

Я. Ю. Фадин¹, Е. Г. Панова², Г. А. Олейникова¹, Д. О. Воронин²

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЧЕРНЫХ СЛАНЦЕВ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РАЙОНА НАРКЕ (ШВЕЦИЯ)

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. Карпинского, Российская Федерация, 199106, Санкт-Петербург, Средний пр., 74

² Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Черные сланцы нижнепалеозойского возраста широко распространены на территории Швеции и являются частью Прибалтийского палеобассейна, отложения которого известны также в Эстонии и Ленинградской области России. В черных сланцах накапливаются химические элементы, содержание которых превышает кларковые значения: Re — 700, Ag — 12, U — 10, Mo — 10, Pd — 4,7, V — 4,2, Pt — 3,5, Au — 3 раза. Коллоидно-солевая фракция (нанодисперсия) с размером частиц менее 1000 нм извлекается водой из породы и анализируется методом ИСП МС. Коэффициент накопления химических элементов в нанодисперсии по сравнению с полным валовым анализом составляет: для Pd — 47, для Co, Ni, Cd — от 15 до 31, для U, Cu, Zn и Re — от 3 до 10 раз. Похожее в геохимическом отношении ЧС различаются по химизму нанодисперсий, что может являться дополнительной мерой различий объектов.

Водорастворимые подвижные формы элементов могут вымываться из породы и мигрировать в окружающую среду, создавая повышенный природный геохимический фон района. Библиогр. 27 назв. Ил. 3. Табл. 2.

Ключевые слова: черные сланцы, геохимия, наночастицы (< 1000 нм), геохимия нанодисперсий.

Ya. Yu. Fadin¹, E. G. Panova², G. A. Oleynikova¹, D. O. Voronin²

GEOCHEMICAL FEATURES OF BLACK SHALES FROM NARKE DEPOSITS (SWEDEN)

¹ All Russian Geological Institute, 74, Sredniy pr., St. Petersburg, 199106, Russian Federation

² Saint-Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

Black shales of the Early Paleozoic age are widespread in Sweden, forming part of the Baltic paleobasin, sediments of which are also known in Estonia and Leningrad region of Russia. Black shales accumulate chemical elements, contents of which exceed the Clarke values: Re — 700, Ag — 12, U — 10, Mo — 10, Pd — 4.7, V — 4.2, Pt — 3.5, Au — 3 times. Colloid-salt fraction (nanofraction) with particle size of less than 1000 nm was extracted with water from the rock and analyzed by ICP MS method. Accumulation coefficient of chemical elements in comparison with the total analysis is for Pd — 47, for Co, Ni, Cd — from 15 to 31, for U, Cu, Zn and Re — from 3 to 10. The geochemistry of black shales is similar, but different in chemistry of nanofractions, which can be an important distinction of deposits. Water-soluble mobile forms of elements can be washed out of the rock and migrate to the environment, creating the increased natural geochemical background of the area. Refs 27. Figs 3. Tables 2.

Keywords: black shales, geochemistry, nanoparticles (<1000 nm), geochemistry of nanofractions.

Введение

Черносланцевые формации (ЧС) широко распространены в разновозрастных палеобассейнах мира. Особенностью пород является их обогащенность углеродистым веществом и значительным количеством урана, ванадия, молибдена, меди, никеля, кобальта, цинка, свинца, а также благородными металлами и рением, что позволяет рассматривать их в качестве комплексного объекта [1–8].

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2016

В юго-западном обрамлении Балтийского кристаллического щита отложения Прибалтийского палеобассейна дикионемовых сланцев входят в состав венд-палеозойского платформенного чехла. Осадки бассейна известны в странах Скандинавии, Эстонии, а также в Ленинградской области России. Наиболее широко месторождения нижнепалеозойских черных сланцев представлены в Швеции, где в разные годы, начиная с XV в., из них извлекали квасцы для отбеливания тканей, бумаги и выделки кожи, а в XX в. — кероген, радий, уран и рений [9, 10].

В последние годы в работах ряда исследователей было показано, что многие химические элементы в черносланцевых породах находятся в виде микроминералов и частиц сверхмалых размеров [4, 6, 11–13]. Установлено, что в черных сланцах золоторудных месторождений часто наблюдается тонкодисперсное золото, а также фиксируется присутствие других (не минеральных) форм благородных металлов [14–19].

Ввиду этого изучение геохимических особенностей черносланцевых пород и их сверхтонких фракций является актуальным как с научной точки зрения, так и с точки зрения разработки технологий извлечения из них широкого спектра химических элементов.

Материал и методы исследования

Материалом для исследования служили пробы черных сланцев, отобранные во время полевых работ в составе отряда кафедры геохимии СПбГУ в центральной Швеции. Пробы отбирались в открытых горных выработках на месторождениях «Кванторп» и «Латорп» послойно по разрезу толщ.

В работе использовались макроскопические и петрографические исследования, рентгено-фазовый анализ (MiniFlexII) и инфракрасная спектроскопия (Bruker Vertex 70) глинистых фракций, конфокальная микроскопия (Leica TCSSPE), инфракрасная спектрометрия органической составляющей (LECOSC177), электронно-микроскопические исследования (TM 3000 Hitachi), ИСП-МС (ELAN-drc-e и Agilent 7700x) и ААС (AAnalyst-800), выделение нанофракций и их анализ методом ИСП-МС.

Геолого-минералогическая характеристика черных сланцев района Нарке

Месторождения черных сланцев «Кванторп» и «Латорп» расположены в западной части Фенноскандинавского щита (рис. 1).

Образования фундамента перекрыты комплексом терригенных пород, мощность которых в центральной Швеции достигает нескольких десятков метров и представленных отложениями от нижнего кембрия до раннего ордовика [9]. В основании разреза толща песчаника глауконитизирована и фосфатизирована, она перекрывается алевролитами и сланцами среднего кембрия. На них залегают породы черносланцевой фации квасцово-сланцевой формации, которые перекрываются ордовикскими известняками.

Черные сланцы представлены слоистой породой, состоящей из органической, глинистой и алевро-песчаной частей. В них присутствует большое количество антраконитовых конкреций, достигающих размера 0,7×1,5 м. Кроме того, среди аутигенных образований диагностированы гипс, гипс-ангидрит, пирит, реже кремнистые и фосфатные стяжения.

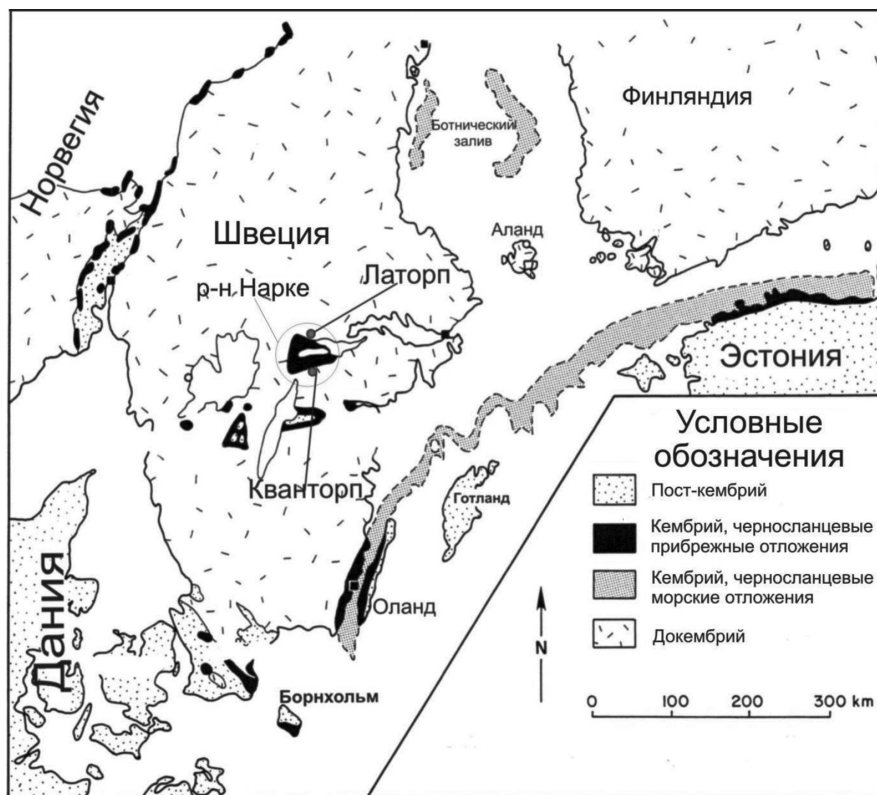


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района Нарке [9]

Изучение ЧС методом конфокальной микроскопии выявило присутствие органики до 15%, а с помощью метода инфракрасной спектроскопии — до 25%. Обнаружены различные формы выделения органического вещества: прослои и бесструктурные формы выделения. Выявлена тенденция к уменьшению органической составляющей вверх по разрезу.

Из ЧС выделялись глинистая и алевро-песчаная части методом отмучивания в воде. Установлено, что низы разреза обогащены алевро-песчаным материалом (до 55%), а в верхних горизонтах накапливаются глинистые частицы (до 65%).

По результатам петрографического, рентгено-фазового, ИКС анализов, а также методом сканирующей электронной микроскопии в составе ЧС обнаружены глинистые минералы (каолинит, гидрослюда, монтмориллонит, хлорит), обломки кварца, полевого шпата, апатит, рутил, циркон, монацит, сфалерит, оксиды и гидроксиды железа. Кроме того, диагностированы единичные зерна золота, платины, самородной меди и медистого никеля.

Геохимия черных сланцев

Черные сланцы Прибалтийского палеобассейна накапливают в себе широкий круг химических элементов, что отражено в работах отечественных [1, 20] и зарубежных [9, 10, 21, 22] исследователей.

Химические составы пород месторождений «Кванторп» и «Латорп» представлены в табл. 1. Полученные значения сравнивались с кларками элементов в ЧС по данным М. П. Кетрис и Я. Э. Юдовича [18]. Из таблицы видно, что содержание многих химических элементов в несколько раз превышает кларковые значения. Ряд кларков концентрации имеет следующий вид: Re — 700, Ag — 12, U — 10, Mo — 10, Pd — 4,7, V — 4,2, Pt — 3,5, Au — 3.

Таблица 1. Среднее содержание химических элементов в черных сланцах района Нарке, ppm

Химический элемент	Среднее (n = 18)	Стандартное отклонение	Максимальное значение	Кларк [18]	Кларк концентрации
U	101	49,4	185	10	10
V	416	96,1	684	99	4,2
Mo	155	37,5	229	16	10
Cu	54,76	30,3	97,1	70	0,8
Co	6,69	6,1	18,3	19	0,4
Ni	45,7	34,5	118	70	0,7
Pb	34,6	35,2	129	21	1,6
Zn	52,8	83,8	381	130	0,4
Cd	0,6	0,8	1,13	5	0,1
Ag	0,88	0,13	1,16	0,072	12
Au	0,010	0,006	0,031	0,0033	3
Re	0,071	0,018	0,11	0,0001	700
Pt	0,0035	0,001	0,006	0,001	3,5
Pd	0,0047	0,0026	0,05	0,001	4,7

Наибольший интерес представляют благородные металлы, уран, ванадий и халькофильные элементы. Представленные материалы свидетельствуют о высоком благороднометалльном потенциале ЧС, а также о перспективах комплексного извлечения большой группы элементов. Следует отметить, что высокий уровень содержания химических элементов невозможно объяснить только наличием минеральных фаз. Таким образом, необходимо оценить наличие неминеральных форм химических элементов в ЧС.

Геохимия нанофракций черных сланцев

Вопрос о форме микроэлементов в минералах и горных породах имеет важное значение для геохимиков, химиков-аналитиков и определяет схемы извлечения элементов. В состав минералов и в качестве изоморфных примесей входит значительная часть химических элементов, замещающая макрокомпоненты в кристаллической решетке. Некоторые из них накапливаются в газовой-жидких включениях, а часть находится в коллоидно-дисперсной форме в поровом пространстве породы. Кроме того, известно, что для ряда химических элементов состояние рассеяния является основным. Необходимо отметить, что химические элементы, находящиеся в дисперсной форме в ЧС, не рассматривались в качестве объектов для выделения при обогащении руд.

Для выделения коллоидно-дисперсной формы элементов было необходимо найти способ выделить фракцию, состоящую из элементов, находящихся в состоянии рассеяния, сконцентрировать их, отделяя от минеральной матрицы породы.

Так как границей коллоидных частиц принято считать 1000 нм, этот размер был взят за пограничное значение. В разработку методики выделения фракции с размером частиц менее 1 мкм был положен тот факт, что при определенных условиях наночастицы в воде образуют коллоидные растворы, которые во многих случаях устойчивы в течение длительного срока. Отделить коллоидные частицы от воды возможно только с применением различных коагулянтов или с помощью ультрацентрифугирования [23, 24]. Применение фильтров с размером пор 1 мкм для фильтрации растворов позволяет строго соблюсти верхний размер частиц: все частицы, попадающие в раствор, имеют размер до 1 мкм. Массу вещества, присутствующего в анализируемом растворе, определяют весовым способом, удаляя воду выпариванием из аликвоты раствора. Выделенную фракцию было предложено называть нанодисперсной, или нанофракцией (НФ) [25]. Разработанный авторами метод выделения и анализа нанофракций защищен патентом РФ [26] и опробован на выделении дисперсной формы рения из ЧС [27].

Метод заключается в обработке проб водой при соблюдении определенных условий, призванных обеспечить полноту выделения в раствор коллоидно-дисперсных форм химических элементов, имеющих размер частиц до 1 мкм. Частицы размером более 1 мкм удаляют фильтрацией через пористый фильтр, при этом в растворе остаются вещества в ионной форме (растворимые соли) и коллоидные частицы. Выделенный коллоидно-солевой водный раствор анализируют методом ИСП-МС. Содержание химических элементов рассчитывают в нанофракции и в пробе, из которой извлекали нанофракцию.

Следует отметить, что анализ водных растворов позволяет в максимальной степени реализовать возможности метода ИСП-МС, поскольку отсутствует негативное влияние на результаты дополнительно вводимых химических реагентов, что, в свою очередь, приводит к снижению пределов обнаружения редких и рассеянных элементов в исходных пробах на 2–3 порядка [26].

Результаты анализа нанофракций ЧС из района Нарке представлены на рис. 2, где видно, что ряд элементов, таких как уран, медь, кобальт, никель, цинк, таллий, иттрий и кадмий, накапливаются в нанофракции, что свидетельствует об их извлечении водой и говорит о подвижности этих элементов в ЧС. Напротив, у таких элементов, как молибден, свинец, цирконий, барий и хром, преобладают труднорастворимые в воде формы. Для этой группы характерно накопление в валовой пробе. Для сравнения содержания элементов в нанофракции и в валовой пробе было рассчитано их отношение. Содержание некоторых элементов в нанофракции превышает содержание в породе более чем в 30 раз. Этот коэффициент имеет наиболее высокие значения (от 15 до 31) для Co, Ni, Cd, а для U, Cu, Zn, и Tl его величина составляет от 3 до 10 единиц.

Содержание благородных металлов и рения в нанофракции ЧС представлено в табл. 2.

Выявлены высокие значения подвижных форм палладия и рения, которые на несколько порядков выше содержания в породе в целом. Для золота и серебра характерны минеральные формы.

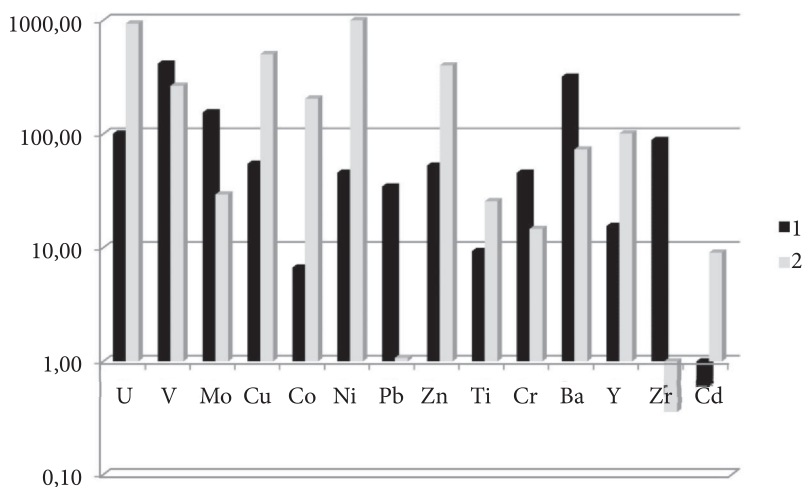


Рис. 2. Содержания химических элементов в черных сланцах (1) и их нанодробках (2), ppm

Таблица 2. Содержание благородных металлов и рения в черных сланцах и их нанодробках, ppm

Химический элемент	Ag	Au	Pt	Pd	Re
Черный сланец (n = 18)	0,88	0,01	0,0035	0,0047	0,071
Нанодробка (n = 18)	0,007	0,008	0,003	0,22	0,222
Коэффициент накопления (нанодробка/ЧС)	0,01	0,73	0,86	46,8	3

Для оценки доли подвижных форм элементов в ЧС содержание элементов пересчитано на пробу ЧС с учетом весовой доли нанодробки. Соотношение растворимых в воде и прочно связанных форм элементов в каждой пробе различно. Например, доля подвижного Pd в пробах ЧС меняется от 25 до 100 отн. %, составляя в среднем 60,8 отн. %, а для Re — от 10 до 100 отн. %, в среднем, 33,2 отн. %.

Геохимические данные обработаны с помощью метода главных компонент факторного анализа (рис. 3). Установлено, что ЧС месторождений «Кванторп» и «Латорп» на уровне валового анализа похожи, и их точки на диаграмме факторов скучены на границе между третьим и четвертым квадрантами. Однако состав нанодробок из этих месторождений различен. Поля точек располагаются в разных квадрантах, а именно — в первом и втором. Первый фактор отражает элементное различие валовой пробы и нанодробки:

$$F1(47\%) = \frac{Ni_{92}Co_{90}Zn_{87}U_{71}Pd_{63}Cu_{47}Re_{44}}{Ag_{96}Pb_{87}Mo_{81}Pt_{63}Au_{41}}$$

В числителе находятся элементы, накапливающиеся в нанодробках, а в знаменателе — типичные для породы в целом. Второй фактор свидетельствует о различии геохимических особенностей нанодробок двух месторождений и отражает благороднометалльную специализацию месторождений на наноуровне:

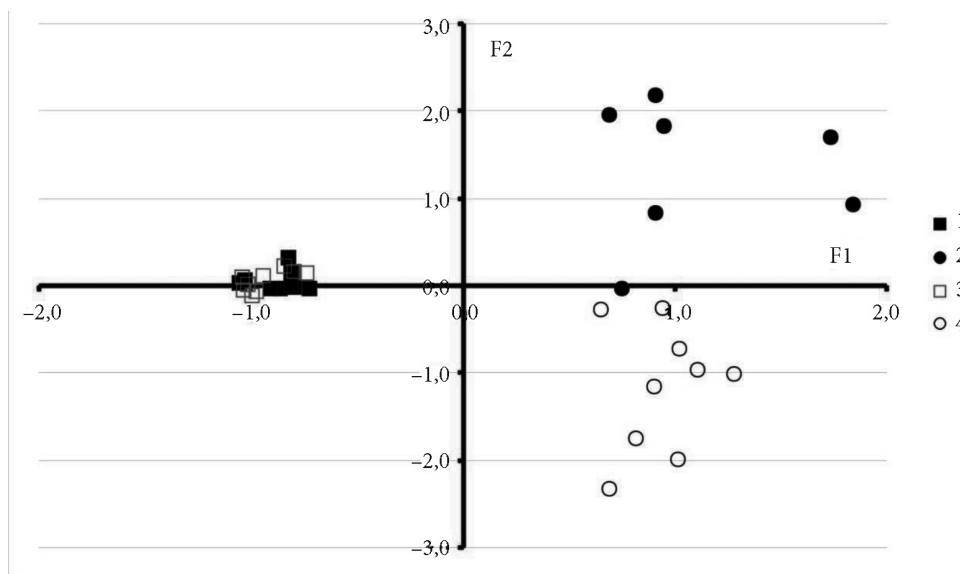


Рис. 3. Диаграмма значений факторов химических элементов черных сланцев (1, 3) и их нанодракций (2, 4) месторождений «Кванторп» и «Латорп» соответственно

$$F2(23\%) = \frac{V_{75}Pd_{56}}{Tl_{87}Pt_{65}Re_{64}Au_{39}}$$

Нанодракции ЧС месторождения «Кванторп» обогащены палладием и ванадием, а на месторождении «Латорп» в нанодракции накапливаются таллий, платина, рений и золото.

Выводы

1. В черных сланцах накапливается широкий круг химических элементов, содержание которых может превышать кларковые значения в несколько раз: Re — 700, Ag — 12, U — 10, Mo — 10, Pd — 4,7, V — 4,2, Pt — 3,5, Au — 3 раз.

2. В нанодракциях ЧС накапливаются элементы, находящиеся в рассеянном и ультрадисперсном состоянии (коллоидно-солевой форме). Коэффициент накопления по сравнению с полным валовым анализом составляет для Pd — 47, Co, Ni, Cd — от 15 до 31, а для U, Cu, Zn и Re — от 3 до 10 единиц.

3. Похожие в геохимическом отношении ЧС различаются химизмом нанодракций, что может являться дополнительной мерой различий объектов.

4. Содержание элементов в нанодракциях отражает подвижную, мобильную часть элемента породы. Именно подвижные формы элементов в первую очередь будут вымываться из породы и мигрировать в окружающую среду, создавая повышенный природный геохимический фон района.

* * *

Авторы благодарны профессору университета Оребро Берту Алларду за помощь в проведении полевых работ и профессору Стокгольмского университета Эрнесту Чи Фру за обсуждение материалов.

Литература

1. Иванов В. В., Поплавко Е. М., Тимофеев О. С. Особенности распределения элементов-примесей в углеродистых сланцах Эстонии // Геохимия. 1984. № 6. С. 903–913.
2. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Элементы-примеси в черных сланцах. Екатеринбург: УИФ: Наука, 1994. 304 с.
3. Клер В. Р., Ненахова В. Ф., Сапрыкин Ф. Я., Шпирт М. Я., Рохлин Л. И., Кулачкова А. Ф., Иовчев Р. И. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Закономерности концентрации элементов и методы их изучения. М.: Наука, 1988. 256 с.
4. Гурская Л. И. Платинометалльное оруденение черносланцевого типа и критерии его прогнозирования. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2000. 208 с.
5. Orberger B., Vymazalova A., Wagner C., Fialin M., Gallien J. P., Wirth R., Pasava J., Montagnac G. Biogenic origin of intergrown Mo-sulphide- and carbonaceous matter in Lower Cambrian black shales (southern China) // Chemical geology. 2007. Vol. 238. P. 213–231.
6. Lillie A., Peucker-Ehrenbrink B., Petsch S. Mobility of rhenium, platinum group elements and organic carbon during black shale weathering // Earth and Planetary Science Letters. 2002. Vol. 198. P. 339–353.
7. Lewan M. D., Buchardt B. Irradiation of organic matter by uranium decay in the Alum Shale, Sweden // Geochimica et Cosmochimica Acta, 1989. Vol. 53. P. 1307–1322.
8. Covey R. M., Pasava J. Ores and organic matter // Ore Geology Reviews. 2004. 160 p.
9. Andersson A., Dahlman B., Gee D. G., Snall S. The Scandinavian Alum Shales // Geological Survey of Sweden. 1985. N 56. 50 p.
10. Falk H., Lavergren U., Bergbäck B. Metal mobility in alum shale from Öland, Sweden // Journal of Geochemical Exploration. 2006. Vol. 90. P. 157–165.
11. Новгородова М. И. Кластеры золота и их значение для концентрации металла в тонкодисперсной форме // Роль минералогии в развитии минерально-сырьевой базы благородных металлов и алмазов XXI века. М.: ИГЕМ, 1998. 68 с.
12. Конеев Р. И. Наноминералогия золота эпitherмальных месторождений Чаткало-Кураминского региона (Узбекистан). СПб.: DELTA, 2006. 220 с.
13. Маракушев А. А. Геохимия и генезис черных сланцев // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2009. № 7. С. 2–4.
14. Дистлер В. В., Митрофанов Г. Л., Немеров В. К. Распределение, формы и условия концентрирования платиновых металлов в месторождениях, ассоциированных с черными сланцами. Платиновая минерализация в рудах месторождения Сухой Лог // Геология рудных месторождений. 1996. Т. 38, № 6. С. 467–484.
15. Дистлер В. В., Юдовская М. А., Развозжаева Э. А. Новые данные по платиновой минерализации золотых руд месторождения Сухой Лог (Ленский золоторудный район, Россия) // ДАН. 2003. Т. 393, № 4. С. 524–527.
16. Changxun Y., Lavergren U., Peltola P., Drake H., Bergbäck B., Åström M. E. Retention and transport of arsenic, uranium and nickel in a black shale setting revealed by a long-term humidity cell test and sequential chemical extractions // Chemical Geology. 2013. Vol. 363. P. 134–144.
17. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества / под ред. Н. П. Юшкина, А. М. Асхабова, В. И. Ракина. СПб.: Наука, 2005. 581 с.
18. Ketris M. P., Udovich Y. E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals // International Journal of Coal Geology. 2009. Vol. 78. P. 135–148.
19. Шпирт М. Я., Пунанова С. А., Стрижакова Ю. А. Микроэлементы горючих и черных сланцев // Химия твердого топлива. 2007. № 2. С. 68–77.
20. Балахонова А. С. Рениевое оруденение диктионемовых сланцев Прибалтийского бассейна (Ленинградская область): дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб., 2014. 125 с.
21. Voolma M., Soesoo A., Hade S., Hints R., Kallaste T. Geochemical heterogeneity of Estonian Graptolite Argillite // Oil Shale. 2013. P. 377–401.
22. Hade S., Soesoo A. Estonian Graptolite Argillites Revisited: A future resource? // Oil Shale. 2013. P. 4–18.
23. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. СПб.: Лань, 2010. 416 с.
24. Ходаков Г. С., Юдкин Ю. П. Седиментационный анализ высокодисперсных систем. М.: Химия, 1981. 192 с.
25. Олейникова Г. А., Панова Е. Г. Геоинформационный ресурс анализа нанодисперсий горных пород. СПб.: Литосфера, 2011. № 1. С. 83–93.

26. Олейникова Г.А., Панова Е.Г., Шишилов В.А., Русанова Л.И. Нанотехнологический способ определения наличия и количественного содержания редких и рассеянных химических элементов в горных породах, рудах и продуктах их переработки. Патент RU 2370764. Заявл. 27.12.2007, опубл. 20.10.2009. Бюл. № 10.

27. Олейникова Г.А., Панова Е.Г., Кудряшов В.Л., Сербина М.Н., Фадин Я.Ю., Вялов В.И. Нанотехнологический способ извлечения рения из пород и руд черносланцевых формаций и продуктов их переработки. Патент RU 2455237. Заявл. 06.12.2010, опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.

Для цитирования: Фадин Я.Ю., Панова Е.Г., Олейникова Г.А., Воронин Д.О. Геохимические особенности черных сланцев месторождений района Нарке (Швеция) // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. 7. Геология. География. 2016. Вып. 2. С. 27–36. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.203

References

1. Ivanov V.V., Poplavko E.M., Timofeev O.S. Osobennosti raspredeleniia elementov-primesei v uglerodistykh slantsakh Estonii [Features of distribution of trace elements in carbonaceous shales in Estonia]. *Geokhimiia* [Geochemistry], 1984, no. 6, pp.903–913. (In Russian)
2. Yudovich Ya. E., Ketris M. P. *Elementy-primesi v chernykh slantsakh* [Trace elements in black shales]. Ekaterinburg, Ural Division of the Russian Academy of Science Publ., 1984. 304 p. (In Russian)
3. Claire V.R., Nenakhova V.F., Saprykin F.Ya., Shpirt M.Ya., Rokhlin L.I., Kulachkova A.F., Iovcev R.I. *Metallogeniia i geokhimiia uglennykh i slantsesoderzhashchikh tolshch SSSR. Zakonomernosti kontsentratsii elementov i metody ikh izucheniia* [Metallogeny and geochemistry of carboniferous and shales containing stratum of the USSR. Laws of the concentration of elements and methods of their study]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 256 p. (In Russian)
4. Gurskaya L.I. *Platinometall'noe orudenenie chernoslantsevoego tipa i kriterii ego prognozirovaniia* [Platinum-Group metal mineralization of black shale type and criteria for its prediction]. St. Petersburg, Publishing of VSEGEI, 2000. 208 p. (In Russian)
5. Orberger B., Vymazalova A., Wagner C., Fialin M., Gallien J.P., Wirth R., Pasava J., Montagnac G. Biogenic origin of intergrown Mo-sulphide- and carbonaceous matter in Lower Cambrian black shales (southern China). *Chemical geology*, 2007, vol. 238, pp.213–231.
6. Lillie A., Peucker-Ehrenbrink B., Petsch S. Mobility of rhenium, platinum group elements and organic carbon during black shale weathering. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, vol. 198, pp. 339–353.
7. Lewan M.D., Buchardt B. Irradiation of organic matter by uranium decay in the Alum Shale, Sweden. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, vol. 53, pp.1307–1322.
8. Coveney R. M., Pasava J. Ores and organic matter. *Ore Geology Reviews*, 2004. 160 p.
9. Andersson A., Dahlman B., Gee D.G., Snall S. The Scandinavian Alum Shales. *Geological Survey of Sweden*, 1985, no.56. 50 p.
10. Falk H., Lavergren U., Bergbäck B. Metal mobility in alum shale from Öland, Sweden. *Journal of Geochemical Exploration*, 2006, vol.90, pp. 157–165.
11. Novgorodova M.I. [Clusters of gold and the value for the concentration of the metal in finely divided form]. *Rol' mineralogii v razvitii mineral'no-syr'evoi bazy blagorodnykh metallov ialmazov XXI veka* [The role of mineralogy in the development of mineral resources base of noble metals and diamonds of the 21st century]. Moscow, IGEM Publ., 1998. 68 p. (In Russian)
12. Koneev R.I. *Nanomineralogiia zolota epitermal'nykh mestorozhdenii Chatkalo-Kuraminskogo regiona (Uzbekistan)* [Nanomineralogy of gold of epithermal deposits of Chatkal-Kurama region (Uzbekistan)]. St. Petersburg, DELTA Publ., 2006. 220 p. (In Russian)
13. Marakushev A.A. Geokhimiia i genezis chernykh slantsev [Geochemistry and genesis of black shales]. *Vestnik Instituta geologii Komi NTs UrO RAN* [Institute of Geology, Komi Science Centre of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences], 2009, no. 7, pp.2–4. (In Russian)
14. Distler V.V., Mitrofanov G.L., Nemerov V.K. Raspredelenie, formy i usloviia kontsentrirvaniia platinovykh metallov v mestorozhdeniiakh, assotsirovannykh s chernymi slantsami. Platinovaia mineralizatsiia v rudakh mestorozhdeniia Sukhoi Log [Distribution, forms and conditions of the concentration of platinum group metals in deposits associated with black shales. Platinum ore mineralization in the Sukhoi Log deposit]. *Geologiia rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 1996, vol.38, no. 6, pp.467–484. (In Russian)
15. Distler V.V., Yudovskaya M.A., Razvozhhaeva E.A. Novye dannye po platinovoi mineralizatsii zolotykh rud mestorozhdeniia Sukhoi Log (Lenskii zolotorudnyi raion, Rossiia) [New data on platinum

mineralization of gold ore deposit Sukhoi Log (Lenski gold ore district, Russia)]. *DAN [Reports of the Academy of Sciences]*, 2003, vol. 393, no. 4, pp. 524–527. (In Russian)

16. Changxun Y., Lavergren U., Peltola P., Drake H., Bergbäck B., Åström M. E. Retention and transport of arsenic, uranium and nickel in a black shale setting revealed by a long-term humidity cell test and sequential chemical extractions. *Chemical Geology*, 2013, vol. 363, pp. 134–144.

17. *Nanominerologiya. Ul'tra- i mikrodispersnoe sostoianie mineral'nogo veshchestva* [Nanominerology. Ultra- and microdispersed state of mineral substance]. Ed. N.P. Yushkin, A.M. Askhabov, V.I. Rakin. St. Petersburg, Nauka Publ., 2005. 581 p. (In Russian)

18. Ketris M.P., Udovich Y.E. Estimations of Clarkes for Carbonaceous biolithes: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 2009, vol. 78, pp. 135–148.

19. Shpirt M. Ya, Punanova S.A., Strizhakova Yu. A. Mikroelementy goriuchikh i chernykh slantsev [Microelements of flammable and black shales]. *Khimiia tverdogo topliva [Chemistry of Solid Fuel]*, 2007, no. 2, pp. 68–77. (In Russian)

20. Balachonova A.S. *Renievoe orudnenie diktionemovykh slantsev Pribaltiiskogo basseina (Leningradskaia oblast')*. Kand. Diss. [Rhenium mineralization of dictyonema shales of Baltic basin (Leningrad region)]. PhD Diss.]. St. Petersburg, 2014. 125 p. (In Russian)

21. Voolma M., Soesoo A., Hade S., Hints R., Kallaste T. Geochemical heterogeneity of Estonian Graptolite Argillite. *Oil Shale*, 2013, pp. 377–401.

22. Hade S., Soesoo A. Estonian Graptolite Argillites Revisited: A future resource? *Oil Shale*, 2013, pp. 4–18.

23. Fridrichsberg D. A. *Kurs kolloidnoi khimii [Course of Colloid Chemistry]*. St. Petersburg, Lan Publ., 2010. 416 p. (In Russian)

24. Hodakov G.S., Yudkin Y.P. *Sedimentatsionnyi analiz vysokodispersnykh sistem [Sedimentation analysis of superfine systems]*. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 192 p. (In Russian)

25. Oleinikova G. A., Panova E.G. *Geoinformatsionnyi resurs analiza nanofraktsii gornykh porod [Geoinformation resource of the analysis of nano fractions of rocks]*. St. Petersburg, Litosphere Publ., 2011, no. 1, pp. 83–93. (In Russian)

26. Oleinikova G. A., Panova E. G., Shishlov V. A., Rusanov L. I. *Nanotekhnologicheskii sposob opredeleniia nalichii i kolichestvennogo sodержaniia redkikh i rasseiannykh khimicheskikh elementov v gornykh porodakh, rudakh i produktakh ikh pererabotki [Nanotechnological method for determining the presence and quantitative content of rare and dispersed chemical elements in rocks, ores and processed rocks]*. Patent RU 2370764. (In Russian)

27. Oleinikova G. A., Panova E. G., Kudryashov V. L., Serbina M. N., Fadin Ya. Yu., Vyalov V. I. *Nanotekhnologicheskii sposob izvlecheniia reniia iz porod i rud chernoslantsevnykh formatsii i produktov ikh pererabotki [Nanotechnological way to extract rhenium from rocks and ores of black shale formations and their products]*. Patent RU 2455237. (In Russian)

For citation: Fadin Y. J., Panova E. G., Oleinikova G. A., Voronin D. O. Geochemical features of black shales from Narke deposits (S. Sweden). *Vestnik of Saint-Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2016, issue 2, pp. 27–36. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.203

Статья поступила в редакцию 10 февраля 2016 г.

Контактная информация

Фадин Ярослав Юрьевич — аспирант; slavaf4@yandex.ru

Панова Елена Геннадьевна — доктор геолого-минералогических наук, профессор; e.panova@spbu.ru

Олейникова Галина Андреевна — кандидат химических наук; galina_oleynikova@vsegei.ru

Воронин Дмитрий Олегович — аспирант; dimavoronin@list.ru

Fadin J. Yu. — post graduate student; slavaf4@yandex.ru

Panova E. G. — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor; e.panova@spbu.ru

Oleynikova G. A. — PhD; galina_oleynikova@vsegei.ru

Voronin D. O. — post graduate student; dimavoronin@list.ru