоватые, голубоватые радиолариевые фтаниты, ленточные силициты, фтанитоиды, яшмоиды, кремнисто-глинистые сланцы, в верхней части с прослоями известняков с кремнистыми стяжениями; 5 – нерасчлененные грубейнская свита и харбешорская подсвита: зеленые алевролиты и песчаники, лиловые алевролиты и филлитовидные сланцы; 6 – грубейнская свита: лиловые, зеленые алевролиты и филлитовидные сланцы; 7 – погурейская свита: полимиктовые, вулканомиктовые конгломераты, песчаники, алевросланцы с линзочками серых известняков; 8 – плутонический габбродиорит-гранодиоритовый Яйюский комплекс: а – третья фаза: гранодиориты, плагиограниты; б – вторая фаза: диориты; в – первая фаза: кварцсодержащее габбро; 9 – контактовые роговики; 10 – разломы и надвиги: а – шарьяжи; б – надвиги и взбросонадвиги; в – разломы; 11 – точки отбора образцов.

Fig. 1. Schematic map of the working area:

а – location of the work site on an administrative-territorial map; б – fragment of State Geological Map of the Russian Federation on a scale of 1:200 000, modified after (Popov et al., 2005).

1 – Kechpel Formation: dark gray clayey shale, polymictic siltstone and sandstone; 2 – Yayu Formation: black claystone, siltstone, clayey-siliceous and carbonaceous-siliceous shale, calcareous sandstone and siltstone; 3 – Chernaya Gora Group: siliceous shale, banded silicite and phthanite with interlayers of carbonaceous-siliceous shale and lenses of black quartz sandstone; 4 – Nyanvorgayu Formation: black, greenish and bluish radiolaria phthanite, ribbon-like silicite, phthanitoid, jasperoid and siliceous shale with interlayers of limestone and siliceous nodules in the upper part; 5 – unspecified Grubeyu Formation and Kharbeshor Subformation: green siltstone and sandstone, lilac siltstone and phyllite shale; 6 – Grubeyu Formation: lilac and green siltstone and phyllite shale; 7 – Pogurey Formation: polymictic and volcanomictic conglomerate, sandstone and siltstone with lenses of gray limestone; 8 – Yayu plutonic gabbrodiorite-granodiorite complex: а – third phase: granodiorite, plagiogranite; б – second phase: diorite; в – first phase: quartz-bearing gabbro; 9 – contact hornfels; 10 – faults and thrusts: а – overthrusts; б – thrusts and reverse thrusts; в – faults; 11 – sampling points.

Изотопный состав углерода проанализирован методом проточной масс-спектрометрии в режиме постоянного потока гелия (CF-IRMS) на аналитическом комплексе, включающем в себя элементный анализатор Flash EA 1112, в котором образцы сжигаются при 1020 °C, соединенный через газовый коммутатор ConFlo IV с масс-спектрометром Delta V Advantage, Thermo Fisher Scientific (аналитик И.В. Смолева). Для измерений использовался CO₂, международный стандарт USGS-40 (L-Glutamic acid) и лабораторный стандарт Acetanilide (C₈H₉NO). Значения $\delta^{13}\text{C}$ даны в промилле относительно стандарта PDB. Ошибка измерения составляет $\pm 0.15\text{ ‰}$ (1 σ).

Термические исследования черных сланцев проводились на дериватографе Shimadzu DTG-60H (аналитик Е.М. Тропников). Образец нагревался в платиновых тиглях при атмосферном давлении до 1000 °C со скоростью 10 °C/с; погрешность измерения массы $\pm 1\text{ ‰}$. Содержание органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в породе определялось на экспресс-анализаторе на углерод АН-7529 при предварительном получении нерастворимого в концентрированной соляной кислоте остатке породы. В качестве стандарта использовалась глюкоза и малоуглеродистая сталь. Данные по $C_{\text{орг}}$, полученные при анализе, пересчитывались на исходную породу (аналитик С.А. Забоева).

Содержание микроэлементов в черных сланцах определено методом ИСП-МС (масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой) на спектрометре ICP-MS X Series 2+UP-266 маско (ЦКП, ИГ КарНЦ РАН, г. Петрозаводск, аналитик А.С. Парамонов, по методике (Светов и др., 2015)). Разложение образцов растертой породы проводилось путем кислотного вскрытия в открытой системе. Для анализа использовались навески образцов массой 0.1 г. Содержания Au и Ag в породе определены методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии с применением химического и пробирного концентрирования на спектрофотометрах с пламенной и электротермической атомизацией вещества Shimadzu AA-6800 в комплекте с приставкой HVG-1 (на Te, Se, As, Sb, Hg) и Thermo Electron SolAAR M6, а также Hitachi 180-50 (Аналитический центр Дальневосточного геологического института ДВО РАН, г. Владивосток, аналитики О.Ф. Гурфинк, С.Ф. Васюкевич, Л.В. Симоконь, Г.С. Ягорлицкая).

Краткая геологическая характеристика

Яйюский магматический комплекс ($v, \delta, \gamma \delta, p\gamma C_3 - Pj$) представлен серией тел от габбро до гранодиоритов и плагиогранитов, отражающих три фазы внедрения (Попов и др., 2005). Ширина выхода комплекса на поверхность составляет 600–700 м, длина по простиранию достигает 2.5 км. Западный контакт интрузии тектонический, совпадает с линией Верхнехаротского надвига. Зона экзоконтакта с няньворгинской свитой ($D_3 - C_1 nv$) имеет мощность до 10 м. Породы няньворгинской свиты в изученном районе представлены черными плитчатыми фтанитами, переслаивающимися с глинисто-кремнистыми черными сланцами. На контакте наблюдается окварцевание глинисто-кремнистых сланцев, развитие плотных прослоев силицитов (темно-серого до черного цвета) и многочисленных кварцевых прожилков и жил мощностью до 1 м. Изменения интрузивных пород в эндоконтактной зоне выражаются в обильной мусковитизации, породы приобретают плейчатую структуру, в кварцевых жилах наблюдаются ксенолиты вмещающих пород.

Породы грубеинской свиты (O_{gr}) представлены алевролитами, алевритистыми глинистыми сланцами, пестроцветными филлитовыми сланцами и алевропесчаниками. В восточном и южном секторах отложения характеризуются горячим контактом с прорывающей интрузией. Мощность экзоконтакта составляет 50–70 м, где отчетливо проявляется ороговикование, окварцевание и ожелезнение пород грубеинской свиты, породы становятся более темными и плотными. Многочисленные кварцевые жилы сопровождаются развитием обильной сульфидной минерализации (Попов и др., 2005).

Петрохимия и геохимия черных сланцев

В районе Яйюского магматического комплекса кремнисто-глинистые сланцы по литохимической классификации (Юдович, Кетрис, 2000) соответствуют силитам и сиаллитам. В целом их химический состав характеризуется повышенными содержаниями MgO (0.33–5.17 мас. %), Na₂O (0.07–3.95 мас. %) и TiO₂ (0.03–1.26 мас. %) (табл. 1). Алевросланцы грубеинской свиты в зоне экзоконтакта имеют повышенные содержания Al₂O₃ (10.51–18.23 мас. %), Na₂O (1.46–3.37 мас. %), MgO

Таблица 1

Петрохимический состав черных сланцев окружения Яйюского комплекса, мас. %

Table 1

Petrochemical composition of black shales around the Yayu complex, wt. %

№ п/п	Номер обр.	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	П.п.п.	Сумма
1	20/38	64.92	1.04	15.92	2.03	4.46	0.11	2.64	1.02	3.22	1.73	0.18	2.80	100.07
2	20/39	89.72	0.22	3.73	0.25	0.10	—	0.57	—	1.02	0.43	0.02	4.33	100.39
3	20/40а	82.33	0.37	7.92	1.61	2.19	0.18	1.34	0.10	0.65	1.58	0.07	2.02	100.36
4	20/41	86.04	0.30	6.30	0.01	0.25	—	0.57	0.10	1.75	0.82	0.02	4.06	100.22
5	20/42	68.63	0.87	17.02	0.31	0.20	—	1.88	0.10	3.95	2.49	0.02	5.21	100.68
6	20/43	61.23	0.65	11.77	2.25	0.34	—	1.88	3.53	0.28	3.70	3.06	11.64	100.33
7	20/46	43.86	0.26	5.09	1.58	0.36	0.11	3.18	21.47	2.02	0.35	0.08	20.12	98.48
8	20/48	73.13	0.33	5.99	1.21	0.46	—	0.90	5.01	0.11	1.79	4.32	6.94	100.19
9	20/49	40.45	0.41	7.41	1.14	3.56	0.12	5.17	20.38	1.07	0.49	0.12	19.35	99.67
10	22/59	76.41	0.73	10.51	0.77	2.49	0.05	1.21	1.81	3.32	0.69	0.22	1.85	100.06
11	22/60	68.41	0.91	13.66	1.33	4.13	0.07	2.18	1.24	3.37	1.20	0.21	1.94	98.65
12	26/86	62.34	0.77	15.37	1.46	4.59	0.09	2.97	1.85	3.01	2.61	0.21	3.43	98.70
13	26/89	58.22	0.99	17.85	1.66	5.49	0.14	3.58	1.17	2.53	3.71	0.18	3.66	99.18
14	26/91	58.52	1.07	18.23	2.08	5.38	0.09	3.16	0.96	1.46	3.63	0.17	3.84	98.59
15	27/92	66.48	0.85	14.97	1.32	5.21	0.07	2.63	0.74	2.20	2.28	0.16	3.12	100.03
16	4/94а	90.10	0.19	5.41	0.33	0.36	0.01	0.74	0.23	0.15	1.61	0.06	1.34	100.53
17	4/94б	78.53	0.35	9.38	1.60	3.35	0.01	1.61	0.17	0.16	2.25	0.10	2.63	100.14
18	4/95б	90.38	0.20	4.76	0.47	0.48	—	0.90	—	0.11	1.42	0.06	1.22	99.99
19	4/102	79.13	0.39	10.53	0.65	1.81	0.01	1.73	0.11	0.16	2.88	0.07	2.86	100.33
20	4/104	97.07	0.03	0.97	0.09	0.30	0.01	0.37	0.11	0.07	0.14	0.02	0.61	99.79
21	4/105	96.99	0.04	1.33	0.01	0.31	0.01	0.33	0.06	0.07	0.26	0.02	0.90	100.31
22	4/106	79.83	0.37	10.56	0.78	1.14	0.01	1.57	—	0.18	2.81	0.08	2.90	100.23

Примечание. 1–9 – черные сланцы и фтаниты (2, 4) грубеинской свиты и харбешорской подсвиты, р. Елец; 10–15 – алевросланцы и филлитовидные сланцы (14) грубеинской свиты в зоне экзоконтакта; 16–22 – глинисто-кремнистые сланцы, фтаниты (17), силициты (20, 21) няньворгинской свиты. Прочерк – не обнаружено (для всех таблиц).

Note. 1–9 – black shales and phthanites (2, 4) of Grubeyu Formation and Kharbeshor Subformation, Elets River; 10–15 – silty shales and phyllite shales (14) of Grubeyu Formation at the contact zone; 16–22 – clayey-siliceous shales, phthanites (17), silicites (20, 21) of the Nyanvorgay Formation. Dash – not detected (for all tables).

(1.21–3.58 мас. %), K₂O (0.69–3.71 мас. %), TiO₂ (0.73–1.07 мас. %) и, соответственно, повышенные гидролизатный (в среднем 0.35), титановый (в среднем 0.06) и железный (в среднем 0.38) модули, характеризующие породы как мелководно-прибрежные нормально-железистые кремнисто-глинистые сланцы с преимущественно терригенным источником сноса.

Черносланцевые толщи в районе Яйюского магматического комплекса по данным ИСП-МС относительно кларковых содержаний элементов в черных сланцах (Юдович, Кетрис, 1994) обогащены литофильными элементами: Li, Be, Ba, Ti, Mn, Zr, Rb, Sc, Cs, P, Nb, Ta, Th и PЗЭ. Содержания редких и редкоземельных элементов в сланцах в зоне экзоконтакта и на удалении от магматического тела существенно отличаются (табл. 2), поэтому мы рассматриваем их геохимическую специфику отдельно.

В алевросланцах экзоконтактовой зоны установлен надкларковый уровень для следующих элементов (здесь и далее в абзаце приведены наибольшие содержания, г/т): Ti 6742, Mn 1238, Ba 870, Zr 199, Rb 173, Cr 101, Li 60.67, Co 23.27, Ga 23.26, Sc 23.07, Nb 21.63, Th 14.92, Cs 8.77, Be 3.32, Te 3.20, Eu 1.73, Ta 1.19, ΣPЗЭ 135–233. Кремнисто-глинистые сланцы на границе с тектоническим контактом и на удалении от выходов магматических пород, в основном, имеют околокларковые содержания всех элементов за исключением содержаний Ti (6533 г/т), Ba (1456), V (392 г/т), Zr (163 г/т), Cs (7.36 г/т) и Sb (6.29 г/т), которые имеют надкларковый уровень. При этом значительные вариации отношений La/Yb (7–20), Ce/Lu (90–260) и содержания Y (1–50 г/т), вероятно, связаны со спецификой перераспределения вещества в процессе гидротермальных изменений. Исключение составляют рыхлые черные сланцы, резко отличающиеся повышенными

содержаниями (г/т) Р (18810), Ва (1141), Rb (123), Y (50.25), Be (3.60), U (14.26), Th (10.24), Eu (2.28) и Σ РЗЭ (327). Надкларковые содержания Ti, P, Ba и РЗЭ объясняются присутствием в породах титани-та, рутила, апатита, барита и РЗЭ минералов (монацита, алланита и ксенотима). Распределение РЗЭ в черных сланцах окружения Яйюского магматического комплекса показано на рисунке 2. В целом, характер кривых распределения редкоземельных элементов близок, спектры характеризуются преимущественным накоплением легких РЗЭ при слабом фракционировании тяжелых РЗЭ с заметным Eu минимумом (рис. 2). Алевросланцы грубеинской свиты в зоне экзоконтакта с интрузией и рыхлые черные сланцы грубеинской свиты (р. Елец) относительно кларков черных сланцев отличаются повышенными содержаниями РЗЭ. Среднее содержание Au в черносланцевых толщах составляет 18 мг/т при максимальных концентрациях до 80 мг/т. Содержание Ag не превышает 0.5 г/т, максимальные концентрации – 0.8 г/т.

Минералогия черных сланцев

Углеродистые толщи в окружении Яйюского магматического комплекса представлены пиритизированными кремнисто-глинистыми, углеродисто-известковисто-кремнистыми сланцами и фтанитами с многочисленными кварцевыми жилами и обильной РЗЭ минерализацией. Породы метаморфизованы в условиях, аналогичных относительно низкому уровню регионального метаморфизма, о чем свидетельствует присутствие в породе хлорита. Черные сланцы представлены слоистой породой, состоящей из глинистой и алевропесчаной компонент. Структура основной массы сланцев алевролитовая, пелитоморфная, текстура полосчатая. Содержание органического углерода ($C_{орг.}$) в породе составляет 0.01–6.63 мас. % (в среднем 1 мас. %). Главными породообразующими минералами являются кварц, хлорит, мусковит (серицит), второстепенными – альбит, эпидот и кальцит. Редкоземельные минералы представлены монацитом, алланитом и ксенотимом. В качестве акцессорных минералов диагностированы апатит, циркон, титанит, рутил и барит. В апатите встречены микровключения торита.

Сульфидная минерализация в черных сланцах представлена чаще всего пиритом и халькопиритом, реже пирротинном. *Пирит* ассоциирует с хлоритом и кварцем, реже с эпидотом и апатитом (рис. 3а–в, к).

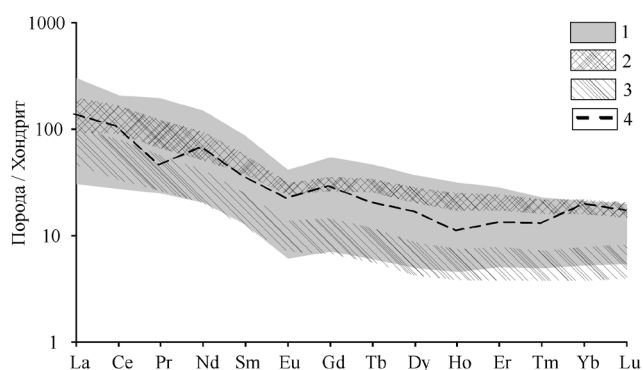


Рис. 2. Распределение РЗЭ в углеродистых породах в районе Яйюского магматического комплекса.

1–3 – поля: 1 – черных сланцев и фтанитов грубеинской свиты и харбешорской подсвиты, р. Елец; 2 – алевросланцев и филлитовидных сланцев грубеинской свиты в зоне экзоконтакта с интрузией; 3 – глинисто-кремнистых сланцев и фтанитов няньворгинской свиты в зоне тектонического контакта; 4 – кларк терригенных черных сланцев по (Юдович, Кетрис, 1994). Концентрации РЗЭ нормализованы к хондриту (McDonough, Sun, 1995).

Fig. 2. REE pattern of carbonaceous rocks near the Yayu igneous complex.

1–3 – fields: 1 – black shale and phthanite of the Grubeyu Formation and Kharbeshor Subformation, Elets River; 2 – silty shale and phyllite shale of the Grubeyu Formation at the contact zone with intrusion; 3 – clayey-siliceous shale and phthanite of the Nyanvorgayu Formation in tectonic contact zone; 4 – average contents of terrigenous black shales after (Yudovich, Ketris, 1994). The chondrite-normalized REE contents are after (McDonough, Sun, 1995).

Пирит образует крупные кубические кристаллы и их сростки, часто лимонитизирован с поверхности, реже встречается в виде фрамбоидов, образующихся предположительно за счет процесса бактериальной сульфат-редукции. Пирит содержит примеси Co (0.30–2.58 мас. %) и Ni (0.22–0.96 мас. %). В пирите диагностированы включения халькопирита, пирротина, галенита и теллурида Ag (предположительно, *гессита* Ag_2Te). В составе теллурида Ag отмечена примесь As – 1.01 мас. %.

Самым распространенным РЗЭ минералом в углеродистых сланцах является монацит, который образует зерна неправильной формы размером 5–20 мкм и уплощенные выделения между углеродисто-слюдистыми прослоями, а также заполняет микрополости в межзерновом пространстве кварца или кальцита (рис. 3д). Монацит тесно ассоциирует с апатитом и углеродистым веществом (УВ). Наиболее представительные химические анализы монацита показаны в таблице 3. Монацит являет-

Таблица 2

Содержание элементов-примесей в черных сланцах окружения Яйюского комплекса, г/т

Table 2

Компо- нент	Trace element content of black shales around the Yayu complex, ppm															
	20/38	20/39	20/41	20/43	20/48	22/59	26/86	26/89	26/91	27/92	4/94a	4/94b	4/95b	4/102	4/106	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Li	49.72	8.02	8.55	40.97	17.09	23.68	32.11	36.63	54.79	60.67	12.24	38.45	10.86	32.62	26.0	
Be	1.68	0.65	0.94	3.60	2.22	1.00	1.47	2.94	2.49	3.32	1.95	1.47	0.87	1.53	1.63	
P	731.7	40.36	38.95	13320.0	18810.0	977.7	965.6	748.0	711.6	674.1	226.6	407.1	229.7	287.9	316.3	
Sc	19.52	5.98	8.24	13.77	8.23	14.16	19.91	20.81	23.07	18.53	8.74	11.72	7.70	12.28	13.21	
Ti	6533.0	971.8	1556.0	3280.0	1629.0	4584.0	4831.0	6049.0	6742.0	5146.0	1162.0	2144.0	1007.0	2378.0	2429.0	
V	116.6	219.5	149.50	286.50	392.40	70.33	123.3	130.8	153.3	116.0	36.64	67.25	28.43	84.07	79.58	
Cr	79.19	34.32	33.49	84.03	80.69	65.02	71.47	95.49	101.5	77.49	24.49	41.77	22.04	49.09	56.72	
Mn	796.2	16.3	15.71	61.65	20.64	456.5	911.20	1238.0	898.0	772.8	47.28	126.0	76.34	111.6	94.27	
Co	19.87	0.75	0.36	2.87	0.97	9.41	14.89	18.04	23.27	19.79	1.53	10.44	1.66	4.08	3.02	
Ni	41.78	17.75	15.60	59.50	46.82	24.36	39.50	45.92	52.35	57.48	16.81	46.95	14.88	28.48	27.96	
Cu	34.28	5.68	4.14	55.42	15.26	20.93	38.35	31.22	29.87	28.65	12.17	40.35	41.32	18.16	24.67	
Zn	90.51	9.57	8.20	75.16	37.65	46.34	61.01	83.54	111.10	114.1	11.33	47.15	11.56	25.60	21.45	
Ga	15.59	4.45	7.62	19.06	7.89	8.73	16.56	23.26	20.50	14.04	6.05	13.21	6.79	15.41	15.75	
As	<PO	5.41	3.78	11.85	6.56	1.17	<по	< по	1.53	<по	< по	<по	< по	2.54	6.37	
Se	<PO	16.93	7.22	13.22	4.88	< по	< по	< по	< по	< по	< по	< по	< по	< по	0.32	
Rb	66.52	10.22	18.35	122.7	61.73	29.62	97.48	154.3	173.4	96.66	64.77	95.13	58.32	109.0	107.4	
Sr	73.55	7.49	11.02	153.1	71.71	104.0	66.12	39.74	38.93	41.29	4.78	8.39	4.03	7.45	6.30	
Y	29.39	7.15	11.11	50.25	23.18	28.02	29.61	34.97	30.05	24.39	6.27	11.34	5.97	< по	9.57	
Zr	163.4	28.14	112.2	115.8	14.55	132.4	34.67	47.58	199.2	130.9	32.34	56.87	28.65	64.79	64.94	
Nb	14.69	1.82	3.06	10.95	5.53	11.67	17.68	21.63	15.90	13.74	4.25	7.87	3.79	8.61	8.62	
Mo	0.27	14.97	5.40	6.27	7.99	1.67	0.65	1.45	1.16	0.93	0.65	0.49	0.45	0.72	1.50	
Ag	<PO	0.80	0.57	0.46	0.81	< по	< по	< по	< по	0.07	<по	<по	< по	<по	< по	
Cd	0.12	0.13	0.13	1.52	0.10	0.11	0.17	0.11	0.19	0.65	< по	0.20	< по	0.14	0.13	
Sn	3.19	1.20	1.62	4.29	1.69	2.43	2.73	4.72	3.39	3.19	1.69	2.31	0.71	1.17	1.02	
Sb	0.47	6.29	3.29	3.58	0.91	0.33	0.22	0.26	0.51	0.45	0.17	0.14	0.06	0.23	0.23	
Te	<PO	0.10	0.25	0.48	< по	0.15	0.18	0.21	< по	3.20	< по	0.64	< по	0.09	0.15	
Cs	2.90	1.48	2.15	6.22	3.32	1.23	2.74	4.15	8.77	3.19	3.87	7.36	3.49	4.71	4.38	
Ba	273.6	251.9	404.2	1141.0	415.8	166.6	673.6	869.5	476.9	423.3	702.0	869.2	668.8	1200.0	1456.0	
La	30.5	7.28	10.58	69.82	16.38	26.81	28.27	44.59	21.79	33.74	12.42	19.81	10.97	22.32	23.5	
Ce	69.83	16.81	27.14	125.40	27.98	62.35	61.60	99.85	55.39	79.92	21.20	43.34	20.10	47.76	48.24	
Pr	8.18	2.30	3.38	17.80	4.33	7.05	7.65	11.06	5.97	8.73	2.63	4.88	2.47	5.12	5.21	
Nd	31.37	9.38	13.62	67.16	16.51	27.37	29.13	41.95	23.58	33.31	9.71	18.82	9.46	19.07	18.76	
Sm	6.51	1.88	2.68	12.61	3.42	5.86	6.07	8.57	5.58	6.94	1.89	3.72	1.83	3.26	3.22	
Eu	1.55	0.34	0.56	2.28	0.86	1.40	1.38	1.73	1.38	1.62	0.44	0.79	0.42	0.65	0.70	
Gd	5.88	1.41	1.90	10.60	3.33	5.66	5.30	7.07	5.48	5.71	1.45	2.92	1.42	2.23	2.25	
Tb	0.97	0.22	0.30	1.65	0.55	0.92	0.93	1.23	0.97	0.95	0.22	0.44	0.22	0.36	0.34	

Dy	5.62	1.23	1.76	8.94	3.33	5.40	5.45	6.92	5.87	5.05	1.18	2.21	1.11	1.89	1.91
Ho	1.12	0.25	0.39	1.69	0.71	1.05	1.10	1.40	1.16	0.95	0.23	0.43	0.22	0.37	0.37
Er	3.28	0.80	1.31	4.49	2.09	2.96	3.30	3.93	3.38	2.80	0.75	1.29	0.65	1.16	1.16
Tm	0.46	0.12	0.20	0.56	0.30	0.40	0.49	0.54	0.48	0.41	0.12	0.19	0.10	0.18	0.18
Yb	3.06	0.84	1.45	3.41	2.05	2.60	3.28	3.54	3.19	2.66	0.77	1.31	0.66	1.30	1.27
Lu	0.46	0.13	0.24	0.48	0.31	0.37	0.49	0.51	0.47	0.41	0.13	0.20	0.10	0.20	0.21
Hf	3.63	0.81	3.15	2.76	0.16	2.93	0.96	1.21	4.45	3.22	0.88	1.52	0.69	1.60	1.61
Ta	0.77	0.08	0.18	0.61	0.04	0.60	1.01	1.19	0.81	0.71	0.21	0.40	0.20	0.44	0.41
W	1.08	0.42	0.40	1.19	0.65	0.87	0.71	1.28	1.45	1.41	0.97	1.34	0.37	0.57	0.56
Tl	0.42	1.43	1.63	1.12	0.54	0.17	0.48	0.71	0.82	0.56	0.34	0.44	0.38	0.66	0.69
Pb	4.97	4.38	2.84	12.03	9.99	5.29	4.73	21.93	6.31	21.39	0.59	3.84	0.40	1.25	1.92
Bi	0.19	0.15	0.18	0.26	0.21	0.11	0.11	0.27	0.19	0.22	0.10	0.09	0.07	0.09	0.14
Th	8.51	0.63	1.91	10.24	3.16	6.93	9.85	14.92	9.54	7.85	3.68	6.38	3.00	7.64	7.56
U	1.93	3.16	3.27	14.26	12.57	1.59	1.38	1.87	2.01	1.39	0.72	0.87	0.32	1.25	1.11
Σ_{REZ}	168.79	42.99	65.51	326.88	82.16	150.19	154.44	232.88	134.70	183.18	53.12	100.36	49.73	105.89	107.31
La/Yb	9.96	8.68	7.28	20.47	7.98	10.31	8.61	12.59	6.83	12.69	16.16	15.11	16.65	17.16	18.45
Ce/Lu	152.47	126.39	112.15	260.71	89.11	167.61	126.23	196.17	117.85	197.33	165.63	212.45	193.27	235.27	231.92

Примечание. 1–5 – черные сланцы и фтаниты грубейшей свиты и харбешорской подсвиты, р. Елец; 6–10 – алевросланцы и филлитовидные сланцы грубейшей свиты в зоне экзоконтакта; 11–15 – глинисто-кремнистые сланцы и фтаниты няньворгинской свиты в зоне тектонического контакта; <no – ниже предела обнаружения.

Note. 1–5 – black shales and phthanites of the Grubeyu Formation and Kharbeshor Subformation, Elets River; 6–10 – silty shale and phyllite shale of the Grubeyu Formation at the contact zone; 11–15 – clayey-siliceous shale and phthanite of the Nyanvorgay Formation at the tectonic contact zone; <no – below detection limit.

ся существенно цериевым и содержит примесь Са (до 0.52 мас. % СаО). По соотношению главных минералообразующих компонентов (Ce_2O_3 , La_2O_3 и Nd_2O_3) выделено две основные разновидности: монацит-(La-Ce) и монацит-(Nd-Ce). В составе монацита наиболее высокие концентрации РЗЭ установлены для Ce (27.74–36.42 мас. % Ce_2O_3), La (9.48–21.65 мас. % La_2O_3) и Nd (9.24–19.53 мас. % Nd_2O_3). В заметных количествах присутствуют Pr (до 3.84 мас. % Pr_2O_3), Sm (до 4.52 мас. % Sm_2O_3) и Gd (до 1.88 мас. % Gd_2O_3). Монацит обогащен Th (1.03–3.46 мас. % ThO_2).

Алланит-(Ce) представлен относительно крупными нередко раздробленными зернами размером до 250 мкм. Минерал заполняет полости и трещины в кварце, находится в тесной ассоциации с хлоритом и эпидотом, образует с ними сростки (рис. 3е). В химическом составе алланита-(Ce) отмечается некоторый избыток Al и Са относительно стехиометрического состава (табл. 4). Избыток Са указывает на изоморфное замещение части REE^{3+} на Ca^{2+} , а избыток Al обусловлен, соответственно, частичным замещением Fe^{2+} в структуре алланита-(Ce) на Al^{3+} . Среди РЗЭ в минерале преобладает Ce (5.80–13.15 мас. % Ce_2O_3), La (3.02–6.72 мас. % La_2O_3) и Nd (2.52–3.70 мас. % Nd_2O_3). В единичных случаях отмечается примесь Th (до 1.28 мас. % ThO_2) и Ti (до 2.37 мас. % TiO_2). Алланит-(Ce) нередко образует сростки с эпидотом, иногда буквально обрастая им, при этом в составе эпидота на границе срастания обнаруживается примесь РЗЭ (табл. 4, ан. 5).

Ксенотим образует мелкие зерна неправильной формы размером 5 мкм, выполняет полости в кварце, тесно ассоциирует с углеродным веществом и хлоритом (рис. 3ж). Химический состав ксеноти-ма характеризуется присутствием примесей Dy_2O_3 , Er_2O_3 , Gd_2O_3 , Yb_2O_3 , Ho_2O_3 и ThO_2 (табл. 5).

Апатит распределен в породе неравномерно, образует зерна призматической формы размером 20–100 мкм и их сростки (рис. 3а, г), ассоциирует с пиритом, в качестве мелких включений в нем встречены циркон, пирит и торит. По химическому составу является фторапатитом (3.02–4.69 мас. % F). Содержит Sc (Sc_2O_3 до 0.42 мас. %).

Циркон встречается в основной массе породы в виде многочисленных тетрагонально-дипирамидальных хорошо ограненных кристаллов размером 10–70 мкм (рис. 3д). Ассоциирует с апатитом и монацитом. В химическом составе отмечена примесь Hf (1.33–1.86 мас. % HfO_2).

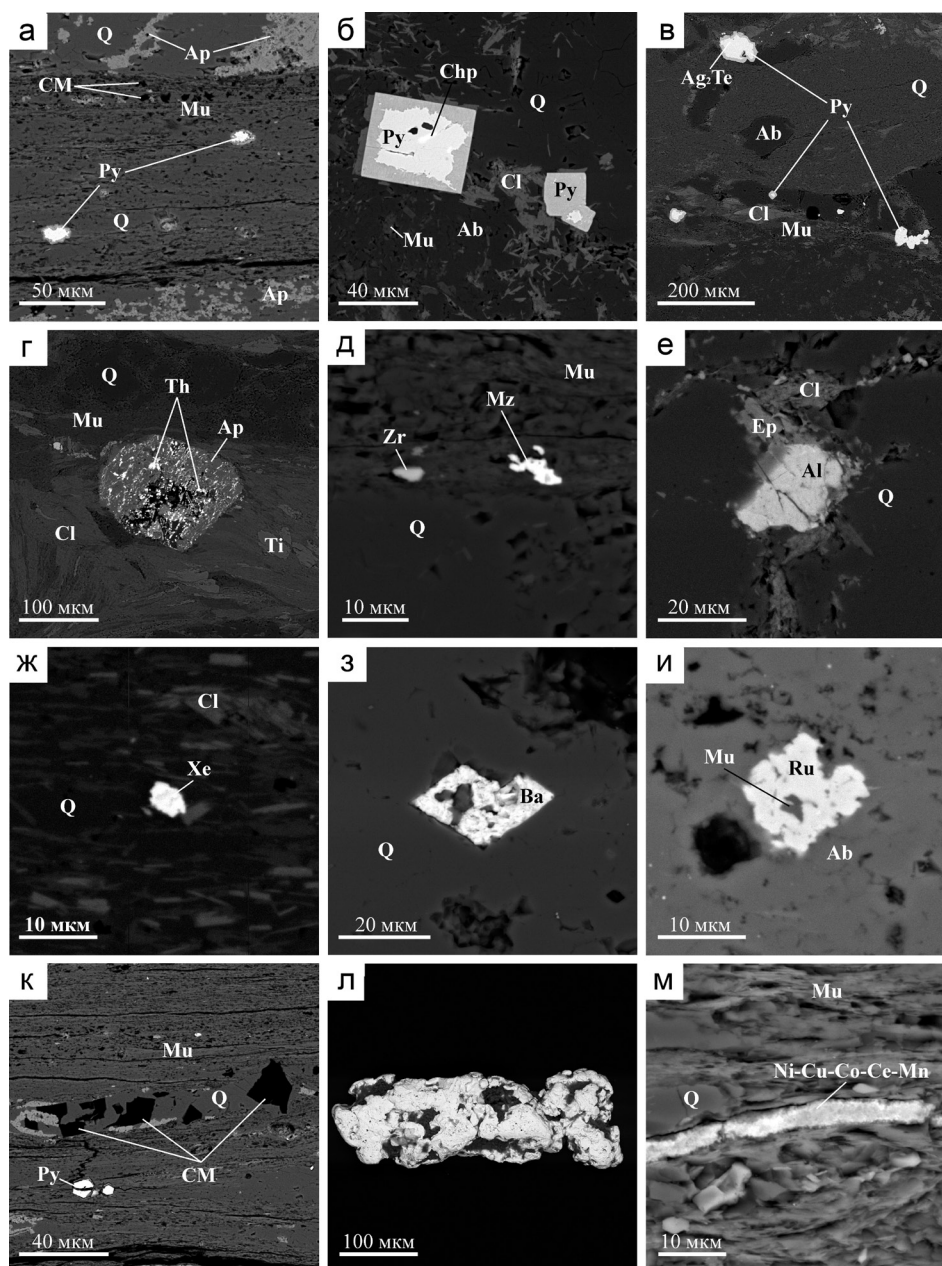


Рис. 3. Породообразующие и акцессорные минералы черных сланцев окружения Яйюского магматического комплекса:

а – переслаивание кварц-апатитовых и кварц-мусковитовых слоев с включениями пирита (Py); б – пирит с включениями халькопирита (Chp); в – микровключения минерала состава Ag_2Te в пирите; г – включения торита (Th) в апатите (Ap); д – выделения монацита (Mz) и циркона (Zr) в мусковите (Mu); е – срастание алланита-(Ce) (Al) с эпидотом (Ep) и хлоритом (Cl); ж – зерно ксенотима (Xe) в основной массе породы; з – выделение барита (Ba) в кварце (Q); и – рутил (Ru) в альбите (Ab); к – включения углеродного вещества (CM); л – зерно золота; м – микропрожилки Ni-Cu-Co-Ce-Mn состава. BSE изображения.

Fig. 3. Rock-forming and accessory minerals of black shales from the frame of the Yayu igneous complex:

а – intercalation of quartz-apatite and quartz-muscovite layers with pyrite (Py) inclusions; б – pyrite with inclusions of chalcopyrite (Chp); в – microinclusions of Ag_2Te phase in pyrite; г – inclusion of thorite (Th) in apatite (Ap); д – monazite (Mz) and zircon (Zr) in muscovite (Mu); е – intergrowth of allanite-(Ce) (Al) with epidote (Ep) and chlorite (Cl); ж – xenotime grain (Xe) in rock matrix; з – inclusion of barite (Ba) in quartz (Q); и – rutile (Ru) in albite (Ab); к – inclusions of carbonaceous matter (CM); л – gold grain; м – veinlet of Ni-Cu-Co-Ce-Mn composition. BSE images

Таблица 3

Нормированный химический состав (мас. %) монацита

Table 3

Normalized chemical composition (wt. %) of monazite

№ п/п	№ обр./ан.	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Pr ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	ThO ₂	Формулы
1	4/94а-2/1	32.45	—	—	—	11.63	29.73	3.84	17.50	2.47	1.36	1.03	(Ce _{0.40} Nd _{0.23} La _{0.16} Pr _{0.05} Sm _{0.03} Gd _{0.02} Th _{0.01}) _{0.89} [PO ₄]
2	4/94а-3/1	30.61	1.73	0.56	0.40	21.12	31.50	1.86	9.24	—	—	2.98	(Ce _{0.44} La _{0.30} Nd _{0.13} Al _{0.08} Pr _{0.03} Th _{0.05} Ca _{0.02} K _{0.02}) _{1.05} [PO ₄]
3	4/94б-1/1	30.00	0.31	—	—	21.65	34.05	2.54	9.85	—	—	1.60	(Ce _{0.49} La _{0.31} Nd _{0.14} Pr _{0.04} Al _{0.01}) _{1.01} [PO ₄]
4	4/94б-4/1	30.02	—	—	—	9.48	27.74	3.40	19.53	4.52	1.85	3.46	(Ce _{0.40} Nd _{0.27} La _{0.14} Sm _{0.06} Pr _{0.05} Th _{0.03} Gd _{0.02}) _{0.98} [PO ₄]
5	4/95а-2/1	32.86	—	—	—	15.51	32.41	2.74	12.97	1.51	—	2.00	(Ce _{0.43} La _{0.21} Nd _{0.17} Pr _{0.04} Sm _{0.02} Th _{0.02}) _{0.87} [PO ₄]
6	4/95а-4/1	29.27	—	0.29	—	18.02	30.20	3.17	12.99	2.25	1.88	1.93	(Ce _{0.45} La _{0.27} Nd _{0.19} Pr _{0.05} Sm _{0.03} Gd _{0.02} Th _{0.02} Ca _{0.01}) _{1.04} [PO ₄]
7	4/95а-5/1	27.83	—	0.22	—	18.78	32.15	3.36	13.67	1.94	—	2.04	(Ce _{0.50} La _{0.29} Nd _{0.21} Pr _{0.05} Sm _{0.03} Th _{0.02} Ca _{0.01}) _{1.11} [PO ₄]
8	4/106-1/1	32.30	3.60	—	0.96	15.50	34.87	—	10.59	—	—	2.18	(Ce _{0.47} La _{0.21} Al _{0.16} Nd _{0.14} K _{0.04} Th _{0.02}) _{1.03} [PO ₄]
9	20/41-2/1	29.87	—	—	—	13.26	36.42	3.59	14.45	1.25	—	1.15	(Ce _{0.53} Nd _{0.20} La _{0.19} Pr _{0.05} Sm _{0.02} Th _{0.01}) _{1.00} [PO ₄]

Таблица 4

Нормированный химический состав (мас. %) алланита-(Ce) и PЗЭ-содержащего эпидота

Table 4

Normalized chemical composition (wt. %) of allanite-(Ce) and REE-bearing epidote

№ п/п	№ обр./ан.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	La ₂ O ₃	Ce ₂ O ₃	Nd ₂ O ₃	Формулы
1	26/86-8/1	37.09	24.98	17.80	—	8.79	3.02	5.80	2.52	(Ca _{1.54} Ce _{0.17} La _{0.09} Nd _{0.07}) _{1.88} (Al _{2.38} Fe _{0.54}) _{2.92} (Si ₃ O ₁₂)(OH) _{0.83}
2	26/86-8/2	34.40	21.57	13.41	—	11.22	6.25	13.15	—	(Ca _{1.25} Ce _{0.42} La _{0.20}) _{1.87} (Al _{2.22} Fe _{0.74}) _{2.95} (Si ₃ O ₁₂)(OH) _{1.21}
3	26/86-8/3	33.28	19.94	12.50	—	12.13	6.72	11.73	3.70	(Ca _{1.21} Ce _{0.39} La _{0.22} Nd _{0.12}) _{1.94} (Al _{2.12} Fe _{0.82}) _{2.94} (Si ₃ O ₁₂)(OH) _{1.43}
4	26/86-8/4	35.29	23.44	15.25	—	8.81	4.95	8.99	3.27	(Ca _{1.39} Ce _{0.28} La _{0.16} Nd _{0.10}) _{1.92} (Al _{2.35} Fe _{0.56}) _{2.37} (Si ₃ O ₁₂)(OH) _{1.13}
5	22/59-6/4	38.73	23.27	20.41	0.61	12.79	1.45	2.74	—	(Ca _{1.69} Ce _{0.08} La _{0.04}) _{1.81} (Al _{2.12} Fe _{0.75} Ti _{0.04}) _{2.91} (Si ₃ O ₁₂)(OH) _{0.51}

Примечание. 1–4 – алланит-(Ce); 5 – PЗЭ-содержащий эпидот. Содержание OH рассчитано по балансу зарядов.

Note. 1–4 – allanite-(Ce); 5 – REE-bearing epidote. The OH content is recalculated from the charge balance.

Таблица 5

Нормированный химический состав (мас. %) ксенотима

Table 5

Normalized chemical composition (wt. %) of xenotime

№ п/п	№ обр./ан.	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	Y ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Dy ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	ThO ₂	Формулы
1	4/94б-2/1	35.32	0.69	43.34	3.76	6.88	4.30	3.17	1.00	(Y _{0.77} Dy _{0.07} Er _{0.05} Gd _{0.04} Yb _{0.03} Ho _{0.02} Al _{0.02} Th _{0.01}) _{1.01} [PO ₄]
2	4/95а-6/1	33.15	—	51.44	2.45	5.22	3.34	2.06	1.05	(Y _{0.98} Dy _{0.06} Er _{0.04} Gd _{0.03} Yb _{0.02} Ho _{0.01} Th _{0.01}) _{1.15} [PO ₄]
3	4/106-4/2	35.68	—	49.03	2.39	5.64	3.27	2.39	—	(Y _{0.86} Dy _{0.06} Er _{0.03} Gd _{0.03} Yb _{0.02} Ho _{0.02}) _{1.03} [PO ₄]

Золото. В результате шлихования на р. Елец установлены единичные знаки видимого золота. С помощью электронно-микроскопического анализа изучено зерно золота размером 0.1×0.4 мм. Частица имеет удлиненную форму со сглаженными выступами и торцевыми валиками по краям (рис. 3л). Поверхность золота пластинчатого строения характеризуется отпечатками других минералов и следами механических повреждений. Химический состав поверхности золота неоднородный, отмечается постоянное присутствие Ag (1.53–12.08 мас. %), диагностированы примазки алюмосиликатов и гидрослюд.

В алевросланцах непосредственно в экзоконтактовой зоне с магматическими породами отмечена микропрожилковая минерализация (рис. 3м). Микропрожилки развиты вдоль слоистости породы, имеют мощность до 5 мкм, являются полифазными, содержат MnO (26.15–39.13 мас. %), Ce_2O_3 (4.26–25.00 мас. %), CoO (4.56–8.39 мас. %), Fe_2O_3 (1.93–3.23 мас. %), CuO (1.22–2.17 мас. %), CaO (1.85–2.31 мас. %), NiO (0.73–1.35 мас. %), P_2O_5 (0.43–1.30 мас. %) и другие порообразующие компоненты (K_2O , MgO и NaO до 1.75 мас. % каждого).

Тонкодисперсное УВ в черных сланцах окрашивает породу в черный цвет, равномерно рассеяно в породе, а также образует крупные выделения неправильной формы в кварце, в основном, развиваясь вдоль рассланцевания породы; ассоциирует с мусковитом, хлоритом, пиритом, реже с апатитом и РЗЭ минералами (рис. 3а, к). Крупные обломки УВ характеризуются угловатыми формами зерен с ровной поверхностью, имеют размеры от первых микрометров до 200 мкм.

Изотопный состав углерода УВ (от –24.05 до –29.57 $\delta^{13}\text{C}$ ‰) соответствует УВ органического происхождения (Галимов, 1968). Согласно термogravиметрическому анализу образцы черных сланцев содержат УВ, выгорание которого сопровождается интенсивным экзотермическим эффектом с началом окисления при температуре 452–499 °С и окончанием выгорания при температуре 596–682 °С. Значения максимумов экзотермического эффекта (525–599 °С) указывают на преобразование УВ пород окружения Яйюского магматического комплекса в условиях регионального метаморфизма зеленосланцевой фации (Иванова и др., 1974). Выявленные различия в температурах начала выгорания УВ и характере экзотермического эффекта образцов из разных точек опробования,

вероятно, связаны с неоднородностью степени его структурной организации, вызванной контактовым метаморфизмом в зонах прорывающих интрузий.

Тонкодисперсное рассеянное УВ по данным спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР) характеризуется G-полосой с положением 1601 см^{-1} , ее ширина на половине высоты (FWHM) составляет в среднем 61 см^{-1} , кроме того, в КР-спектрах наблюдается широкая и интенсивная D-полоса, отвечающая за степень разупорядочения углеродного вещества (Tuinstra, Koenig, 1970), что по данным (Wopenka, Pasteris, 1993; Beyssac et al., 2002) соответствует слабоупорядоченному УВ, образованному в сланцах зеленосланцевой (низкотемпературной) фации метаморфизма. УВ в крупных выделениях характеризуется положением G-полосы 1606 см^{-1} с FWHM = 40 см^{-1} , что соответствует более упорядоченному УВ, сравнимому с УВ хлоритовой стадии метаморфизма (Wopenka, Pasteris, 1993; Beyssac et al., 2002). Обломочная морфология УВ свидетельствует о терригенной природе материала, в связи с этим специфика органического вещества не отражает условий осадконакопления.

Обсуждение

Золоторудные месторождения сухоложского типа, как правило, не обнаруживают видимой пространственной связи с интрузивными образованиями (Буряк, 1982; Иванов, 1984; Юдовская и др., 2011). Тем не менее, под крупными золоторудными месторождениями, такими как Мурунтау, Кумтор и Даугызтау, глубоким бурением и геофизическими методами установлено наличие гранитоидных интрузий (Пак, 2008). Н.П. Лавёров с соавторами (2000) считают важным фактором рудообразования месторождения Сухой Лог гидротермальные растворы, связанные с гранитным батолитом, не вскрытым эрозией. Углеродистые сланцы при этом являются, в основном, субстратом, в котором происходит мобилизация и осаждение рудных компонентов из магматического источника (Лавёров и др., 2000; Кряжев, 2017). В.Н. Сазонов с соавторами (2011) выделяют три этапа формирования месторождений золота в черных сланцах на Урале: 1) первоначальное седиментогенное накопление благородных металлов в сульфидах и углеродистом веществе; 2) перераспределение и частичное высвобождение золота и минералов платиновой группы в процессе регионального метаморфизма; 3) форми-

рование рудных залежей в гидротермально-метасоматических зонах над интрузиями гранодиорит-гранитовой формации. Согласно этим авторам благородные металлы, первоначально содержащиеся в черносланцевых толщах, составляют не более 25 % рудного вещества месторождений, т. е. промышленные залежи благородных металлов образуются только в связи с надинтрузивными гидротермальными процессами.

Изученные нами палеозойские черносланцевые толщи грубеинской и няньворгинской свиты окружения Яйюского магматического комплекса обогащены Li, Be, Ba, Ti, Mn, Zr, Rb, Sc, Cs, P, Nb, Ta, Th и РЗЭ. При этом в алевросланцах экзоконтактовой зоны установлен надкларковый уровень для следующих элементов Ti, Mn, Ba, Zr, Rb, Cr, Li, Co, Ga, Sc, Nb, Th, Cs, Be, Te, Eu, Ta и РЗЭ. Кремнисто-глинистые сланцы на границе с тектоническим контактом и на удалении от выходов магматических пород, в основном, имеют околокларковые содержания всех элементов. Значительные вариации отношений La/Yb, Ce/Lu и повышенные содержания Y в изученных породах, вероятно, связаны со спецификой перераспределения вещества в процессе гидротермальных изменений. Исключение составляют рыхлые черные сланцы грубеинской свиты (р. Елец), резко отличающиеся повышенными содержаниями P, Ba, Rb, Y, Be, U, Th, Eu и РЗЭ, что объясняется присутствием в породах апатита, титанита, рутила, барита, монацита и ксенотима. Спектры кривых распределения РЗЭ в черных сланцах окружения Яйюского магматического комплекса схожи и характеризуются преимущественным накоплением легких РЗЭ при слабом фракционировании тяжелых РЗЭ с заметным Eu минимумом. Алевросланцы грубеинской свиты в зоне экзоконтакта с интрузией и рыхлые черные сланцы грубеинской свиты (р. Елец) относительно кларков черных сланцев характеризуются повышенными содержаниями РЗЭ.

В углеродистых сланцах экзоконтактовой зоны диагностированы редкоземельные и рудные минералы – монацит, алланит, ксенотим, пирит, халькопирит, пирротин, апатит, титанит, рутил, галенит, редкоземельный эпидот, барит и торит, образование которых, по-видимому, происходит в результате интенсивной гидротермально-метасоматической переработки, перераспределения и привноса дополнительного рудного вещества с более глубоких уровней земной коры и из флюидно-магматической системы. Кроме того, в зоне

горячего контакта с прорывающей интрузией установлена собственная форма нахождения серебра – Ag_2Te (предположительно гессит), а также отмечена микропрожилковая рудная минерализация Ni-Cu-Co-Ge-Mn состава, скорее всего, связанная с привносом компонентов гидротермами. Согласно термогравиметрическому анализу и данным КР-спектроскопии УВ в черных сланцах окружения Яйюского магматического комплекса характеризуется разной степенью упорядочения, вероятно, вызванной контактовым метаморфизмом в зонах прорывающих интрузий.

Установлено, что черные сланцы изначально содержат повышенные концентрации Au (до 65 мг/т), при этом вблизи зоны контакта отмечается увеличение содержания золота, что может быть связано с привносом рудного вещества из магматического источника в ходе гидротермального процесса с повышением концентрации Au в измененных сланцах до 80 мг/т (при среднем 18 мг/т). Содержание Ag, как правило, не превышает 0.5 г/т и в единичных случаях составляет 0.8 г/т.

Заключение

Анализ исследованных черносланцевых пород окружения Яйюского магматического комплекса показал, что на этом объекте присутствуют все главные поисковые признаки на коренное золото. Во-первых, имеется наличие горячих контактов углеродистых толщ с интрузией с проявлением гидротермальных преобразований черных сланцев, выражающиеся в интенсивно проявившейся жильной минерализации, пиритизации и формировании обильной редкоземельной минерализации. Во-вторых, в углеродистых сланцах установлены повышенные содержания Au (до 60–80 мг/т), а также находки собственного минерала серебра в пирите. И, в-третьих, наличие шлиховых ореолов россыпного золота в аллювии рек района исследований. Таким образом, минералого-геохимические особенности черных сланцев окружения Яйюского магматического комплекса указывают на возможность обнаружения в черных сланцах района проявлений коренного золота черносланцевого типа.

Авторы выражают благодарность Е.М. Тропникову и С.И. Исаенко за помощь в проведении аналитических работ. Работа выполнена при финансовой поддержке НИР ГР № АААА-А17-117121270036-7.

Литература

- Буряк В.А.** (1982) Метаморфизм и рудообразование. М., Наука, 256 с.
- Вихтер Б.Я.** (2011) Металлоносные черные сланцы и песчано-сланцевые терригенные комплексы: различия и перспективы золотоносности. *Прикладная металлогения*, 5, 5–13.
- Галимов Э.М.** (1968) Геохимия стабильных изотопов углерода. М., Недра, 226 с.
- Гурская Л.И.** (2000) Платинометальное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. Санкт-Петербург, ВСЕГЕИ, 208 с.
- Иванов А.И.** (1984) Закономерности формирования линейной складчатости северной части Байкало-Патомского нагорья. *Автореферат диссертации на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук*. Иркутск.
- Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н., Розина Е.Л.** (1974) Термический анализ минералов и горных пород. Л., Недра, 399 с.
- Кряжев С.Г.** (2017) Генетические модели и критерии прогноза золоторудных месторождений в углеродисто-терригенных комплексах. *Автореферат диссертации на соискание степени доктора геолого-минералогических наук*. Москва, 52 с.
- Лавёров Н.П., Лишневский Э.Н., Дистлер В.В., Чернов А.А.** (2000) Модель рудно-магматической системы золото-платинового месторождения Сухой Лог (Восточная Сибирь, Россия). *Доклады Академии наук*, 375(5), 652–656.
- Пак Н.Т.** (2008) Крупные месторождения золота в черносланцевых толщах Тянь-Шаня / Рудогенез: сборник научных статей. Миасс, Екатеринбург, УрО РАН, 235–238.
- Петров Г.А.** (2014) Прогнозирование благороднометального оруденения в допалеозойских черносланцевых толщах центральной части Уральского подвижного пояса. *Литосфера*, 6, 88–101.
- Попов П.Е., Шишкин М.А., Малых О.Н. и др.** (2005) Геологическое доизучение масштаба 1:200 000 листов Q-41-V, VI, XI (Воркутинский район). Отчет Воркутинской ГСП за 2001–2005 гг. Сыктывкар, ЗАО Горногеол. компания Миреко.
- Сазонов В.Н., Коротеев В.Н., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Великанов А.Я.** (2011) Золото в «черных сланцах». *Литосфера*, 4, 70–92.
- Светов С.А., Степанова А.В., Чаженигина С.Ю., Светова Е.Н., Михайлова А.И., Рыбникова З.П., Парамонов А.С., Утицина В.Л., Колодей В.С., Эхова М.В.** (2015) 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*, 7, 54–73.
- Шишкин М.А.** (2003) Геология зоны сочленения Елецких и Лемвинских фаций на западном склоне Полярного Урала. *Автореферат диссертации на соискание степени кандидата геолого-минералогических наук*. Сыктывкар, 20 с.
- Шумилова Т.Г., Шевчук С.С., Исаенко С.И.** (2016) Металлоносность и углеродное вещество в уральских породах черносланцевого типа. *Доклады Академии наук*, 469(1), 86–90.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** (1994) Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург, УИФ Наука, 304 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** (2000) Основы литохимии. СПб., Наука, 497 с.
- Юдовская М.А., Дистлер В.В., Родионов Н.В., Мохов А.В., Антонов А.В., Сергеев С.А.** (2011) Соотношение процессов метаморфизма и рудообразования на золотом черносланцевом месторождении сухой лог по данным U-Th-Pb-изотопного SHRIMP-датирования акцессорных минералов. *Геология рудных месторождений*, 53(1), 32–64.
- Beyssac O., Goffé B., Chopin C., Rouzaud J.N.** (2002) Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(9), 859–871.
- Large R.R., Maslennikov V.V., Danyushevsky L.R. et al.** (2008) Origin of pyrite in the Sukhoi Log gold deposit. In.: *Рудогенез: сборник научных статей*. Миасс, Екатеринбург, УрО РАН, 169–171.
- McDonough W.F., Sun S.S.** (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- Tuinstra F., Koenig J.L.** (1970) Raman Spectrum of Graphite. *The Journal of Chemical Physics*, 53(3), 1126–1130.
- Wopenka B., Pasteris J.D.** (1993) Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: Applicability of Raman microprobe spectroscopy. *American Mineralogist*, 78, 533–557.

References

- Beyssac O., Goffé B., Chopin C., Rouzaud J.N.** (2002) Raman spectra of carbonaceous material in metasediments: a new geothermometer. *Journal of Metamorphic Geology*, 20(9), 859–871.
- Buryak V.A.** (1982) [Metamorphism and ore formation]. Moscow, Nauka, 256 p. (in Russian)
- Galimov E.M.** (1968) [Geochemistry of carbon stable isotopes]. Moscow, Nedra, 226 p. (in Russian)
- Gurskaya L.I.** (2000) [Black shale Pt mineralization and criteria for its forecast]. St. Petersburg, VSEGEI, 208 p. (in Russian)
- Ivanov A.I.** (1984) [Principles of the formation of linear folding in the northern part of the Baikal-Patom Highland]. *Abstract of Dissertation of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences*. Irkutsk. (in Russian)

- Ivanova V.P., Kasatov B.K., Krasavina T.N., Rozinova E.L.** (1974) [Thermal analysis of minerals and rocks]. Leningrad, Nedra, 399 p. (in Russian)
- Kryazhev S.G.** (2017) [Genetic models and forecast criteria for gold deposits in carbonaceous-terrigenous complexes]. *Abstract of Dissertation of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences*. Moscow, 52 p. (in Russian)
- Large R.R., Maslennikov V.V., Danyushevsky L.R. et al.** (2008) Origin of pyrite in the Sukhoi Log gold deposit. In.: *Rudogenez: sbornik nauchnykh statey [Ore genesis: collection of scientific papers]*. Miass, Yekaterinburg, UB RAS, 169–171. (in Russian)
- Laverov N.P., Lishnevskiy E.N., Distler V.V., Chernov A.A.** (2000) [A model of an ore-magmatic system of the Sukhoi Log gold-platinum deposit (East Siberia, Russia)]. *Doklady Akademii nauk [Reports Earth Sciences]*, **375**(5), 652–656. (in Russian)
- McDonough W.F., Sun S.S.** (1995) The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120, 223–253.
- Pak N.T.** (2008) [Large gold deposits in black shale complexes of Tien Shan]. In.: *Rudogenez: sbornik nauchnykh statey [Ore genesis: collection of scientific papers]*. Miass, Yekaterinburg, UrO RAN, 235–238. (in Russian)
- Petrov G.A.** (2014) [Forecast of precious metal mineralization in pre-Paleozoic black shale complexes of the central part of the Uralian mobile belt]. *Litosfera [Lithosphere]*, 6, 88–101. (in Russian)
- Popov P.Ye., Shishkin M.A., Malykh O.N. et al.** (2005) [Geological study of sheets Q-41-V, VI, XI (Vorkuta region) on a scale of 1:200 000. Report of the Vorkuta GSP for 2001–2005]. Syktyvkar, Gornogeol. kompaniya Mireko. (in Russian)
- Sazonov V.N., Koroteev V.N., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Velikanov A.Ya.** (2011) [Gold in «black shales»]. *Litosfera [Lithosphere]*, 4, 70–92. (in Russian)
- Svetov S.A., Stepanova A.V., Chazhengina S.Yu., Svetova E.N., Rybnikova Z.P., Mikhailova A.I., Paramonov A.S., Utitsyna V.L., Kolodey V.S., Ekho-va M.V.** (2015) [Precise geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of rock and mineral composition: method and accuracy estimation in case study of the Early Precambrian mafic complex]. *Trudy KarNTs RAN [Proceedings of KarSC RAS]*, 7, 54–73. (in Russian)
- Shishkin M.A.** (2003) [Geology of a junction zone of the Yelets and Lemva facies in the western slope of the Polar Urals]. *Abstract of Dissertation of Candidate of Geological and Mineralogical Sciences*. Syktyvkar, 20 p. (in Russian)
- Shumilova T.G., Shevchuk S.S., Isayenko S.I.** (2016) [Metal concentrations and carbonaceous matter in the black shale type rocks of the Urals]. *Doklady akademii nauk [Reports Earth Sciences]*, **469**(1), 695–698.
- Tuinstra F., Koenig J.L.** (1970) Raman Spectrum of Graphite. *The Journal of Chemical Physics*, **53**(3), 1126–1130.
- Vikhter B.Ya.** (2011) [Metalliferous black shales and sandy shale terrigenous complexes: differences and prospects of gold bearing]. *Prikladnaya metallogeniya [Applied Metallogeny]*, 5, 5–13. (in Russian)
- Wopenka B., Pasteris J.D.** (1993) Structural characterization of kerogens to granulite-facies graphite: Applicability of Raman microprobe spectroscopy. *American Mineralogist*, 78, 533–557.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P.** (1994) [Trace elements in black shales]. Yekaterinburg, Nauka, 304 p. (in Russian)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P.** (2000) [The fundamentals of lithochemistry]. St. Petersburg, Nauka, 497 p. (in Russian).
- Yudovskaya M.A., Distler V.V., Rodionov N.V., Mokhov A.V., Antonov A.V., Sergeyev S.A.** (2011) [Correlation of metamorphism and ore formation processes in the dry log gold black shale deposit according to U-Th-Pb isotope SHRIMP dating of accessory minerals]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy [Geology of Ore Deposits]*, **53**(1), 32–64. (in Russian).

Поступило в редакцию 25 марта 2020 г.

После доработки 19 ноября 2020 г.

Принято в печать 20 ноября 2020 г.