

УДК 550.4 + 550.8.05 + 550.84

ШУНГИТОВЫЕ ПОРОДЫ КАРЕЛИИ: ОТ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ К ПЕРСПЕКТИВАМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Ю. Е. Дейнес¹, В. В. Ковалевский¹, А. В. Первунина¹, А. Е. Ромашкин¹,
Д. В. Рычанчик¹, Е. П. Иешко²

¹ Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

² Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск, Россия

Рассмотрены материалы по истории исследования, перспективам поисков месторождений и практического освоения шунгитовых пород Карелии. Показаны критерии и возможности корреляции геологических разрезов. Приведены некоторые особенности геохимического и изотопного состава шунгитовых пород, а также их физико-химические свойства. Представлены результаты использования шунгитовых пород в некоторых инновационных технологиях.

Ключевые слова: шунгитовые породы; палеопротерозой; стратиграфия; инновации.

Yu. E. Deines, V. V. Kovalevski, A. V. Pervunina, A. E. Romashkin, D. V. Rychanchik, E. P. Ieshko. SHUNGITE ROCKS OF KARELIA: FROM GEOLOGICAL RESEARCH TO PROSPECTS FOR USE IN INNOVATIVE TECHNOLOGIES

The paper deals with the history of research and potential for shungite deposit prospecting and exploitation of shungite rocks in Karelia. The criteria and possibilities of correlation of geological sections are given. Some features of the geochemical and isotopic composition of shungite rocks, as well as their physicochemical properties are described. The results of shungite rock application in some innovative technologies are presented.

Keywords: shungite rocks; Paleoproterozoic; stratigraphy; innovations.

Введение

Онежская синклиальная структура Фенноскандинавского щита уникальна по объему накопленного органического углерода в раннем протерозое (рис. 1). Основная масса органического углерода заключена в верхней подсвите заонежской свиты людиковийского надгоризонта палеопротерозоя Карелии

(2,1–1,92 млрд лет). Заонежская свита включает в себя осадочные, вулканогенно-осадочные и вулканогенные образования. Свита подразделяется на две подсвиты [Геология..., 1982]. Нижняя (мощность около 250 м) сложена в основном аргиллитами, алевролитами, преимущественно доломитом. Для пород подсвиты характерны серые, зеленовато-серые цвета окраски, иногда темно-серые до черных

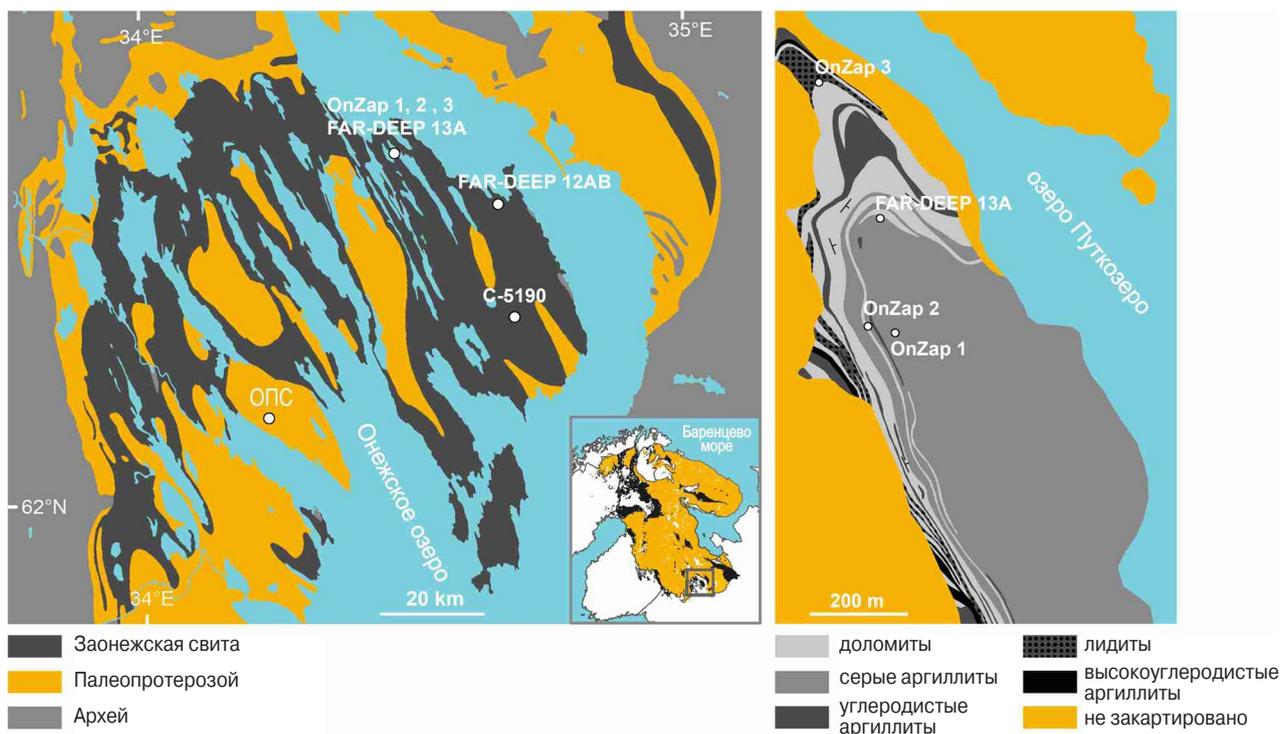


Рис. 1. А. Геологическая карта-схема Онежского бассейна. Показано расположение скважин, пробуренных по разным проектам. На врезке – положение Онежского бассейна и залегание палеопротерозойских пород (черный цвет) на Фенноскандинавском щите. Б. Геологическая карта-схема заонежской свиты [по: Melezhik et al., 2013] вблизи дер. Шуньга [Paiste et al., 2018]

Fig. 1. A. Simplified geological schematic map of the Onega basin, NW Russia. Circles show the location of holes for different projects. Inset map shows location of the Onega basin and occurrence of Paleoproterozoic rocks (black) across the eastern Fennoscandian Shield. B. Simplified geological schematic map of the Zaonega Formation [after: Melezhik et al., 2013] near Shunga [Paiste et al., 2018]

(в случае присутствия шунгитового вещества), обильная вкрапленность пирита [Онежская..., 2011]. Характерными особенностями верхней подсвиты (мощность около 850 м, не включая силлы габбродолеритов) являются: общая обогащенность осадочных пород шунгитовым веществом, наличие горизонтов с высоким (более 20 мас. %) содержанием шунгитового вещества, присутствие лав основного состава и силлов габбродолеритов. В пределах заонежской свиты С. В. Купряковым [1988] условно было выделено девять горизонтов шунгитовых пород как наиболее обогащенных $C_{орг}$ участков слоистой толщи. Максимальное содержание $C_{орг}$ – в наиболее тонких – пелитовых и алевролитовых компонентах, как правило, первично-глинистого, глинисто-кремнистого состава.

Докембрийские углеродсодержащие породы осадочного и вулканогенно-осадочного генезиса, содержащие в различной степени метаморфизованное органическое вещество, встречаются и за пределами Карелии, в том числе в Мурманской области, Финляндии, Га-

боне, Канаде и др. Сравнивая шунгитовые породы Карелии с породами других регионов мира, следует отметить следующее:

- шунгитовые породы Карелии выделяются объемом накопленного материала. По ряду оценок, в Онежской структуре на площади 9000 км² в палеопротерозое захоронено около 25×10¹⁰ т органического вещества, находящегося по соотношению Н/С и О/С (по диаграмме Ван Кревелена [Cornelius, 1987]) на графитовой стадии углефикации;
- несмотря на древнейший возраст (около 2 млрд лет), шунгитовые породы Карелии отличаются хорошей степенью сохранности, что способствует возможности исследования условий образования, а также процессов разрушения первичных залежей органического вещества и последующего переотложения в бассейнах осадконакопления.

Необходимо отметить, что породы отличаются по составу минеральных компонентов, содержанию, строению и свойствам органического вещества и др.

Месторождения шунгитовых пород Онежской структуры представлены купольными и субпластовыми телами [Филиппов, 2002]. Наиболее изученной является Максовская залежь Зажогинского месторождения, на котором в настоящее время ведется промышленная разработка. В структурном отношении залежь представляет собой близкую к изометричной антиклинальную складку мощностью до 120 м (в центральной части), имеющую характерную зональность в распределении углерода и минерального вещества [Филиппов, 2002]. Особенности строения субпластовой залежи шунгитовых пород достаточно полно исследованы на примере месторождения Шуньга [Филиппов, Дейнес, 2018].

В 70-е годы XX столетия в постановлении Совета Министров СССР Институт геологии КарНЦ РАН был признан головной организацией в области исследования шунгитовых пород. Эта тематика до сих пор является приоритетной.

В данной статье приведены результаты работ, проведенных в XXI веке. Рассмотрены геолого-геофизические исследования месторождений шунгитовых пород Карелии, показаны особенности физико-химических свойств шунгитовых пород, выявлены инновационные направления использования.

История изучения шунгитовых пород

Исследованием шунгитовых пород в пределах Онежского синклинория Фенноскандинавского щита российские и зарубежные ученые занимаются на протяжении более двухсот лет. Первые находки «углистых» пород Олонецкого края в районе п. Шуньга Заонежского полуострова известны с начала XVIII века. Внимание промышленников привлекала способность пород к горению, а ученые заинтересовались уникальностью физико-химических свойств и структурных особенностей шунгитовых пород. Первым, кто изучал свойства и дал название черным породам Заонежья, был профессор Санкт-Петербургского университета А. А. Иностранцев. Термин «шунгит», введенный в 1879 г. А. А. Иностранцевым, был определен для «нового крайнего члена в ряду аморфного углерода», который не является антрацитом [Иностранцев, 1879]. Данное определение остается актуальным в настоящее время, так как несет в себе геологическую, вещественную и структурную информацию.

А. А. Иностранцев впервые выделил четыре разновидности шунгитов, отличающиеся по физическим свойствам, положив начало их классификации. По мере продвижения исследова-

ний менялись и принципы классификации шунгитовых пород. В 1956 г. П. А. Борисов разделил шунгитовые породы на пять групп, принимая за основу единственный признак – содержание свободного углерода в породе: I – $>80\% C_{св}$; II – $35-80\% C_{св}$; III – $20-35\% C_{св}$; IV – $10-20\% C_{св}$; V – $<10\% C_{св}$ [Борисов, 1956]. В классификации Л. П. Галдобинной и В. А. Соколова [Шунгиты..., 1975] шунгитовые породы разделены с учетом генезиса минеральной составляющей (хемогенные, терригенные и вулканогенные), а также содержания свободного кремнезема. В 1984 г. В. И. Горлов впервые разделяет шунгитовые породы по генезису шунгитового вещества: первично-осадочное, миграционное, переотложенное [Горлов, 1984]. М. М. Филиппов также берет за основу этот принцип и разделяет шунгитовые породы на четыре группы [Филиппов, 2002]. В основу геолого-промышленной классификации Ю. К. Калинина положены вещественные признаки шунгитовых пород, их практическая значимость и технологические требования к сырью [Шунгиты..., 1984].

В настоящее время не существует единого образа в терминологическом определении углеродсодержащих пород докембрийского возраста. В научной литературе можно встретить термины: «углеродсодержащие породы», «шунгитовые породы», «шунгитоносные породы», «шунгиты». Следует отметить, что термин «шунгит» приобрел бытовое значение и применяется ко всем углеродсодержащим (черного цвета) породам Карелии.

На первых геологических («геогностических») картах Олонецкого горного округа Н. И. Комарова, 1842 г., а затем Г. П. Гельмерсена, 1860 г., шунгитовые породы отмечались как «черный аспид», «рыхлое углистое вещество» или «глинистый сланец, изобилующий графитом». В 1932–1933 гг. трестом «Шунгит» было разведано и затем введено в эксплуатацию месторождение шунгитов в дер. Шуньга. С 1954 г. на территории Заонежского п-ова проводились поиски урановых месторождений («Невскгеология», ВСЕГЕИ) – аэрогамма-аэромагнитная съемка м-ба 1:25 000, сопровождаемые наземными геофизическими исследованиями и бурением скважин. Далее картировочные работы на этой территории производились в 1969 г. ПГО «Севзапгеология». С целью изучения геологического строения участков при геолого-съёмочных работах м-ба 1:50 000, с выделением перспективных на рудное сырьё, территория Заонежского п-ова в 1970-е гг. исследовалась методами аэроэлектроразведки, вращающегося магнитного поля (ВМП) и беско-

нечно длинного кабеля (БДК). В 1979 г. на всей территории Заонежского п-ова и прилегающих районов была выполнена гравиметрическая съемка м-ба 1:50000. Результаты сейсмических работ МОВЗ на территории Заонежского п-ова ГПП «Невскгеология» в 1981–1987 гг. приведены в работе [Исанина и др., 2004]. Важным этапом геофизических исследований явились поисковые и разведочные работы на высокоуглеродистые породы в 1985 и 1988 гг.

Следует отметить, что с 1990-х гг. геологические исследования в Карелии в целом существенно сократились, некоторые производственные организации прекратили свою деятельность.

В 2000-х гг. стало активно развиваться международное сотрудничество, возникли новые проекты, в которых принимали участие сотрудники Института геологии.

Геолого-геофизические исследования шунгитовых пород Онежской структуры

В 2000 г. М. М. Филипповым была предложена диапировая модель формирования залежей шунгитовых пород [Филиппов, 2002]). В 2001–2005 гг. сотрудниками Института геологии КарНЦ РАН проведено геотектоническое районирование Онежской структуры на основе результатов региональных геофизических работ, создана модель формирования семейств купольных залежей шунгитовых пород [Филиппов, 2002]. Теоретически и экспериментально доказано существование в докембрии систем купольных структур, сформированных по органоглинам и органо-кремнистым осадочным породам, и получены данные об основных параметрах системы (ведущей длине волны и азимутах простираания первичных валов) для верхней подсвиты заонежской свиты людиковия в пределах Толвуйской синклинали [Филиппов и др., 2004].

Большой объем геофизических наблюдений 2006–2008 гг. позволил с высокой достоверностью утверждать, что в центральной части Толвуйской синклинали локализованы три купольные шунгитоносные структуры. Эти залежи, в отличие от Максовского месторождения, не затронуты процессами эрозии, т. е. их апикальные части перекрыты породами шунгитоносных горизонтов. Проведены работы по систематизации знаний о шунгитовых породах Карелии [Атлас..., 2007].

В 2007 году стартовал международный буровой проект FAR-DEEP (Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project), который осуществлялся в рамках международной программы континентального бурения ICDP (Inter-

national Continental Scientific Drilling Programm). Куратором проекта являлся проф. V. A. Melezhiik (Норвежская геологическая служба, университет г. Берген), кроме него в координационный совет входили проф. L. Kump (Пенсильванский университет, США), проф. H. Strauss (Вестфальский университет, Германия), проф. A. E. Fallick (Исследовательский реакторный центр университетов Шотландии), проф. C. Hawkesworth (Бристольский университет, Англия). Координатором проекта являлся A. Leland (Норвежская геологическая служба). Проект объединил ученых 12 стран, включая Россию. Было запланировано бурение 13 скважин на территории Карелии и Мурманской области. Причем три из них (11, 12AB, 13A) непосредственно связаны с изучением шунгитовых пород Карелии и их положения в стратиграфическом разрезе палеопротерозоя.

Знаменательным событием явилось бурение в 2007–2009 гг. Онежской параметрической скважины (ОПС) с проектной глубиной 3500 м, которая впервые вскрыла непрерывный разрез архейского фундамента до калевийского надгоризонта палеопротерозоя включительно. Работы по объекту «Онежская параметрическая скважина» выполнял ОАО НПЦ «Недра» (г. Ярославль). Исполнитель государственного контракта плодотворно сотрудничал с Институтом геологии КарНЦ РАН. Полученные результаты изучения скважины и геопространства изменили прежние модели строения Онежской структуры и требуют, по мере осмысления, проведения новых специальных исследований. Результаты бурения позволили получить новые данные, впервые для этого разреза были проведены геофизические исследования скважины широким комплексом методов.

В 2012 г. реализован еще один международный проект по бурению шунгитовых пород Карелии (OnZap), в рамках которого пробурены три скважины в районе месторождения Шуньга (см. рис. 1). Участие в нем принимали Институт геологии КарНЦ РАН, Геологическая служба Норвегии, Университет г. Тарту (Эстония).

В процессе выполнения этих проектов получены новые и иногда неожиданные данные о палеопротерозойских шунгитосодержащих породах: их химическом и минеральном составе, обстановках, в которых эти породы образовались, что позволило уточнить последовательность образования отложений в геологических разрезах и скоррелировать их с другими разрезами, расположенными в разных частях Онежской палеопротерозойской структуры.

Большая часть результатов исследований опубликована (в англоязычном варианте). По-

этому здесь мы приведем лишь некоторые из них.

Нижняя граница шунгитовых пород. Нижний контакт заонежской свиты с ятулийским надгоризонтом задокументирован ранее многими исследователями в разных частях Онежской структуры. Но единого мнения на характер перехода не существовало. Доступны две противоречивые интерпретации:

- эрозионная поверхность, указывающая на значительный перерыв в геологической летописи между карбонатными (ятулийскими (2,3–2,1 млрд лет) и шунгитсодержащими людикийскими (2,1–1,9 млрд лет) образованиями;
- постепенный переход от ятулийских к людикийским образованиям без тектонических и эрозионных процессов.

Детальные исследования этого перехода показали, что значительного перерыва между образованиями заонежской свиты и ятулийского надгоризонта не существовало [Melezhik et al., 2013].

Гигантские палеопротерозойские месторождения нефти. Получены доказательства, что палеопротерозойские породы Онежской структуры Карелии содержат значительные накопления органического вещества (до 75 мас. % органического углерода) с предполагаемым исходным нефтяным потенциалом, сравнимым с современными сверхгигантскими нефтяными месторождениями (рис. 2).

Полученный в результате выполнения проектов материал позволяет предположить, что керн скважин содержит сведения об условиях, которые существовали в бассейнах того времени. А то, что мы видим сейчас, является совре-



Рис. 2. Пиробитум (шунгит) из нефтяной ловушки близ Шуньги

Fig. 2. Pyrobitumen (shungite) from an oil trap near Shunga

менным видением уникально сохранившегося окаменелого месторождения нефти, включая свидетельства нефтяных ловушек и путей ее миграции [Melezhik et al., 2009].

Древние палеопротерозойские фосфориты. Считается, что все известные формы жизни на Земле требуют фосфора. В свою очередь, биологические процессы оказывают значительное влияние на круговорот фосфора в природе. По проблеме палеопротерозойского фосфатогенеза и связанных с ним климатических изменений, а также трансформаций глобальных циклов углерода, серы, кислорода и фосфора на рубеже истории Земли около 2 млрд лет назад, в рамках международного проекта OnZaP получен уникальный материал из района в окрестностях дер. Шуньга. Обнаружены одни из самых древних фосфоритовых прослоев (рис. 3). Палеопротерозойские фосфориты выявлены и в других местах. Но все они представлены преимущественно конкрециями и мелкими включениями. Шуньгские представляют собой прослои апатита в шунгитовых породах и их перекристаллизованные реликты в доломитах [Ромашкин и др., 2012; Lepland et al., 2013].

При анализе материалов по скважинам FAR-DEEP 12AB и 13A показано, что помимо литологических и геофизических маркирующих горизонтов имеется геохимическая (изотопная) аномалия, которая может быть использована для корреляции разрезов скважин, т. н. Уровень Шуньги. Так, $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ в породах свиты изменяется в диапазоне $-16,5 \div -40,6 \text{ ‰}$. Наблюдается явная тенденция снижения $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ снизу вверх по разрезу. В верхней подсвите породы характеризуются наиболее низкими значениями $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}}$ (среднее $-36,4 \text{ ‰}$). В пятом осадочно-вулканогенном ритме и в подошве суйсарской свиты средние значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{орг}} = -33,7 \text{ ‰}$. Облегчение изотопного состава $\text{C}_{\text{орг}}$ связывается с большим количеством миграционного ОВ, высачиванием углеводородов и деятельностью метанотрофов, т. е. с регрессией бассейна. Сопоставление изотопных данных по скважине 5190 (ПГО «Невскгеология»), а также по скважине 12А (FAR-DEEP) и по ОПС, расположенным на участках, находящихся на значительном расстоянии друг от друга (см. рис. 1), свидетельствует о том, что изотопная аномалия является региональной (рис. 4).

На рис. 5 представлен весь разрез заонежской свиты, вскрытый ОПС, и изотопные данные $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$ и $\delta^{18}\text{O}$. Как видно, изотопный состав пород нижней части заонежской свиты более постоянен и составляет $\delta^{13}\text{C}_{\text{карб}} = 6 \text{ ‰}$ и $\delta^{18}\text{O} = -10 \text{ ‰}$, с последующим ростом при

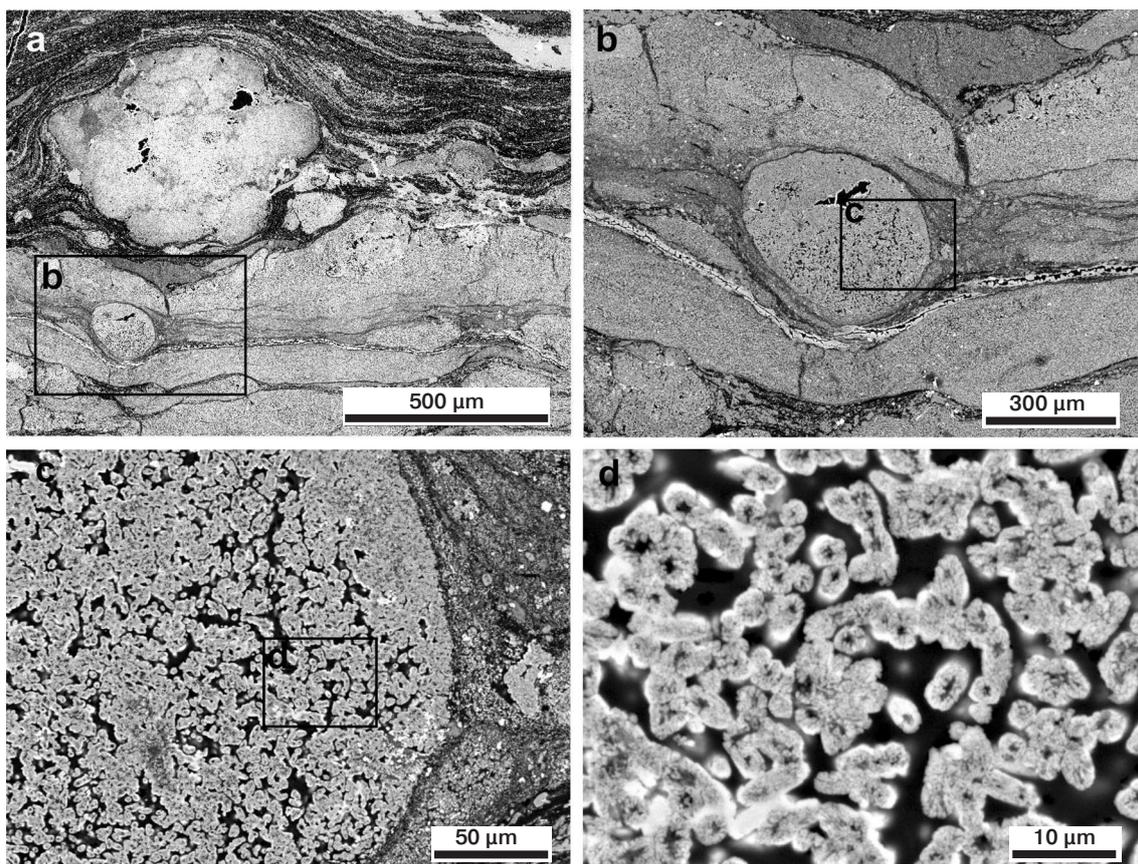


Рис. 3. Изображения SEM-BSE с увеличением от а до d, иллюстрирующие появление апатитовых цилиндров в матрице углеродистого вещества внутри фосфатной конкреции

Fig. 3. SEM-BSE images of increased magnification from a to d illustrating the occurrence of apatite cylinders in the matrix of carbonaceous matter within a phosphatic nodule

переходе в туломозерскую свиту ятулия. Следует отметить лучшую сохранность изотопных записей в нижней части заонежской свиты, как в углероде, так и в кислороде карбонатов. Отчетливо видно завершение аномалии изотопно-тяжелого карбонатного углерода Ломагунди-ятулий, достигавшей в породах Карелии значений $+16 \delta^{13}\text{C}_{\text{карб}}$, переход в отрицательные значения для карбонатов заонежской свиты. На этом фоне четко проявляются изотопные экскурсии Уровня Шуньги.

Таким образом, полученные материалы по буровым проектам FAR-DEEP [Strauss et al., 2013], OnZap [Kreitsmann et al., 2019] и данные по Онежской параметрической скважине [Онежская..., 2011] позволили обосновать важные региональные стратиграфические реперы для разрезов заонежской свиты [Qu et al., 2012; Филиппов, Есипко, 2016], существование массового накопления ОВ и генерации углеводородов (УВ) в Онежском бассейне и в других бассейнах-аналогах палеопротерозоя (феномен «Шуньга») [Melezhik et al., 2009; Kump et al., 2011], впервые для протерозойских отложений

выявить инъекции органоминерального вещества [Филиппов и др., 2016].

Геофизические исследования этого периода были направлены на выявление купольных структур в Мягрозерской, Хмельозерской и других синклиналиях, аналогичных по геологическому строению Толвуйской структуре, определение на отдельных примерах основных параметров систем и перспектив открытия крупных залежей шунгитовых пород [Филиппов, Дейнес, 2019]. Также была обоснована перспективность открытия субпластовых месторождений шуньгского типа в нескольких районах Онежской структуры, в том числе в непосредственной близости от месторождения Шуньга [Филиппов, Дейнес, 2018].

Геофизические исследования шунгитовых пород 2019–2020 гг. были направлены на выявление характерных признаков субпластовых залежей в пределах участка Шуньга Хмельозерской синклинали, а также на уточнение его геологического строения. Работы проводились в северо-западной и центральной части участка. Выполнены измерения разности потенци-

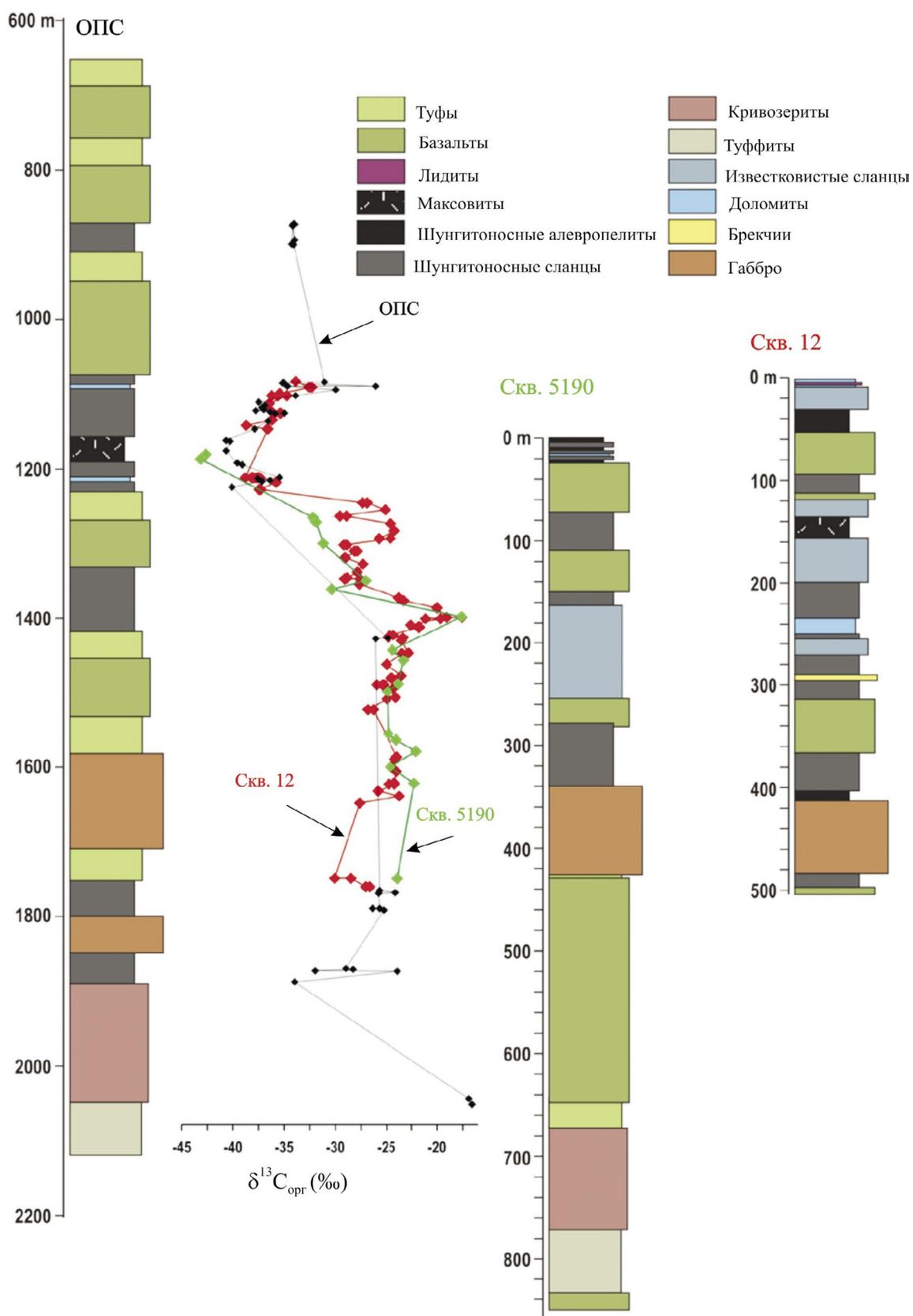


Рис. 4. Вариационные диаграммы $\delta^{13}C_{org}$ по скважинам, пройденным по заонежской свите в разных частях Онежской структуры [Strauss et al., 2013]. Исходные данные приведены по работам: [Melezhik et al., 1999; Крупеник и др., 2011]

Fig. 4. $\delta^{13}C_{org}$ stratigraphic profiles through the Zaonega Formation [Strauss et al., 2013]. Initial data is given after: [Melezhik et al., 1999; Krupenik et al., 2011]

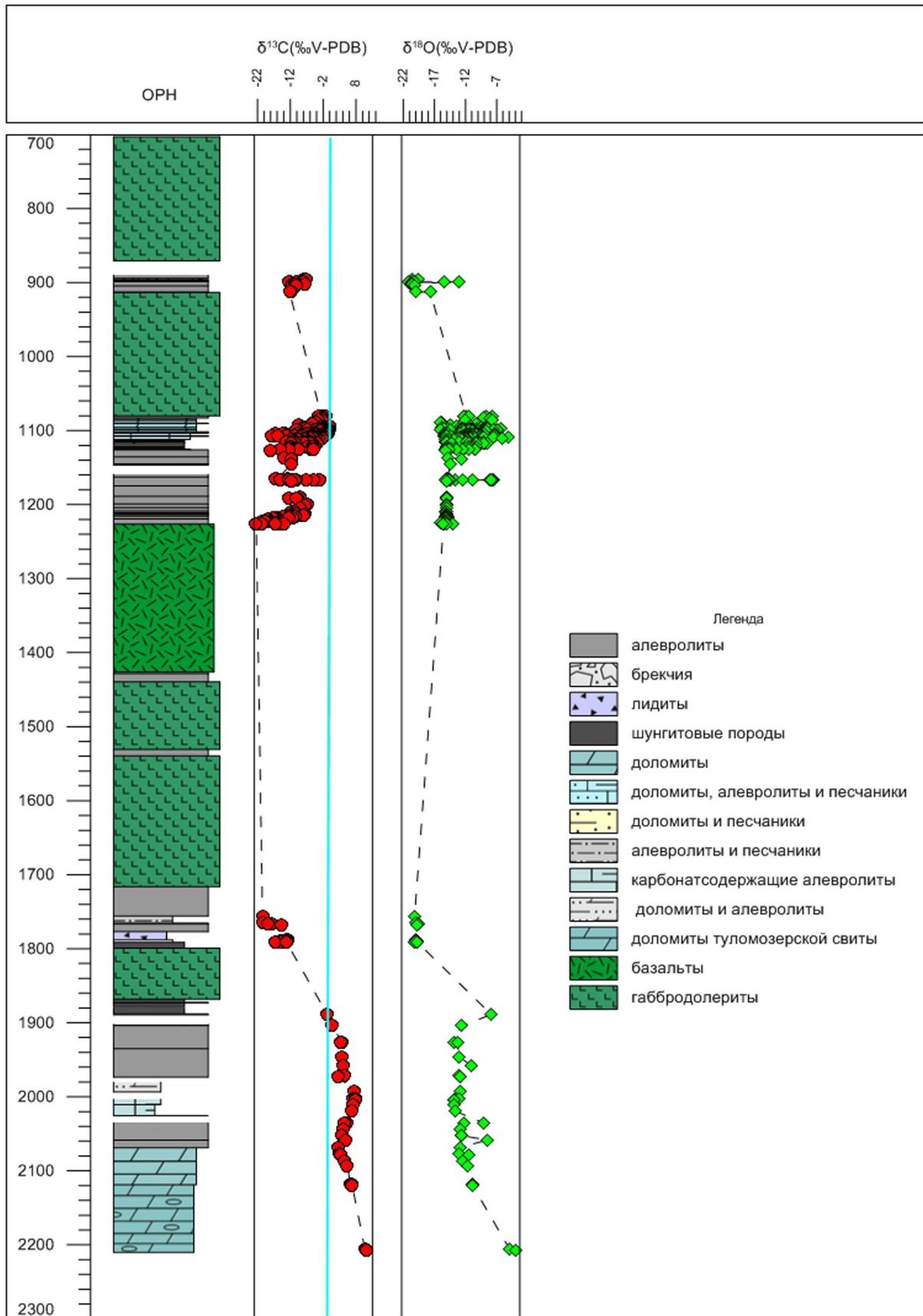


Рис. 5. Выражение глобального перехода события Ломагунди-ятулий в событие Шуньга в изотопном составе карбонатов

Fig. 5. Global transaction Lomagundi-Jatuli Event – Shunga Event in the isotopic composition of carbonates

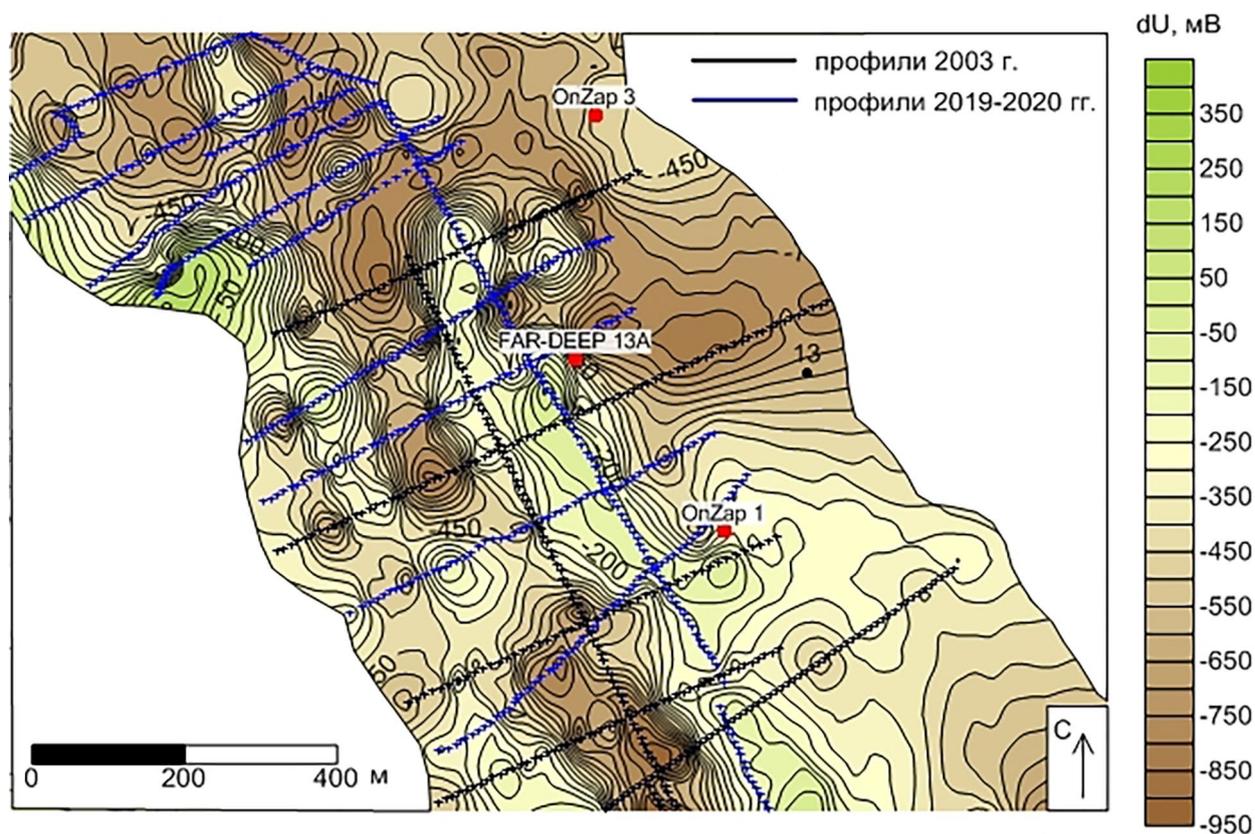


Рис. 6. План изолиний разности потенциалов естественного электрического поля ЕП, dU. Участок Шуньга
 Fig. 6. Contour maps of potential difference of the natural electric field. Shunga

алов естественного поля, а также измерения гамма-активности, построены планы изолиний (рис. 6). В северо-западной части участка Шуньга выявлены аномалии естественного электрического поля, а также повышенные значения гамма-активности, предположительно, связанные с восьмым шунгитоносным горизонтом, который является региональным репером. Это поможет в корреляции разреза участка Шуньга с другими участками Хмельозерской синклинали.

Литохимические исследования шунгитовых пород

Особенности химического состава минеральной основы шунгитовых пород как в залежах, развитых по горизонтам, находящимся на разных стратиграфических уровнях, так и в пределах самих купольных залежей шунгитовых пород рассмотрены в работе [Дейнес, 2018]. Для характеристики шунгитовых пород из десяти залежей использовалась химическая классификация и система петрохимических модулей для осадочных пород, предложенных Я. Э. Юдовичем и М. П. Кетрис [2000]. Данные химических анализов пересчитывались на без-

углеродистую основу (минеральную компоненту максовитов), и, соответственно, названия типов, классов и др., согласно классификации, даны для минеральной компоненты.

Показано, что в шунгитовых породах наблюдается прямая зависимость между суммой щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) и алюмокремниевым модулем ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$), а также отчетливая обратная зависимость между содержанием SiO_2 и Al_2O_3 . Породы более высоких горизонтов менее щелочные, более кремнистые, чем нижележащие. Породы подошвы залежи более щелочные, карбонатные, с повышенным содержанием Al, Fe, Mg, менее кремнистые; кровельная часть тела имеет менее щелочной, но более кремнистый состав, содержание Al, Fe и Mg ниже, чем в подошве; породы центральной части тела имеют промежуточный состав; четких границ в содержании элементов между породами всех трех частей залежи нет. Выявленные закономерности могут служить надежным поисковым признаком при разведке новых залежей шунгитовых пород Онежской структуры, а также позволяют проводить корреляцию скважин.

Исследование шунгитовых пород, приуроченных к залежам, находящимся на разных стратиграфических уровнях онежской

свиты палеопротерозоя Карелии [Дейнес и др., 2020], показало их значимое различие по углеродистому веществу и физико-химическим свойствам, в частности, по сорбционной активности и электрофизическим свойствам пород, важным для их практического использования.

Некоторые литохимические особенности шунгитовых пород месторождения Шуньга были выявлены и сопоставлены с шунгитовыми породами Мельничной залежи Толвуйской синклинали [Deines, 2020]. Установлена прямая корреляция между $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ и $(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2)$. Обратная корреляция, характерная шунгитовым породам купольных залежей, не выявлена. Четких границ между шунгитовыми породами с разным содержанием углерода нет. Шунгитовые породы Шуньгского месторождения отличаются от шунгитовых пород купольных залежей по всем литохимическим параметрам, за исключением железного модуля. Установленные геохимические закономерности могут помочь в корреляции разрезов скважин в пределах Онежской структуры.

Перспективы использования шунгитовых пород в инновационных технологиях

Шунгитовые породы существенно различаются по содержанию углеродистого вещества (шунгита), составу породообразующих и акцессорных минералов. При этом на начальных стадиях практического использования показано, что различные группы шунгитовых пород представляют собой полезное ископаемое различной практической ценности и возможного использования [Шунгиты..., 1984]. Основным полезным компонентом шунгитовых пород для одних направлений является углерод, для других – кремнезем. В то же время требование на сырье для производства ферросплавов ограничивает содержание глинозема, а для производства фосфора – окислов железа [Шунгиты..., 1984]. С учетом вещественного состава шунгитовых пород, их практической значимости, соответствия требованиям выявленных направлений использования, масштабов развития и условий залегания разработана геолого-промышленная классификация шунгитовых пород. С учетом содержания углерода и состава минеральной основы выделены группы шунгитовых пород, в обозначении которых отражена разновидность породы, генетический тип минеральной основы и преобладающий вид щелочного металла, например, породы III разновидности, хемогенные, калиевые (III-X-K) [Шунгиты..., 1984].

В настоящее время шунгитовые породы масштабно используют в металлургии, в частности в доменной выплавке литейных чугунов, в качестве сырья для синтеза металлического кремния и карбида кремния. Основные перспективы их практического использования связаны с решением экологических проблем. Шунгитсодержащие радиоэкранирующие материалы находят применение для создания лечебных комнат, экранирующих от электромагнитного смога и активирующих систему иммунной защиты человека. Шунгитовые породы способны глубоко чистить воду от различных органических и некоторых неорганических веществ и активно внедряются в процесс подготовки питьевой воды. Широко используются в фильтрах по очистке сточных вод от нефтепродуктов, в сельском хозяйстве как удобрение, повышающее урожайность и стойкость культур к заболеваниям, и как кормовая добавка к пище пушных зверей, свиней и птицы [Калинин, Ковалевский, 2013].

Накопленные к настоящему времени результаты широкого практического использования шунгитовых пород показывают, что их деление по технологическим типам на основе критериев вещественного состава явно недостаточно. В частности, установлено, что шунгитовые породы III-X-K ведут себя по-разному в металлургии, химической промышленности, строительстве и пр. в зависимости не только от химического состава, но также от структуры пород и углерода, что требует их разделения на подтипы или сорта. Вместе с тем следует отметить, что именно рассмотренные выше условия образования шунгитовых пород являются основным фактором, определяющим их строение и свойства. На основании современных геологических представлений появляется возможность определения закономерностей между особенностями залегания шунгитовых пород, их составом, строением углеродистого вещества и физико-химическими свойствами пород в целом.

В рамках Международной континентальной научной программы бурения (ICDP) в результате выполнения проекта (FAR-DEEP) показано, что локальная упорядоченность углеродистого вещества (УВ) связана с графитизацией, индуцированной минеральными подложками [van Zuilen et al., 2012]. Установлено, что поверхности кварца и хлорита могут инициировать и/или ускорять графитизацию осадочно-органического вещества при относительно низких степенях метаморфизма. При этом разница в степени упорядочения УВ между минералами может иметь последствия для геологи-

ческой интерпретации углеродистых структур, например, для определения пиковой температуры метаморфизма на основе спектроскопии комбинационного рассеяния. В частности, УВ в кварц- или хлорит-доминирующей зеленосланцевой породе могло бы получить иную степень структурной упорядоченности, чем УВ, внедренное в карбонатную породу той же зеленосланцевой фации. При изучении УВ шунгитовых пород из различных стратиграфических уровней залегания с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния установлена пиковая температура метаморфизма от 346 до 418 °С для разных шунгитовых пород [van Zuilen et al., 2012]. Выявленное воздействие минеральных компонент на упорядоченность УВ свидетельствует о том, что углерод не является пассивной составляющей, которая «несется» породой, а представляет собой активную компоненту, изменяющуюся совместно с минералами, образуя в конечном результате природный композиционный материал – шунгитовую породу.

Геохимические и физико-химические исследования шунгитовых пород различных стратиграфических уровней, проведенные в последнее время, показали наличие определенных корреляций между стратиграфическим положением горизонтов шунгитовых пород, их геохимией, пиковой температурой метаморфизма и физико-химическими свойствами [Дейнес и др., 2020]. С помощью рамановской спектроскопии по углеродистому геотермометру оценены пиковые температуры метаморфизма. Показано, что наименьшие температуры (316–324 °С) характерны для шунгитовых пород шестого горизонта, а наибольшие (356–379 °С) – для образцов второго горизонта как при их существенном различии, так и при относительном постоянстве для различных пород одного горизонта. Определены параметры физико-химических свойств шунгитовых пород, важных для их практического использования, сорбционной активности и электрофизических свойств. Наименьшую сорбционную активность и электрическую проводимость имеют породы шестого горизонта, хотя эта зависимость не является вполне однозначной и определяется также свойствами углеродистого вещества, его содержанием и распределением. Полученные результаты позволяют выделить промышленные типы шунгитовых пород по направлениям их наиболее эффективного использования, а также обратить внимание на определение тонких геологических закономерностей их генезиса, которые в настоящее время являются неочевидными.

Большинство направлений практического использования шунгитовых пород связано с их взаимодействием с водой. Наиболее полные работы проведены совместно с Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН [Рожкова и др., 2012]. Исследования химического состава растворов, образовавшихся при контакте шунгитовых пород с дистиллированной водой, показали различия в ионном составе. В частности, для растворов пород залежей Загогино и Лебещина среди анионов доминировали сульфаты (72–100 %-экв), при этом в растворах с породой залежи Лебещина отмечено значительное количество хлоридов (20 %-экв), а для образца из залежи Карнаволоок доминирующими анионами были нитраты (58 %-экв). Выщелачивание компонентов минеральной части шунгитовых пород разного генезиса определяется не только составом пород, но и значением pH, при понижении которого скорость процессов гидролиза отдельных минералов, в частности сульфидов, увеличивается. Вымывание ряда элементов (Na, Ca) из шунгитовых пород не зависит от кислотности среды. Проведенные опыты выявили превышение в растворах некоторых шунгитовых пород ПДК ряда элементов, в том числе тяжелых металлов (Ni, Cu, Fe, Cd, Pb), что ограничивает их применение для водоподготовки. Отмеченные тенденции гидролиза шунгитовых пород будут сохраняться в различных схемах очистки воды, что необходимо учитывать при разработке конкретных технологий водоподготовки и определении экологических рисков загрязнения водных ресурсов при разработке месторождений [Рожкова и др., 2012].

В последнее время все более актуальным становится решение проблем загрязнения окружающей среды с помощью экологически безопасных процессов на основе природных минеральных и биологических компонент. В рамках выполнения проекта KS1460 (SHEM-WP «Инновационные природные решения для очистки воды на основе технологии Шунгиты – Эффективные Микроорганизмы») по программе приграничного сотрудничества «Россия – Юго-Восточная Финляндия» приводятся результаты исследования шунгитовых пород различного генезиса для применения в инновационных способах очистки воды с совместным использованием полезной микрофлоры, эффективных микроорганизмов (дрожжей, молочнокислых бактерий и др.). Показано, что породы различных стратиграфических уровней (второго, четвертого и шестого), различающиеся по составу и строению, характеризуются разной степенью выщелачивания химических элементов, сорбционной активностью к кати-

онным и анионным комплексам и по-разному способны сорбировать из воды загрязняющие компоненты, в том числе тяжелые металлы. Установлено, что немодифицированная шунгитовая порода ингибирует функционирование эффективных микроорганизмов при непосредственном контакте, а для термически обработанной шунгитовой породы, напротив, наблюдается рост эффективных микроорганизмов [Kovalevski et al., 2020].

Одним из приоритетных направлений является возможность получения из шунгитовых пород перспективных материалов. В частности, в Институте геологии КарНЦ РАН разработан метод наноструктурирования шунгитовых пород с образованием гиперфуллереновых углеродных структур и нановолокнистых карбидов кремния для создания новых поколений композиционных материалов, обладающих повышенными эксплуатационными, в том числе радиоэкранирующими свойствами [Kovalevski et al., 2018]. Также совместно с Институтом геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН установлено, что обработка образцов шунгита при высоком давлении (15 ГПа) и температуре (1600 °С) приводит к трансформации шунгита в алмаз [Afanas'ev et al., 2020]. Предположенная методика синтеза наноразмерного поликристаллического алмаза на основе обработанного шунгита, который должен пройти стадию обогащения по углероду, может быть востребована для промышленных приложений, требующих сверхтвердые материалы.

Весьма перспективными представляются комплексные исследования, проводимые совместно с Институтом биологии КарНЦ РАН. В том числе по изучению биоактивности водных дисперсий шунгита, представляющих интерес как для биомедицинского применения, так и для оценки их негативного воздействия на водную среду [Goryunov et al., 2020]. Также высокий практический потенциал имеют работы по использованию шунгитовых пород в аквакультуре для борьбы с паразитами рыб, в которых показано, что шунгитовые породы, отобранные из разных горизонтов с доминирующим анионным составом водных вытяжек (сульфатов, хлоридов и нитратов), по-разному ингибируют жизнедеятельность паразитических организмов. В частности, возможно, путем формирования приповерхностного закисления, а также эмиссии хлора, инициирующих гибель микроорганизмов [Hagen et al., 2014]. Выявленные эффекты шунгитовых пород требуют проведения дальнейших специальных исследований по оценке их способности влиять

на паразитологический фон в бассейнах для выращивания рыб.

Заключение

Шунгитовые породы – углеродсодержащие породы Карелии с возрастом около 2 млрд лет, не имеющие аналогов в геологической истории Земли по форме проявлений, гигантским промышленным запасам, свойствам и строению углеродистого вещества. В Карельском научном центре РАН на протяжении более семидесяти лет шунгитовые породы изучаются с использованием современных методов исследований. В последние десятилетия при участии российских и международных организаций проводятся геологические и технологические исследования, в результате которых получены новые данные.

Проведена корреляция новых геологических разрезов в пределах Онежской палеопротерозойской структуры. Уточнены геодинамические обстановки формирования шунгитосодержащих пород. Показано, что не существовало перерыва между образованиями заонежской свиты людовикия и ятулийского надгоризонта. Установлено, что накопление органического вещества в палеопротерозойских породах Онежской структуры Карелии сравнимо с современными сверхгигантскими нефтяными месторождениями. Показано, что помимо литологических и геофизических маркирующих горизонтов имеется геохимическая (изотопная) аномалия, которая может быть использована для корреляции разрезов скважин, т. н. Уровень Шуньги.

Комплексные физико-химические и технологические исследования показали, что шунгитовые породы, как нерудное полезное ископаемое, имеют уникальные технологические свойства: высокую восстановительную активность в руднотермических процессах, электропроводность, термостойкость, радиоэкранирующие и сорбционные свойства, высокую удельную поверхность, износостойкость и т. д. В последние годы в КарНЦ РАН выявлены новые пути использования шунгитовых пород в инновационных технологиях, связанных с созданием новых материалов, решением экологических и природоохранных проблем, в том числе на стыке различных научных направлений.

Финансовое обеспечение исследований осуществлялось из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН в рамках НИР «Геология и генезис месторождений, минералогия и технология шунгитовых пород Онежской структуры».

Литература

Атлас текстур и структур шунгитоносных пород Онежского синклинория / Под ред. М. М. Филиппова, В. А. Мележика. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. 80 с.

Борисов П. А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: Госиздат КФССР, 1956. 92 с.

Геология шунгитоносных вулканогенно-осадочных образований протерозоя Карелии / Под ред. В. А. Соколова. Петрозаводск: Карелия, 1982. 208 с.

Горлов В. И. Онежские шунгиты: Дис. ... канд. геол.-мин. наук. Петрозаводск, 1984. 226 с.

Дейнес Ю. Е. Литохимические признаки шунгитоносных горизонтов Онежского синклинория // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 11. С. 111–115. doi: 10.17076/geo846

Дейнес Ю. Е., Ковалевский В. В., Кочнева И. В., Мошников И. А., Рожкова В. С. Физико-химические свойства шунгитовых пород различных стратиграфических уровней заонежской свиты // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 2. С. 84–89. doi: 10.17076/geo1187

Иностранцев А. А. Новый крайний член в ряду аморфного углерода // Горный журн. 1879. Т. 2, № 5–6. С. 314–342

Исанина Э. В., Крупнова Н. А., Шаров Н. В. Структура литосферы вдоль профиля МОВЗ Гдов-Спасская Губа // Геофизический журн. 2004. Т. 26, № 2. С. 112–121.

Калинин Ю., Ковалевский В. Шунгитовые породы: горизонты научного поиска // Наука в России. 2013. № 6. С. 66–72.

Крупеник В. А., Свешникова К. Ю. Корреляция разреза ОПС с опорными разрезами Онежской структуры // Онежская палеопротерозойская структура / Ред. Л. В. Глушанин и др. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. С. 190–194.

Купряков С. В. Отчет о результатах поисковых работ на шунгитовые породы, проведенных в Онежской мульде в 1985–88 гг. Петрозаводск, 1988. 148 с.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Рожкова В. С., Ковалевский В. В., Кочнева И. В., Лозовик П. А. О возможности использования шунгитовых пород Карелии в водоподготовке // Горный журнал. 2012. № 5. С. 64–67.

Ромашкин А. Е., Лепланд А., Йусу Л., Рычанчик Д. В., Голубев А. И. Фосфоритовый горизонт высокоуглеродистых пород людиковия онежской структуры // Геология и полезные ископаемые Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2012. С. 62–69.

Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: Карел. науч. центр, 2002. 280 с.

Филиппов М. М., Дейнес Ю. Е. Перспективы воспроизводства запасов шунгитов в Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 68–72. doi: 10.17580/gzh.2019.03.13

Филиппов М. М., Дейнес Ю. Е. Субпластовый тип месторождений шунгитов Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2018. 261 с.

Филиппов М. М., Дейнес Ю. Е., Лохов К. И., Первунина А. В., Лохова О. В. Новый генетический тип шунгитоносных пород палеопротерозоя Онежской структуры // Региональная геология и металлогения. 2016. Вып. 67. С. 95–106.

Филиппов М. М., Есипко О. А. Геолого-геофизические маркирующие горизонты палеопротерозоя Онежской структуры. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. 250 с.

Филиппов М. М., Клабуков Б. Н., Суханов А. В. Экспериментальное определение основных параметров систем купольных шунгитоносных структур Толвуйской синклинали // Российский геофизический журнал. 2004. № 3. С. 25–30.

Шунгиты Карелии и пути их комплексного использования / Под ред. В. А. Соколова и Ю. К. Калинина. Петрозаводск: Карелия, 1975. 240 с.

Шунгиты – новое углеродистое сырье / Под ред. В. А. Соколова, Ю. К. Калинина, Е. Ф. Дюкжиева. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1984. 182 с.

Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.

Afanas'ev V. P., Litasov K. D., Goryainov S. V., Kovalevskii V. V. Raman spectroscopy of nanopolycrystalline diamond produced from shungite at 15 GPa and 1600°C // JETP Letters. 2020. Vol. 111, no. 4. P. 218–224. doi: 10.1134/S0021364020040050

Cornelius C. D. Classification of natural bitumen: A physical and chemical approach. In: Exploration for Heavy Crude Oil and Natural Bitumen. Meyer R. F. (Ed.) // AAPG Studies in Geology. 1987. No. 25. Amer. Assoc. Petroleum Geologists, Tulsa, OK. P. 165–174.

Deines Yu. Lithochemical features of shungites from Shunga Deposit (Onega Basin, Russia) // Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources: Proceed. 4th Kazan Golovkinsky Stratigraphic Meeting 2020. Bologna: Filodiritto Publ., 2020. P. 20–24. doi: 10.26352/E922_KAZAN2020

Goryunov A., Rozhkov S., Rozhkova N. Fatty acid transfer between serum albumins and shungite carbon nanoparticles and its effect on protein aggregation and association // Eur. Biophys. J. 2020. Vol. 49, no. 1. P. 85–94. doi: 10.1007/s00249-019-01414-y

Hagen A. G., Hytterod S., Olstad K. Low concentrations of sodium hypochlorite affect population dynamics in *Gyrodactylus salaris* (Malmberg, 1957): Practical guidelines for the treatment of the Atlantic salmon, *Salmo salar* L. parasite // J. Fish Diseases. 2014. P. 37(12). doi: 10.1111/jfd.12218

Kovalevski S. V., Moshnikov I. A., Kovalevski V. V. Heat-treated nano-structured shungite rocks and electrophysical properties associated // Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics. 2018. Vol. 9(4). P. 468–472. doi: 10.17586/2220-8054-2018-9-4-468-472

Kovalevski V. V., Reinikainen S., Reinikainen V., Rozhkova V., Sihvonen T. Shungite rocks of varying genesis in innovative water treatment technologies // Труды КарНЦ РАН. 2020. № 6. С. 97–105. doi: 10.17076/them1255

Kreitsmann T., Kulaviir M., Lepland A., Paiste K., Paiste P., Prave A. R., Sepp H., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Kirsimäe K. Hydrothermal dedolomitisa-

tion of carbonate rocks of the Paleoproterozoic Zaonega Formation, NW Russia – Implications for the preservation of primary C isotope signals // *Chem. Geol.* 2019. Vol. 512. P. 43–57. doi: 10.1016/j.chemgeo.2019.03.002

Kump L. R., Junium C., Arthur M. A., Brasier A., Fallick A., Melezhik V., Lepland A., Črne A. E., Luo G. M. Isotopic evidence for massive oxidation of organic matter following the great oxidation event // *Science*. 2011. Vol. 334. P. 1694–1696. doi: 10.1126/science.1213999

Lepland A., Joosu L., Kirsimäe K., Prave A. R., Romashkin A. E., Črne A. E., Martin A. P., Fallick A. E., Somelar P., Üpraus K., Mänd K., Roberts N. M. W., van Zuilen M. A., Schreiber R. W., Schreiber A. Potential influence of sulphur bacteria on Palaeoproterozoic phosphogenesis // *Nat. Geosci.* 2013. Vol. 7. P. 20–24. doi: 10.1038/NNGEO2005

Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Larsen O. Karelian shungite – an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry // *Earth Sci. Rev.* 1999. Vol. 47. P. 1–40. doi: 10.1016/S0012-8252(99)00027-6

Melezhik V. A., Črne A. E., Prave A. R., Lepland A., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Hanski E. J., Fallick A. E., Medvedev P. V., Luo Zh. The Onega Basin // *Reading the Archive of Earth's Oxygenation*. Vol. 2: The Core Archive of the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences / Eds. V. A. Melezhik et al. Springer: Heidelberg, 2013. P. 769–1046

Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Lepland A., Rychanchik D. V., Deines Yu. E., Medvedev P. V.,

Romashkin A. E., Strauss H. Petroleum surface oil seeps from Palaeoproterozoic petrified giant oilfield // *Terra Nova*. 2009. Vol. 21. P. 119–126. doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00864.x

Paiste K., Lepland A., Zerkle A. L., Kirsimäe K., Izon G., Patel N. K., McLean F., Kreitsmann T., Mänd K., Bui T. H., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Prave A. R. Multiple sulphur isotope records tracking basinal and global processes in the 1.98 Ga Zaonega Formation, NW Russia // *Chem. Geol.* 2018. Vol. 499. P. 151–164. doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.09.025

Qu Yu., Črne A. E., Lepland A., van Zuilen M. A. Methanotrophy in a Paleoproterozoic oil field ecosystem, Zaonega Formation, Karelia, Russia // *Geobiology*. 2012. Vol. 10. P. 467–478. doi: 10.1111/gbi.12007

Strauss H., Melezhik V. A., Lepland A., Fallick A. E., Hanski E. J., Filippov M. M., Deines Yu. E., Illing C. J., Črne A. E., Brasier A. E. Enhanced accumulation of organic matter: The Shunga Event // *Reading the Archive of Earth's Oxygenation*. Vol. 3: Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences / Eds. V. A. Melezhik et al. Heidelberg: Springer, 2013. P. 1195–1273. doi: 10.1007/978-3-642-29670-3_6

van Zuilen M. A., Fliegel D., Wirth R., Lepland A., Qu Yu., Schreiber A., Romashkin A. E., Philippot P. Mineral-templated growth of natural graphite films // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2012. Vol. 83. P. 252–262. doi: 10.1016/j.gca.2011.12.030

Поступила в редакцию 05.04.2021

References

Atlas tekstur i struktur shungitonosnykh porod Onezhskogo sinklinoriya [Atlas of textures and structures of shungite-bearing rocks of Onega synclinorium]. Eds. M. M. Filippov, V. A. Melezhik. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2007. 80 p.

Borisov P. A. Karel'skie shungity [Karelian shungite]. Petrozavodsk: Gosizdat KF SSSR, 1956. 92 p.

Deines Yu. E. Litokhimicheskie priznaki shungitonosnykh gorizontov Onezhskogo sinklinoriya [Lithochemical features of shungite rock horizons in the Onega structure]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 11. P. 111–115. doi: 10.17076/geo846

Deines Yu. E., Kovalevski V. V., Kochneva I. V., Moshnikov I. A., Rozhkova V. S. Fiziko-khimicheskie svoystva shungitovykh porod razlichnykh stratigraficheskikh urovnei zaonezhskoi svity [Physical and chemical properties of shungite rocks from different stratigraphic levels of the Zaonega formation]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2020. No. 2. P. 84–89. doi: 10.17076/geo1187

Filippov M. M. Shungitonosnye porody Onezhskoi struktury [Shungite-bearing rocks of the Onega structure]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2002. 280 p.

Filippov M. M., Deines Yu. E. Perspektivy vosproizvodstva zapasov shungitov v Karelii [Prospects for reproduction of shungite reserves in Karelia]. *Gornyi zhurn.* 2019. No. 3. P. 68–72. doi: 10.17580/gzh.2019.03.13

Filippov M. M., Deines Yu. E. Subplastovyi tip mesrozhdennii shungitov Karelii [Subplast type of shungite

rocks deposits of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2018. 261 p.

Filippov M. M., Deines Yu. E., Lokhov K. I., Pervunina A. V., Lokhova O. V. Novyi geneticheskii tip shungitonosnykh porod paleoproterozoya Onezhskoi struktury [A new genetic type of shungite-bearing rocks of the Palaeoproterozoic Onega structure]. *Regional'naya geol. i metallogeniya* [Regional Geol. and Metallogeny]. 2016. Iss. 67. P. 95–106

Filippov M. M., Esipko O. A. Geologo-geofizicheskie markiruyushchie gorizonty paleoproterozoya Onezhskoi struktury [Geological and geophysical marking horizons of the Palaeoproterozoic Onega structure]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2016. 250 p.

Filippov M. M., Klabukov B. N., Sukhanov A. V. Eksperimental'noe opredelenie osnovnykh parametrov sistem kupol'nykh shungitonosnykh struktur Tolvuiskoi sinklinali [Experimental determination of the main parameters of the systems of domed shungite-bearing structures of the Tolvuya syncline]. *Rossiiskii geofizicheskii zhurn.* [Russ. Geophysical J.]. 2004. No. 3. P. 25–30.

Geologiya shungitonosnykh vulkanogenno-osadochnykh obrazovaniy proterozoya Karelii [Geology of shungite-bearing volcanogenic-sedimentary formations of the Proterozoic of Karelia]. Ed. V. A. Sokolov. Petrozavodsk: Kareliya, 1982. 208 p.

Gorlov V. I. Onezhskie shungity [Onega shungite]: PhD (Cand. of Geol.-Min.) thesis. Petrozavodsk, 1984. 226 p.

Inostrantsev A. A. Novyi krainii chlen v ryadu amorf-nogo ugleroda [A new extreme term in the series of amorphous carbon]. *Gornyi zhurn.* 1879. Vol. 2, no. 5–6. P. 314–342.

Isanina E. V., Krupnova N. A., Sharov N. V. Struktura litosfery vdol' profilya MOVZ Gdov-Spasskaya Guba [Lithosphere structure along the MOVZ profile Gdov-Spasskaya Guba]. *Geofizicheskii zhurn.* [Geophysical J.]. 2004. Vol. 26, no. 2. P. 112–121.

Kalinin Yu., Kovalevskii V. Shungitovye porodny: gorizonty nauchnogo poiska [Shungite rocks: horizons of scientific research]. *Nauka v Rossii* [Science in Russia]. 2013. No. 6. P. 66–72.

Krupenik V. A., Sveshnikova K. Yu. Korrelyatsiya razreza OPS s opornymi razrezami Onezhskoi struktury [Correlation of the Onega parametric hole with the reference sections of the Onega Structure]. *Onezhskaya paleoproterozoiskaya struktura* [The Onega Palaeoproterozoic structure]. Eds. L. V. Glushanin et al. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. P. 190–194.

Kupryakov S. V. Otchet o rezul'tatakh poiskovykh rabot na shungitovye porodny, provedennykh v Onezhskoi mul'de v 1985–88 gg. [Report on the results of search operations conducted in the Onega structure in 1985–88]. Petrozavodsk, 1988. 148 p.

The Onega Palaeoproterozoic structure (geology, tectonics, deep structure, and minerageny). Eds. L. V. Glushanin, N. V. Sharov, V. V. Schiptsov. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2011. 431 p.

Romashkin A. E., Lepland A., Joosu L., Rychanchik D. V., Golubev A. I. Fosforitovyi gorizont vysokouglerodistykh porod lyudikoviyi onezhskoi struktury [Phosphorite horizon of the Ludikovian high-carbon rocks of the Onega structure]. *Geol. i poleznye iskopayemye Karelii* [Geol. and Useful Minerals of Karelia]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2012. P. 62–69.

Rozhkova V. S., Kovalevskii V. V., Kochneva I. V., Lovikov P. A. O vozmozhnosti ispol'zovaniya shungitovykh porod Karelii v vodopodgotovke [On the possible use of shungite rocks of Karelia in water conditioning and purification]. *Gornyi zhurn.* 2012. No. 5. P. 64–67.

Shungity Karelii i puti ikh kompleksnogo ispol'zovaniya [Shungite in Karelia and ways of their complex use]. Eds. V. A. Sokolov, Yu. K. Kalinin. Petrozavodsk: Karelia, 1975. 240 p.

Shungity – novoe uglerodistoe syr'e [Shungite is a new carbonaceous raw material]. Eds. V. A. Sokolov, Yu. K. Kalinin. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR, 1984. 182 p.

Yudovich Ya. E., Ketris M. P. Osnovy litokhimii [Fundamentals of lithochemistry]. St. Petersburg: Nauka, 2000. 479 p.

Afanas'ev V. P., Litasov K. D., Goryainov S. V., Kovalevskii V. V. Raman spectroscopy of nanopolycrystalline diamond produced from shungite at 15 GPa and 1600 °C. *JETP Letters*. 2020. Vol. 111, no. 4. P. 218–224. doi: 10.1134/S0021364020040050

Cornelius C. D. Classification of natural bitumen: A physical and chemical approach. In: Exploration for Heavy Crude Oil and Natural Bitumen. Meyer R. F. (Ed.). *AAPG Studies in Geology*. 1987. No. 25. Amer. Assoc. Petroleum Geologists, Tulsa, OK. P. 165–174.

Deines Yu. Lithochemical features of shungites from Shunga Deposit (Onega Basin, Russia). *Sedimentary Earth Systems: Stratigraphy, Geochronology, Petroleum Resources: Proceed. 4th Kazan Golovkinskiy Stratigraphic Meeting 2020*. Bologna: Filodiritto Publ., 2020. P. 20–24. doi: 10.26352/E922_KAZAN2020

Goryunov A., Rozhkov S., Rozhkova N. Fatty acid transfer between serum albumins and shungite carbon nanoparticles and its effect on protein aggregation and association. *Eur. Biophys. J.* 2020. Vol. 49, no. 1. P. 85–94. doi: 10.1007/s00249-019-01414-y

Hagen A. G., Hytterod S., Olstad K. Low concentrations of sodium hypochlorite affect population dynamics in *Gyrodactylus salaris* (Malmberg, 1957): Practical guidelines for the treatment of the Atlantic salmon, *Salmo salar* L. parasite. *J. Fish Diseases*. 2014. P. 37(12). doi: 10.1111/jfd.12218

Kovalevskii S. V., Moshnikov I. A., Kovalevskii V. V. Heat-treated nano-structured shungite rocks and electrophysical properties associated. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*. 2018. Vol. 9(4). P. 468–472. doi: 10.17586/2220-8054-2018-9-4-468-472

Kovalevskii V. V., Reinikainen S., Reinikainen V., Rozhkova V., Sihvonon T. Shungite rocks of varying genesis in innovative water treatment technologies. *Transaction KarRC RAS*. 2020. No. 6. P. 97–105. doi: 10.17076/them1255

Kreitsmann T., Kulaviir M., Lepland A., Paiste K., Paiste P., Prave A. R., Sepp H., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Kirsimäe K. Hydrothermal dedolomitisation of carbonate rocks of the Paleoproterozoic Zaonega Formation, NW Russia – Implications for the preservation of primary C isotope signals. *Chem. Geol.* 512. 2019. P. 43–57. doi: 10.1016/j.chemgeo.2019.03.002

Kump L. R., Junium C., Arthur M. A., Brasier A., Fallick A., Melezhik V., Lepland A., Črne A. E., Luo G. M. Isotopic evidence for massive oxidation of organic matter following the great oxidation event. *Science*. 2011. Vol. 334. P. 1694–1696. doi: 10.1126/science.1213999

Lepland A., Joosu L., Kirsimäe K., Prave A. R., Romashkin A. E., Črne A. E., Martin A. P., Fallick A. E., Somelar P., Úpraus K., Mänd K., Roberts N. M. W., van Zuilen M. A., Schreiber R. W., Schreiber A. Potential influence of sulphur bacteria on Palaeoproterozoic phosphogenesis. *Nat. Geosci.* 2013. Vol. 7. P. 20–24. doi: 10.1038/NGEO2005

Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Larsen O. Karelian shungite – an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry. *Earth Sci. Rev.* 1999. Vol. 47. P. 1–40. doi: 10.1016/S0012-8252(99)00027-6

Melezhik V. A., Črne A. E., Prave A. R., Lepland A., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Hanski E. J., Fallick A. E., Medvedev P. V., Luo Zh. The Onega Basin. *Reading the Archive of Earth's Oxygenation*. Vol. 2: The Core Archive of the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences. Eds. V. A. Melezhik et al. Springer: Heidelberg, 2013. P. 769–1046

Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Lepland A., Rychanchik D. V., Deines Yu. E., Medvedev P. V., Romashkin A. E., Strauss H. Petroleum sur-

face oil seeps from Palaeoproterozoic petrified giant oil-field. *Terra Nova*. 2009. Vol. 21. P. 119–126. doi: 10.1111/j.1365-3121.2009.00864.x

Paiste K., Lepland A., Zerkle A. L., Kirsimäe K., Izon G., Patel N. K., McLean F., Kreitsmann T., Mänd K., Bui T. H., Romashkin A. E., Rychanchik D. V., Prave A. R. Multiple sulphur isotope records tracking basinal and global processes in the 1.98 Ga Zaonega Formation, NW Russia. *Chem. Geol.* 2018. Vol. 499. P. 151–164. doi: 10.1016/j.chemgeo.2018.09.025

Qu Yu., Črne A. E., Lepland A., van Zuilen M. A. Methanotrophy in a Paleoproterozoic oil field ecosystem, Zaonega Formation, Karelia, Russia. *Geobiology*. 2012. Vol. 10. P. 467–478. doi: 10.1111/gbi.12007

Strauss H., Melezhik V. A., Lepland A., Fallick A. E., Hanski E. J., Filippov M. M., Deines Yu. E., Illing C. J.,

Črne A. E., Brasier A. E. Enhanced accumulation of organic matter: The Shunga Event. *Reading the Archive of Earth's Oxygenation*. Vol. 3: Global Events and the Fennoscandian Arctic Russia – Drilling Early Earth Project. Series: Frontiers in Earth Sciences. Eds. V. A. Melezhik et al. Heidelberg: Springer, 2013. P. 1195–1273. doi: 10.1007/978-3-642-29670-3_6

van Zuilen M. A., Fliegel D., Wirth R., Lepland A., Qu Yu., Schreiber A., Romashkin A. E., Philippot P. Mineral-templated growth of natural graphite films. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2012. Vol. 83. P. 252–262. doi: 10.1016/j.gca.2011.12.030

Received April 05, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Дейнес Юлия Евгеньевна

научный сотрудник
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: deines@krc.karelia.ru
тел.: (8142) 570080

Ковалевский Владимир Викторович

главный научный сотрудник, д. г.-м. н.
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: kovalevs@krc.karelia.ru

Первунина Аэлита Валериевна

старший научный сотрудник, к. г.-м. н.
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: aelita@krc.karelia.ru

Ромашкин Александр Евгеньевич

научный сотрудник
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: roma@krc.karelia.ru

Рычанчик Дмитрий Владимирович

старший научный сотрудник
Институт геологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: rychanch@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Deines, Yulia

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: deines@krc.karelia.ru

Kovalevski, Vladimir

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: kovalevs@krc.karelia.ru

Pervunina, Aelita

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: aelita@krc.karelia.ru

Romashkin, Alexander

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: roma@krc.karelia.ru

Rychanchik, Dmitri

Institute of Geology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: rychanch@krc.karelia.ru

Иешко Евгений Павлович

главный научный сотрудник, д. б. н., проф.
Институт биологии КарНЦ РАН,
Федеральный исследовательский центр
«Карельский научный центр РАН»
ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия,
Россия, 185910
эл. почта: ieshko@krc.karelia.ru

Ieshko, Evgeny

Institute of Biology, Karelian Research Centre,
Russian Academy of Sciences
11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia
e-mail: ieshko@krc.karelia.ru