

УДК 551.243

DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-5-22

## Локальные геохимические особенности нижнепалеозойских пород в районе Дудергофских дислокаций (северо-запад Русской плиты)

Е. Н. Терехов, С. Ю. Колодяжный, А. С. Балугев, О. И. Окина

Геологический институт РАН, (ГИН РАН) 119017, Москва, Пыжевский пер, 7, e-mail: terekhoff.zhenya@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.10.2020 г., принята к печати 14.11.2020 г.

**Объект исследования.** В пределах района Дудергофских дислокаций платформенного чехла южного обрамления Балтийского щита проведено изучение вещественного состава кембрий-ордовикских отложений, которые ранее являлись объектом структурных исследований. **Материалы и методы.** Методом ИСП-МС изучены 14 проб песчаников, известняков, фосфоритов и черных сланцев, которые слагают как слабодислоцированные пластовые формы (стратифицируемые горизонты), так и сильнодеформированные образования, а также секущие штокообразные и дайкообразные тела. Проведены минералогические исследования. **Результаты.** Геохимические исследования показали, что в зонах тектонических нарушений отложения нижнего палеозоя характеризуются высокими содержаниями ряда микроэлементов, значительно превышающими кларковые значения для осадочных пород. Это касается таких химических элементов, как Be, Sc, V, Co, Ni, Cu, Mo, Pb, Th, U. При этом концентрации V и U выше, чем в разрабатываемых месторождениях Эстонии и Швеции. Анализ кембрийских песков саблинской свиты показывает, что областью питания для их образования не могла быть восточная (архейская) часть Балтийского щита. Наличие в песках саблинской свиты лейкоксена – минерала, образовавшегося по ильмениту под воздействием высоких температур, и присутствие механически неустойчивых минералов в дайкоподобных образованиях свидетельствуют в пользу влияния на осадочный чехол глубинных флюидов, потоки которых перемещались по разломным зонам и выносили в приповерхностные слои земной коры перечисленные выше химические элементы. Все это указывает на эндогенную, а не экзогенную (гляциальную) природу вторичных структурно-вещественных преобразований в районе Дудергофских дислокаций, а также их генетическую связь с деформациями в Балтийско-Мезенской сдвиговой зоне.

**Ключевые слова:** черные сланцы, фосфориты, кварциты, лейкоксен, Дудергофские дислокации, рудогенез, флюиды

### Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-05-00485) и в соответствии с планами фундаментальных исследований ГИН РАН

## Local geochemical features of Lower Paleozoic rocks in the area of Duderhof dislocations (North-West of the Russian plate)

Evgenii N. Terekhov, Sergei Yu. Kolodyazhny, Aleksandr S. Baluev, Olga I. Okina

Geological institute RAS, 7 Pyzhevsky l., Moscow 119017, Russia, e-mail: terekhoff.zhenya@yandex.ru

Received 05.10.2020, accepted 14.11.2020

**Research subject.** A geochemical study of Cambrian-Ordovician deposits was carried out within the area of the Duderhof dislocations of the platform cover of the southern frame of the Baltic shield. **Materials and methods.** The ICP-MS method was used to study 14 samples of sandstones, limestone, phosphorites and black shales, which comprise both weakly dislocated stratified formations (stratified horizons) and strongly deformed formations, as well as secant dome-like and dike-like bodies. **Results.** Geochemical studies showed that, in the zones of tectonic disturbances, lower Paleozoic deposits are characterized by high concentrations of a number of trace elements, significantly exceeding the Clark values for sedimentary rocks. This applies to such chemical elements, as Be, Sc, V, Co, Ni, Cu, Mo, Pb, Th and U. At the same time, the concentrations of V and U are higher than those in the developed fields of Estonia and Sweden. An analysis of the

**Для цитирования:** Терехов Е.Н., Колодяжный С.Ю., Балугев А.С., Окина О.И. (2021) Локальные геохимические особенности нижнепалеозойских пород в районе Дудергофских дислокаций (северо-запад Русской плиты). *Литосфера*, 21(1), 5–22. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-5-22

**For citation:** Terekhov E.N., Kolodyazhny S.Yu., Baluev A.S., Okina O.I. (2021) Local geochemical features of Lower Paleozoic rocks in the area of Duderhof dislocations (North-West of the Russian plate). *Litosfera*, 21(1), 5–22. DOI: 10.24930/1681-9004-2021-21-1-5-22

© Е.Н. Терехов, С.Ю. Колодяжный, А.С. Балугев, О.И. Окина, 2021

cambriansands of the sablin formation showed that the eastern (Archean) part of the Baltic shield could not have been the source of food for their formation. The presence of leucoxene in the sands of the Sablinsky formation, a mineral formed by ilmenite under the influence of high temperatures, and the presence of mechanically unstable minerals in dike-like formations, indicate the influence of deep fluids on the sedimentary cover, whose flows moved along fault zones and carried the above-mentioned chemical elements to the near-surface layers of the earth's crust. All this points to the endogenous rather than exogenous (glacial) nature of secondary structural-material transformations in the area of the Duderhof dislocations, as well as their genetic relationship with deformations in the Baltic-Mezen shear zone.

**Keywords:** *black shales, phosphorites, quartzites, leucoxene, Duderhof dislocations, orogenesis, fluids*

#### Funding information

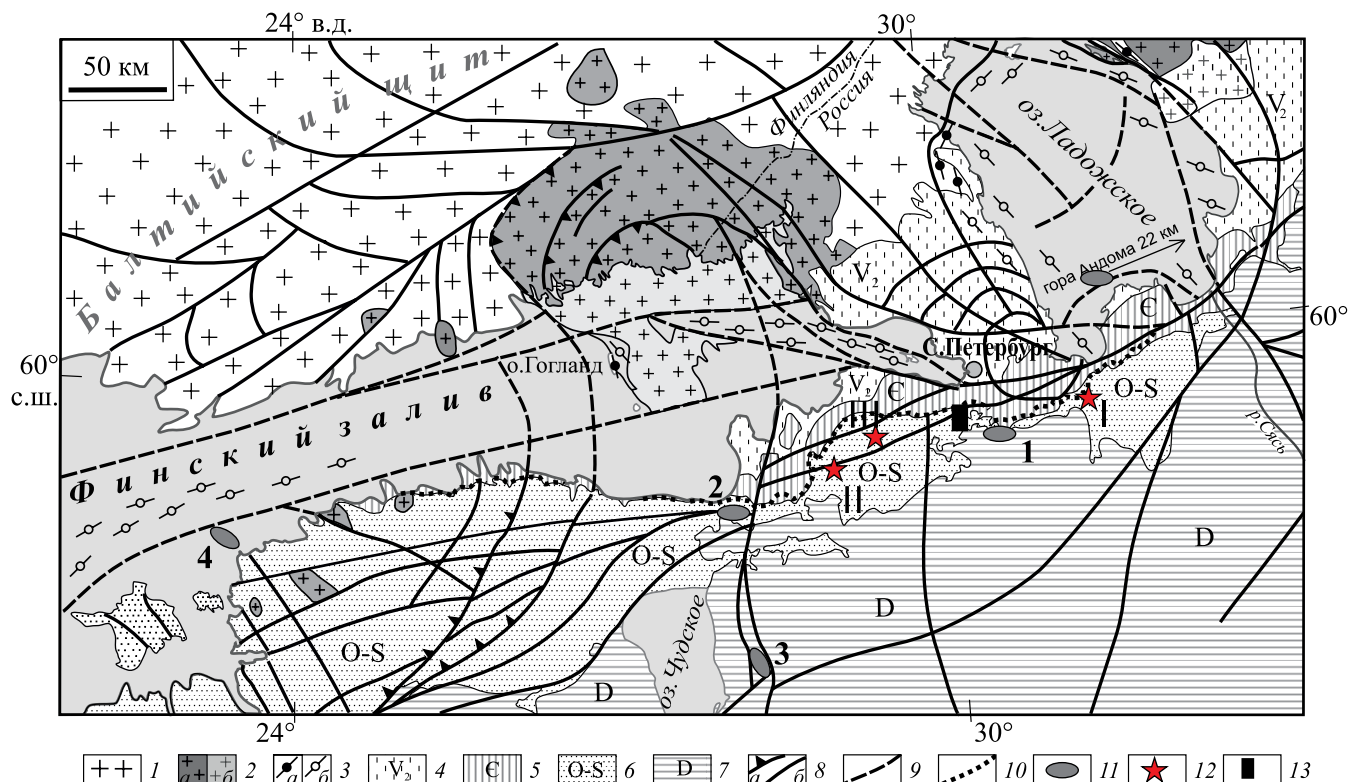
*This work was financially supported by Project No. 18-05-00485 and in accordance with the basic research plans of the institute of the Russian Academy of Sciences*

## ВВЕДЕНИЕ

Феномен так называемых Дудергофских дислокаций и связанных с ними морфоструктурно Дудергофских высот, расположенных в северо-западной части Русской плиты (южнее Санкт-Петербурга), уже более столетия вызывает неподдельный интерес у исследователей и непрекращающуюся до сих пор дискуссию о происхождении этих структур. В связи с тем, что эта территория являлась ареной деятельности плейстоценовых ледников, данные дислокации и связанные с ними формы рельефа чаще рассматривались в связи с гляциодинамическими процессами (Геология СССР..., 1971; Лобанов, 1976; Малаховский, Саммет, 1982; Малаховский, Амантов, 1991). В то же время в ряде работ отмечалась связь такого рода структур с глубинными тектоническими зонами, контролирующими строение докембрийского фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП), что ставило под сомнение гляциодинамические модели их формирования (Можаяев, 1973; Чувардинский, 2012; Колодяжный, 2016; Колодяжный и др., 2020а, б). Исследования последних лет показали, что Дудергофская структура может являться одним из ключевых объектов для понимания природы Балтийско-Мезенской тектонической зоны и флексуры Полканова, приуроченных к границе Балтийского щита и Русской плиты (рис. 1) (Колодяжный, 2016; Колодяжный и др., 2020а, б). Кроме структурных исследований, для изучения этого феномена (аномально складчатые породы чехла Русской плиты) важную роль могут играть исследования вещественного состава слагающих их пород, тем более что ранее отмечалось, что в пределах площади Дудергофских дислокаций крупные разломы несут следы вторичной минерализации магнезита, малахита и других минералов (Никитин, 2008).

Важной особенностью кембрий-ордовикских осадочных отложений, которые обрамляют юж-

ный край Балтийского щита и образуют основание плитного чехла Восточно-Европейской платформы, являются породы, аномально обогащенные V, Ti, P, Mo, U, Re, Rb, Pt, Pd, REE, W. Это так называемые диктионемовые черные сланцы и оболочковые песчаники с фосфоритами (копорская и тосненская свиты), которые, так же как и пески (саблинская свита), слагают пласты, интерпретируемые как стратиграфические горизонты. Физические свойства некоторых металлов, в частности рения, повышенные концентрации которого известны в диктеонемовых сланцах, указывают на вулканическую природу этих микроэлементов, вплоть до того, что некоторые исследователи считают, что источником этих металлов являлись каледонские вулканы в районе Скандинавских гор (Вялов и др., 2013). Несмотря на то что черные сланцы и фосфориты в южном обрамлении Балтийского щита разрабатывались на уран, фосфориты и квасцы и являются перспективными на целый ряд редких и благородных металлов, их генезис и особенно источники рудных компонентов, а также структурное положение остаются дискуссионными (Енгальчев, 2011; Батулин, Ильин, 2013; Вялов и др., 2013). Рассматриваемые горизонты выходят на поверхность вдоль современной морфоструктуры, известной как Балтийско-Ладужский глинт. Южнее этого регионально выраженного уступа они прослежены бурением лишь на несколько километров, после чего выклиниваются, тогда как вмещающие их толщи нижнего палеозоя в южном направлении распространены на сотни километров. В целом следует отметить пространственную и, возможно, генетическую связь рудных горизонтов нижнего палеозоя с одной из крупнейших тектонических структур южного обрамления Балтийского щита, известной как Балтийско-Мезенская сдвиговая зона (Афанасов, Казак, 2009; Колодяжный и др., 2020а, б) (см. рис. 1). В полосе южнее глинта, а местами и на его продолжении (го-



**Рис. 1.** Геолого-структурная схема Балтийско-Мезенской зоны сдвига и положение участков аномальной складчатости пород чехла, по (Колодяжный, 2016; Колодяжный и др., 2020а, б) с дополнениями.

1 – дорифейские породы Балтийского щита; 2 – граниты рапакиви: а – на суше, б – в акватории моря и под венд-палеозойским чехлом; 3 – рифейские образования: а – на суше, б – в акватории; 4–7 чехол Русской плиты: 4 – венд, 5 – кембрий, 6 – ордовик-силур, 7 – девон; 8 – разломы: а – наклонные, б – крутые; 9 – предполагаемые разломы в акватории; 10 – Балтийско-Ладожский глинт; 11 – участки аномальной складчатости: 1 – Павловский, 2 – Вайварских (Синих) гор, 3 – Мишиной горы, 4 – о-ва Осмуссаар; 12 – урановорудные объекты, приуроченные к границе вендских отложений и пород фундамента: I – Славянское, II – Ратницкое, III – Рябиновское; 13 – район Дудергофских дислокаций.

**Fig. 1.** Geological and structural diagram of the Baltic-Mezen lineament and the position of areas of anomalous folding of cover rocks, according to (Kolodyazhnyi, 2016; Kolodyazhnyi et al., 2020a, б) with additions.

1 – Preriplean rocks of the Baltic shield; 2 – rapakivi granites: а – on land, б – in the sea and under the Vend-Paleozoic cover; 3 – Riphean formations: а – on land, б – in the water area; 4–7 cover of the Russian plate: 4 – Vend, 5 – Cambrian, 6 – Ordovician-Silurian, 7 – Devonian; 8 – faults: а – inclined, б – steep; 9 – supposed faults in the water area; 10 – Baltic-Ladoga glint; 11 – areas of abnormal folding: 1 – Pavlovsky, 2 – Vaivar (Blue) mountains, 3 – Mishina mountains, 4 – island Osmussaar; 12 – uranium ore objects located on the border of Vendian deposits and basement rocks: I – Slavyanskoe, II – Ratnitskoe, III – Ryabinovskoe; 13 – Duderhofsky dislocations.

ра Андома – восточнее, о-в Осмуссар – западнее) известны участки интенсивной складчатости, которые трактуются как гляциодислокации (Геология СССР..., 1971; Малаховский, Саммет, 1982; Малаховский, Амантов, 1991) или как тектонические нарушения (Можаев, 1973; Пуура, Туулинг, 1988; Чувардинский, 2012; Колодяжный и др., 2020а, б). В значительной мере под влиянием идей, связанных с гипотезой флюидного образования уральских алмазов (флюидизатов или вишеритов), на северо-западе Русской плиты было выявлено большое количество объектов с так называемыми “ксеногенными” минералами и выделены участки тектоно-магматической активизации (ТМА). По мне-

нию некоторых авторов, на платформах наиболее заметно результаты ТМА проявляются под экранами регионально выраженных поверхностей, а в чехле – над ослабленными глубинными зонами в виде флюидной проработки пород (Скопенко и др., 1998; Афанасов, Николаев, 2003; Якобсон и др., 2003; Афанасов и др., 2008; Афанасов, Казак, 2009). В свете этих взглядов интересно, что в полосе Балтийско-Ладожской моноклинали (т. е. на одном из фрагментов Балтийско-Мезенской сдвиговой зоны) известно несколько урановорудных объектов (Славянское, Рябиновское, Ратницкое), приуроченных к основанию вендского разреза (гдовский горизонт) и верхней части фундамента (см. рис. 1).

Как и для большинства месторождений типа несогласия, в пределах этих проявлений возрасты руд (по свинцу) указывают на многочисленные периоды тектоно-магматической активизации: 600–500, 400–380, 230–175 и даже 5 млн лет. При этом урановые месторождения, приуроченные к диктионемовым ордовикским сланцам (месторождения Котловское, Раноловское, Кайболовское, Красносельское), залегают непосредственно над урановыми объектами, находящимися в подошве вендских отложений (Енгальчев, 2011).

Поэтому цель данной работы – изучение и анализ особенностей химического и минерального состава кембрийско-ордовикских образований, участвующих в строении Дудергофских складчатых и разрывных структур и являющихся своеобразными индикаторами тектонических событий, и связанных с ними процессов рудогенеза.

### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Пробы пород кембро-ордовикского разреза отобраны из свежевырытой канавы в 2015 г., расположенной на склонах горы Кирхгоф в районе горнолыжного курорта Туутари Парк. Канавка ориентирована в СЗ направлении и вкрест простирается на космоснимке. Центр канавы (проба 15/7) имеет координаты 59°41'46.82" с.ш. и 30°10'39.16" в.д. Петрогенные элементы определялись в лаборатории Геологического института РАН (ГИН РАН) на рентгеновском спектрометре S4 PIONEER фирмы "BrukerAXS" (ФРГ), а микроэлементы – там же методом ICP-MS с использованием масс-спектрометра "Элемент 2" (Thermo Fisher Scientific of GmbH, Германия). Для контроля правильности результатов проводился анализ стандартного образца сланца SBC-1 (USGS, США) и контрольного образца риолита ORPT-1 (IAG, Великобритания). Полученные концентрации отличались от аттестованных содержаний не более чем 10–15 отн. %. Подробнее методика определения описана в работе (Okina et al., 2016). Всего исследовано 14 проб черных сланцев, фосфоритов, глин и кварцевых песков. Для 7 проб, характеризующих породы с различной формой залегания (пластовые и дайкообразные тела, диапировые структуры), в Минералогической лаборатории ГИН РАН была выделена тяжелая фракция и проведен ее минералогический анализ.

### СТРАТИГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЗРЕЗА

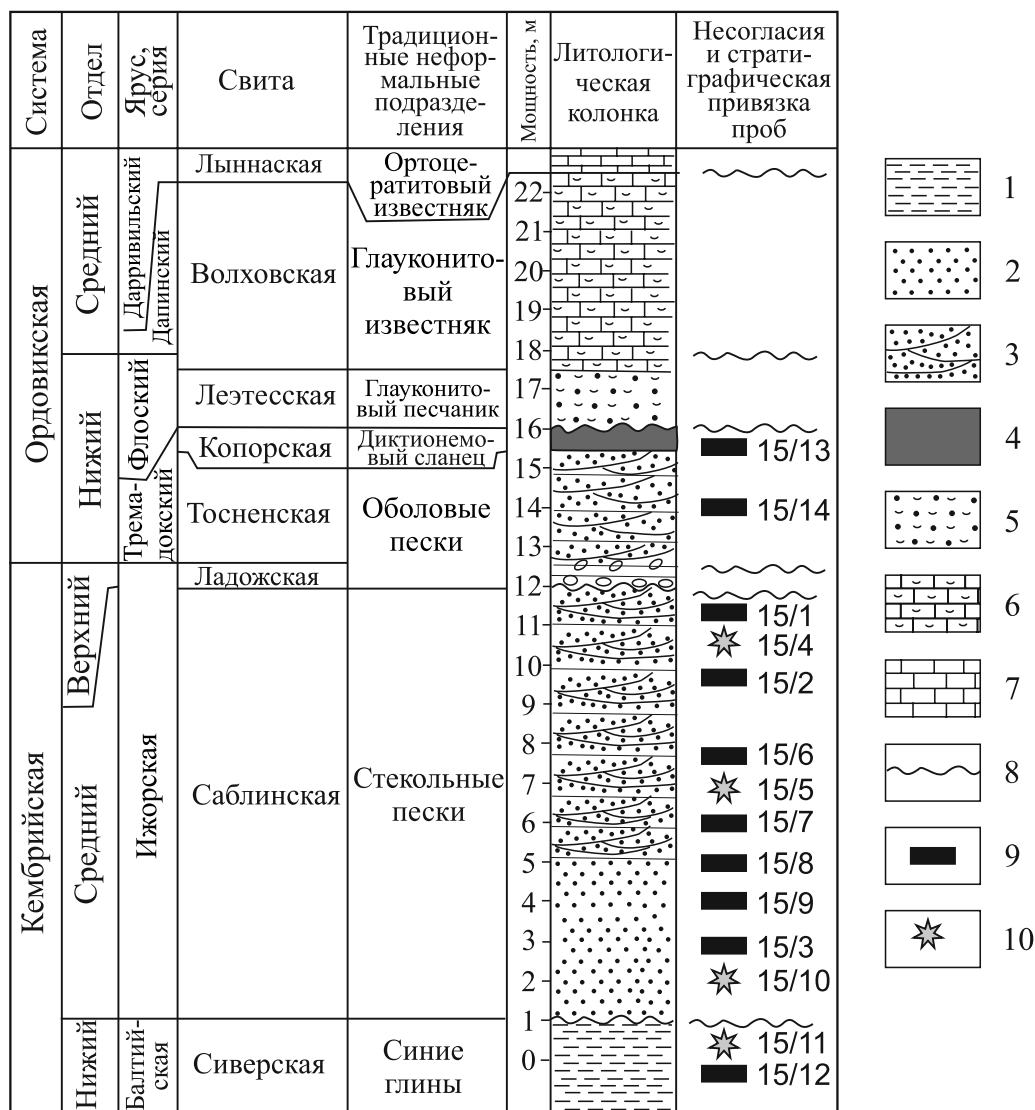
В районе Дудергофской структуры и одноименной возвышенности развиты отложения кембрия, нижнего и среднего ордовика (см. рис. 1, 2). Раз-

рез нижнего палеозоя здесь нарушен разрывами и осложнен складками, но на многих участках, в частности в области Балтийско-Ладожского глин-та (уступа), сохранились пологие моноклинали и первичные стратиграфические последовательности слоев и горизонтов.

В пределах исследуемого района синие глины нижнего кембрия слагают ядерные части антиклинальных структур, которые в рельефе выражены в виде возвышенностей (Дудергофской и Кирхгофской). На них залегают терригенные отложения среднего кембрия саблинской свиты. Нижняя часть разреза этой свиты представлена горизонтально-слоистыми, а верхняя – косослоистыми песками и песчаниками с тонкими линзами глин, имеющих следы полигонального растрескивания (см. рис. 2). Текстурные особенности толщи, а также преимущественно кварцевый состав песков (зрелые осадки) позволяют говорить о ее формировании в мелководных морских условиях (Кузнецов и др., 2011; Лаломов и др., 2015). При этом доминирующими микроструктурами поверхности песчаных и алевролитовых зерен в породах этой свиты являются структуры растворения и кристаллического обрастания, что, по (Fedorov, Palkina, 2015), служит признаком континентальной обстановки. Кварцевые стяжения в верхней части свиты, по аналогии с современными тропическими корами выветривания, могут рассматриваться как зона кремнистых стяжений (псевдобрекчий), располагающихся над зоной трещиноватости с призматической отдельностью.

Ладожская свита (верхний кембрий), сложенная кварцевыми песками (мощностью от 0 до 4.4 м), с несогласием залегает на саблинской свите. Пески в разрезе этой свиты, по сравнению с саблинскими песками, более грубозернистые и менее сортированные, с многочисленными обломками оболитид. Подошва свиты представлена эрозионной поверхностью с карманами (до 0.7 м), заполненными плохо сортированным кварцевым песком с включением железистых бобовин (Кузнецов и др., 2011).

Породы тремадокского яруса нижнего ордовика (тосненская и копорская свиты) представлены двумя комплексами необычного состава. Тосненская свита – это мелко- и среднезернистые кварцевые пески и песчаники, которые с региональным несогласием залегают на породах ладожской и саблинской свит, ее мощность изменяется от 2.0 до 7.5 м. Песчаники часто насыщены обломками фосфатизированных раковин беззамковых брахиопод *Obolus*. Это так называемые оболочные пески (фосфориты при рудных содержаниях  $P_2O_5$ ). Кроме того, в них установлены высокие концентрации РЗЭ, МПГ и W (Батулин, Ильин, 2013). Их мощность колеблется от 0.05 до 1.55 м и увеличивается с востока на запад. Проба 15/14 соответствует фосфоритовому горизонту (см. рис. 2).



**Рис. 2.** Сводный стратиграфический разрез нижнепалеозойских отложений приглинтовой полосы (Ленинградская область), по (Кузнецов и др., 2011) с дополнениями.

1 – глины; 2, 3 – кварцевые пески и песчаники: 2 – параллельно-слоистые, 3 – косослоистые; 4 – черные сланцы; 5 – кварц-глауконитовый песок; 6 – глауконитовые известняки; 7 – известняки; 8 – поверхности несогласий; 9, 10 – номера проб, 9 – из пластовых тел, 10 – из секущих дайкоподобных и диапироподобных образований.

**Fig. 2.** Summary stratigraphic section of the Lower Paleozoic deposits of the Duderhof dislocations area, after (Kuznetsov et al., 2011) with additions.

1 – clays; 2, 3 – quartz sands and sandstones: 2 – parallel layered, 3 – obliquely layered; 4 – black shales; 5 – quartz-glauc- onite sand; 6 – glauconite limestones; 7 – limestones; 8 – surfaces of unconformities; 9, 10 – numbers of samples taken from: 9 – stratified bodies, 10 – crossing dike-like and diapir-like formations.

Вышележащая копорская свита сложена аргил- литоподобной тонкоплитчатой глинистой породой (диктионемовые сланцы). Это породы буровато- коричневого, почти черного цвета с мелкими кри- сталлами гипса, ангидрита, марказита и пирита, а также остатками граптолитов. Основная составля- ющая сланцев – кварц (60%), полево- шпат (25%), а также иллит, элементарная сера, сульфиды желе- за (Геология СССР..., 1971; Батури- н, Ильин, 2013). К настоящему времени показано, что диктионемо- вые сланцы содержат ряд месторожде- ний метал- лов: рения, молибдена, серебра, золота, рубидия, скандия, урана и др. (Вялов и др., 2013). Мощность копорской свиты составляет от 0.1 до 4 м. Проба 15/13 соответствует диктионемовому горизонту (черным сланцам) (см. рис. 2).

за (Геология СССР..., 1971; Батури- н, Ильин, 2013). К настоящему времени показано, что диктионемо- вые сланцы содержат ряд месторожде- ний метал- лов: рения, молибдена, серебра, золота, рубидия, скандия, урана и др. (Вялов и др., 2013). Мощность копорской свиты составляет от 0.1 до 4 м. Проба 15/13 соответствует диктионемовому горизонту (черным сланцам) (см. рис. 2).

Пласт диктионемовых сланцев перекрыт кварцевыми и кварц-глауконитовыми песчаниками лезтесской свиты мощностью 2–3 м (см. рис. 2, верхняя часть склона на рис. 3б). Завершают разрез глауконитовые и ортоцератитовые известняки в составе волховской и лынской свит среднего ородовика, которые вскрыты в карьере к северу от изученного разреза.

## ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

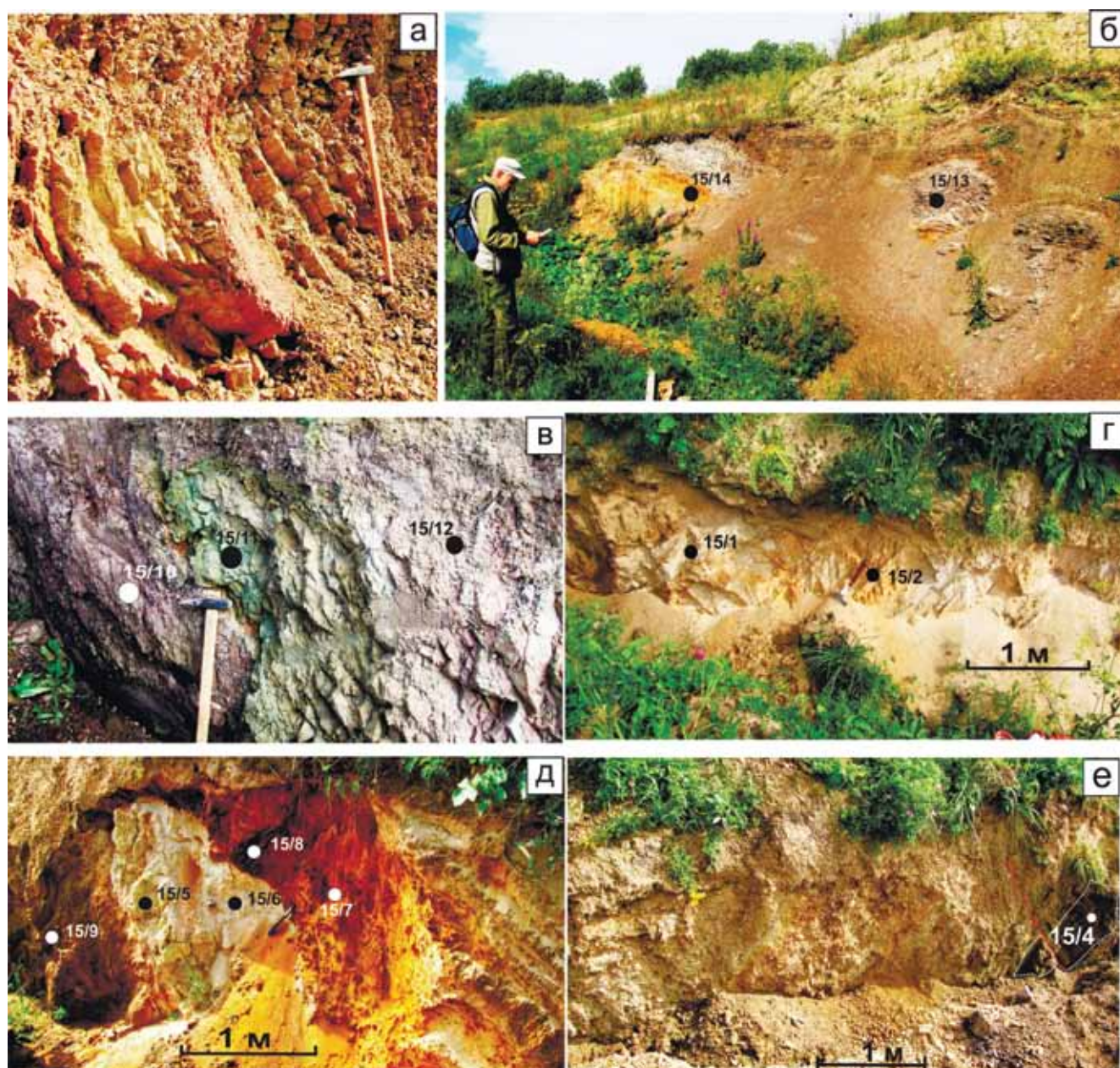
Согласно структурным исследованиям, опубликованным ранее (Колодяжный, 2016), изученный разрез нижнепалеозойских образований приурочен к северо-восточному крылу Кирхгофской антиклинали, выраженной в рельефе в виде одноименной возвышенности. Эта структура входит в систему аномальных для склонов Балтийского щита Дудергофских дислокаций, которые образуют прямые формы рельефа: вытянутые гряды и относительно изометричные холмы, соответствующие антиклиналям и куполообразным структурам, вытянутым в восток – северо-восточном направлении. Здесь отмечаются крутые залегания слоев, многочисленные разрывы, диапироподобные и дайкоподобные внедрения песчаных и глинистых пород, нарушающих последовательность разреза (Колодяжный, 2016). Начало изученного разреза представлено в южной части канавы, хорошо видной на космическом снимке к северо-востоку от вершины Кирхгофской возвышенности и являющейся восточной границей горнолыжного курорта. Здесь обнажаются сложнодеформированные глины с алевролитами и линзами известняков (пробы 15/11 и 15/12 соответственно (см. рис. 3в)). С учетом того, что, по данным бурения, кембрийские синие глины подстилают кембро-ордовикские пески (Лобанов, 1976), 15/11 может быть отторженцем нижележащего горизонта синих кембрийских глин. Здесь же выделяется дайкоподобное тело (проба 15/10). Выше залегает моноклиальная последовательность, сложенная светло-серыми мелко- и среднезернистыми кварцевыми песками (песчаниками), относящимися к низам саблинской свиты (проба 15/3). Породы достаточно полого (около 10°) падают на СВ и разбиты крутыми (близко к вертикальным) трещинами (см. рис. 3а). В пределах этой моноклинали выделяется участок с диапироподобной структурой, в которой светлые пески (проба 15/6) прорывают ожелезненные пески с включениями железистых бобовин (пробы 15/7 и 15/8, 15/9). Здесь же дайкоподобное тело (проба 15/5), в свою очередь, прорывает всю куполоподобную структуру (см. рис. 3д). Выше по разрезу развиты косослоистые пески (пробы 15/1 и 15/2), относящиеся к верхам саблинской и, возможно, ладожской свит. Проба 15/1 представлена наиболее “чистыми” среднезернистыми песками желтого цве-

та, в которых наблюдаются фрагменты косой слоистости. Проба 15/2 взята из участка кварцевых песков, пронизанных тонкими (мощностью до 2 мм) вертикальными ветвистыми жилками (см. рис. 3а). В северной части изученной канавы (длиной около 100 м) залегание песков становится близким к горизонтальному, и в них расположено дайкоподобное тело темного цвета мощностью 25 см (проба 15/4) (см. рис. 3е). Оболовые пески (фосфоритовый горизонт) и черные сланцы, которые, согласно региональной стратиграфической шкале, залегают выше песков, непосредственно в канаве не прослежены, но вскрыты в 30 м севернее в небольшом карьере, хорошо видном на космическом снимке (пробы 15/14 и 15/13 соответственно) (см. рис. 3б). Выше них залегают глауконитовые пески лезтесской свиты (не опробованные нами). Таким образом, в пределах канавы длиной около 100 м обнажается разрез среднекембрийских–нижнеордовикских отложений, мощность которых, согласно региональным стратиграфическим схемам, около 15 м (Геология СССР..., 1971; Кузнецов и др., 2011). Как видно на рис. 3, пласты песков местами деформированы. При этом секущие их жилкоподобные образования более упорядочены, что косвенно указывает на их более поздний, возможно постскладчатый, возраст. Это касается мелких (сетчатых) жилок мощностью в первые миллиметры, в пределах которых песок сцементирован. Точечное опробование этих маломощных жилок оказалось невозможным, но, судя по изменению валового состава песков, формирование этих жилок происходило за счет флюидной проработки песков, как это отмечалось для других объектов (Енгальцев, 2007). Были опробованы более крупные жилкоподобные тела песчано-алевролитового состава мощностью до 20 см. По химическому составу они отличаются от вмещающих образований (проба – 15/4 от 15/13 – черные сланцы, 15/11 – от 15/14 – фосфориты). Данный факт, а также их структурное положение указывают на то, что эти жилы не являются кластическими дайками, как это считают некоторые исследователи (Пуура, Туулинг, 1988). Далее для удобства изложения мы будем говорить о пластовых и жильных образованиях.

## АКЦЕССОРНЫЕ МИНЕРАЛЫ В ИЗУЧЕННЫХ ПОРОДАХ

Кембро-ордовикские пески северо-запада Русской плиты, по аналогии с олигоцен-миоценовыми морскими россыпями обрамления Украинского щита (Малышевское месторождение), рядом исследователей рассматриваются как перспективные объекты на титан-циркониевые россыпи (Лаломов и др., 2015). Опробованные нами кварцевые пески саблинской свиты (проба 15/1– пластовое тело) содержат в тяжелой фракции циркон, ильменит и





**Рис. 3.** Фотографии опробованных частей кембро-ордовикского разреза горы Кирхгоф.

а – складчато-разрывные деформации в песчаниках нижней части саблинской свиты (проба 15/3); б – горизонты фосфоритов (проба 15/14) и диктионемовых (черных) сланцев (проба 15/13); в – дайкоподобное тело темных алевролитов (проба 15/10) в нижней части разреза саблинской свиты; г – пески средней части разреза саблинской свиты, пронизанные сетью прожилков более плотных и ожелезненных песчаников (проба 15/1 и 15/2); д – дайкоподобное тело (проба 15/5) среди ожелезненных песков средней части разреза саблинской свиты; е – зона брекчирования в верхней части саблинской свиты и секущая жила темного цвета (проба 15/4). Кружки и цифры на снимках – места отбора проб и их номера.

**Fig. 3.** Photos of tested parts of the Cambrian-Ordovician section of the mount Kirchhoff.

а – folded-fracture deformation in sandstones of the lower part Sablinsk suite (sample 15/3); б – horizons of phosphate rock (sample 15/14) and dictyonema (black) shales (sample 15/13); в – dike-like body of the dark siltstones (sample 15/10) in the lower part of Sablinsk suite section; г – sands of the middle part of the Sablinsk suite section, which a network of veinlets more dense and more ferruginous sandstones (sample 15/1 and 15/2); д – dike like body (sample 15/5) in the middle section of Sablinsk suite; е – breccia zone in the upper part of the Sablinsk suite and a dark-colored crossing vein (sample 15/4). The circles and numbers in the images are the sampling locations and their numbers.

лейкоксен, т. е. минералы, которые являются главными компонентами полеороссыпей и почти полностью отсутствуют в пробах из “жильных” образований. Обычно циркон, ильменит и лейкоксен находятся в равных количествах (Лаломов и др., 2015), но в нашем случае лейкоксена на порядок больше, чем ильменита (табл. 1). При этом существует мнение, что лейкоксен образуется по ильмениту в условиях поверхностного выветривания. Значительное преобладание лейкоксена над ильменитом, вероятно, предполагает другой механизм преобразования ильменита, а именно под влиянием флюидов. При этом предполагается, что дальность переноса лейкоксена ввиду его хрупкости не превышает 2 км (Макеев, 2016). Важным минералом в пробе 15/1 является и турмалин (до 16%), но источники сноса ввиду его неокатанной формы достаточно неопределенные, а коренных пород с турмалином очень мало. Следует отметить, что все перечисленные минералы обладают высокой химической устойчивостью и присутствуют, правда, в меньшем количестве в черных сланцах вышележащего диктионемового горизонта (также пластового тела) (проба 15/13). В целом содержание минералов тяжелой фракции в стратифицируемых пластах (пробы 15/1 и 15/13) небольшое – 1.5–3.0 кг/т,

тогда как в “жильных” образованиях их содержание достигает 24 кг/т, но здесь они представлены в основном химически механически неустойчивыми разностями: сульфидами, гидроокислами железа и фосфатами. Это указывает на то, что секущие жилы могли быть путями проникновения рудных компонентов и не являются кластическими дайками, ведь в этом случае содержания и набор аксессуаров и валовый химический состав слагающих их пород должны быть близки к составу “пластовых” тел.

### ГЕОХИМИЯ ПЛАСТОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ, ПЕСКИ

В изученном разрезе кембро-ордовикских образований выделяется три пачки: кварцевые пески, фосфориты и черные сланцы. Большая часть анализов песков показывает содержание  $\text{SiO}_2$  в интервале 94–96% (табл. 2). Из других макроэлементов заметны концентрации  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (в пределах 2–4%), что можно видеть в обнажениях песков по их ожелезнению и наличию лимонитовых бобовин. Высокие содержания  $\text{SiO}_2$  можно интерпретировать двояко: или это хорошо отмытые кварцевые пески, или окварцованные песчаники,

**Таблица 1.** Содержание минералов в тяжелой фракции нижнепалеозойских отложений Дудергофской структуры, мас. %  
**Table 1.** Mineral content in the heavy fraction of the Lower Paleozoic deposits of the Duderhof structure, wt %

Компонент	1	2	3	4	5	6
	Пр. 15/1	Пр. 15/4	Пр. 15/10	Пр. 15/11	Пр. 15/12	Пр. 15/13
Содержание тяжелой фракции, кг/т	1.5	4.3	15.0	24.0	2.25	3.0
Циркон	10.0	Зн.	Зн.	0.1	Зн.	0.1
Апатит	Зн.	–	–	–	–	Зн.
Рутил	0.3	–	–	0.1	–	–
Ильменит	3.0	Зн.	Зн.	Зн.	Зн.	0.1
Гранат	Зн.	–	–	–	Зн.	Зн.
Сульфиды	18.0	26.0	38.0	0.1	40.0	79.4
Турмалин	16.0	Зн.	Зн.	–	–	7.7
Лейкоксен	35.0	–	–	–	–	8.0
Гидроокисл. Fe	12.0	58.0	42.0	3.6	60.0	1.3
Фосфаты	6.0	16.0	20.0	95.5	–	3.5
Глауконит	–	–	–	0.7	–	–
Амфибол	–	Зн.	Зн.	Зн.	Зн.	Зн.
Пироксен	–	–	–	–	–	Зн.
Биотит	–	–	–	–	–	Зн.
Сумма, %	100.3	100	100	100.1	100	100.1

Примечание. 1 – пластовый кварцевый песок, 2–4 – дайкоподобные тела алевролит-глинистого состава, 5 – карбонатная порода, 6 – пластовое тело черных (диктионемовых) сланцев. Прочерк – минерал не обнаружен, Зн. – обнаружены единичные зерна.

Note. 1 – stratified quartz sand, 2–4 – dike-like bodies of siltstone-clay composition, 5 – carbonate rock, 6 – stratified body of black (dictionemous) shales. Dash – not discovered, Зн. – single grains are discovered.



**Таблица 2.** Химический состав мас. %, и элементы-примеси, г/т, кварцевых песков и кварцитов

**Table 2.** Chemical composition wt %, and trace-elements, ppm, of quartz sands and quartzites

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Пр. 15/1	Пр. 15/2	Пр. 15/3	Пр. 15/6	Пр. 15/7	Пр. 15/8	Пр. 15/9	Пр. 26/2	Пр. 26/3	Пр. Б1/2	Пр. Б10/4	Пр. П-1
SiO <sub>2</sub>	96.21	94.31	97.24	96.77	95.26	89.35	96.26	95.28	95.64	88.62	92.60	73.72
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.10	0.05	0.09	0.05	0.06	0.07	0.06	0.31	0.35	0.23	0.34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.77	1.71	0.46	0.61	0.61	0.73	0.79	1.99	2.5	3.62	2.37	13.28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.41	0.20	0.54	0.51	0.85	5.86	0.48	2.22	1.25	0.1	0.1	0.96
FeO	1.35	1.74	1.04	1.12	1.78	0.72	1.52	—	—	4.28	3.48	2.24
MnO	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.05	0.02	0.01	0.01	0.06	0.03	0.05
MgO	0.22	0.36	0.08	0.12	0.11	0.12	0.10	0/01	0.01	0.39	0.14	1.67
CaO	0.22	0.17	0.10	0.15	0.16	0.25	0.12	0.45	0.45	0.66	0.08	1.64
K <sub>2</sub> O	0.13	0.26	0.05	0.14	0.05	0.06	0.22	0.13	0.23	1.34	0.95	2.36
Na <sub>2</sub> O	0.00	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.15	0.16	0.12	0.03	3.3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.12	0.21	0.14	0.07	0.31	0.71	0.12	0.00	0.00	0.18	0.03	0.08
П.п.п.	0.32	0.74	0.18	0.28	0.60	2.01	0.12	0.05	0.08	0.1	0.02	0.12
Сумма	99.85	99.81	99.89	99.87	99.80	99.92	99.83	99.93	99.95	99.71	100.13	94.75
Li	4.6	6.2	3.7	6.0	4.4	4.1	3.7	10.6	6.2	—	—	20
Be	0.12	0.18	0.02	0.04	0.05	0.08	0.08	0.34	0.39	—	—	2.06
Sc	0.58	1.35	0.26	0.47	0.34	0.60	0.42	1.7	0.72	2.6	1.1	6.8
V	9.0	18	3.4	4.0	16.3	11.3	5.9	7.3	2.7	14.7	6.3	5.6
Cr	12	17	9	15	13	12	21	123	70	161	134.5	48
Co	1.8	2.3	0.95	0.96	1.73	2.28	1.72	1.7	0.92	4.9	3.1	10
Ni	6.6	13.0	7.6	8.7	10.0	14.7	13.2	14	8.2	25	18.5	24
Cu	6.5	10.1	7.0	12	10	11	31	19	12	—	—	31
Ga	0.94	1.65	0.45	0.59	0.50	0.72	0.66	2.9	2.5	3.9	2.2	17
Rb	4.04	9.8	0.96	2.75	1.08	1.42	3.15	9	14	31.2	21.5	82
Sr	26	25	24	25	26	23	23	3.7	3.6	36.2	22.4	259
Y	3.4	4.6	2.7	3.4	3.6	5.1	2.8	15	5.8	15.8	7.9	14
Zr	42	66	38	158	22	20	43	53	39	238	119	84
Nb	1.0	1.2	0.7	1.2	0.5	0.4	0.9	5.0	2.1	6.2	3.4	6.8
Mo	1.27	2.42	1.63	1.4	1.7	1.8	2.7	4.9	3.8	—	—	0.89
Sn	0.80	1.25	0.81	1.29	<0.6	0.65	2.19	5.9	3.1	—	—	2.16
Cs	0.37	0.58	0.07	0.12	0.06	0.09	0.15	0.64	0.78	—	—	2.1
Ba	20	28	16	29	83	18	25	9	12	218	158	584
La	11.1	10.3	9.3	9.8	10.2	9.2	9.4	8.2	4.2	19	12.1	17.1
Ce	18	19	15.6	16.7	18.3	19.3	16.5	17	8.2	45	30	33
Pr	2.0	2.0	1.6	1.81	2.07	1.94	1.76	2.1	1.0	4.7	2.9	4.2
Nd	6.8	7.0	5.3	5.6	6.5	7.2	6.3	7.6	3.6	18.3	10.7	13.6
Sm	1.20	1.34	0.96	0.99	1.23	1.45	1.16	1.6	0.8	3.5	2.0	2.75
Eu	0.26	0.26	0.19	0.19	0.25	0.28	0.21	0.23	0.1	0.63	0.36	0.6
Gd	1.09	1.16	0.79	0.87	1.05	1.28	0.89	1.8	0.83	3.4	1.7	2.46
Tb	0.12	0.16	0.10	0.11	0.14	0.18	0.12	0.35	0.15	0.51	0.25	0.37
Dy	0.69	0.83	0.54	0.62	0.68	0.89	0.64	2.4	1.01	2.7	1.4	2.11
Ho	0.13	0.14	0.10	0.12	0.13	0.16	0.11	0.52	0.21	0.55	0.28	0.48
Er	0.31	0.42	0.24	0.34	0.30	0.43	0.29	1.6	0.59	1.6	0.88	1.3
Tm	0.05	0.06	0.04	0.06	0.04	0.06	0.04	0.23	0.09	0.22	0.13	0.21
Yb	0.34	0.38	0.21	0.37	0.24	0.38	0.29	1.5	0.58	1.6	0.89	1.29
Lu	0.04	0.06	0.03	0.06	0.04	0.05	0.04	0.22	0.085	0.24	0.13	0.19
Hf	1.01	1.55	0.83	3.66	0.56	0.52	1.13	1.4	1.2	6.4	3.5	2.56
W	0.22	0.28	0.23	0.50	0.18	<0.08	1.03	0.71	0.47	0.79	0.53	1.12
Tl	<0.05	0.15	<0.05	0.28	0.06	0.15	0.06	0.072	0.11	—	—	0.52
Pb	8.2	11.0	8.0	24	10.0	17.1	10.9	3.2	2.5	7.2	4.5	14.4
Th	0.94	1.27	0.62	0.72	0.69	0.86	0.86	5.3	2.7	5.7	2.7	6.64
U	1.39	1.43	0.88	0.77	1.16	1.14	1.25	1.1	0.73	1.6	0.57	1.51

Примечание. 1–7 – кварцевые пески кембрийского возраста изученного участка Дудергофской структуры; 8, 9 – вторичные кварциты о-ва Бол. Тютерс (Терехов и др., 2017); 10, 11 – кварцевые пески позднедевонского возраста горы Андома (Терехов и др., 2016); 12 – полимиктовые пески голоценового возраста в обрамлении Салминского массива. Прочерк – элемент не определялся.

Note. 1–7 – Cambrian quartz sands of the studied area of the Duderhof structure; 8, 9 – secondary quartzites of island B. Tyuters (Terekhov et al., 2017); 10, 11 – Late Devonian quartz sands of m. Andoma (Terekhov et al., 2016); 12 – Holocene polymictic sands framed by the Salma massif. Dash – the element not defined.

типичные для кор выветривания. При отсутствии прямых находок пород из площадей сноса одним из широко используемых методов реконструкции является анализ ряда индикаторных отношений элементов примесей (Hf, Th, Co, Sc, Cr, Ni, Zr и др.). Эти элементы относительно слабо-растворимы в воде и вследствие этого почти без потерь перемещаются из областей сноса в бассейны осадконакопления (Тейлор, Мак Леннан, 1988). Мы сравнили основные индикативные характеристики кембрийских песков с вендскими, девонскими и современными осадками Белого моря. Последние рассматривались нами как усредненный состав преимущественно архейской верхней коры восточной части Балтийского щита. Оказалось, что по большинству параметров они в различной степени отличаются от этих преимущественно кварцевых песков.

На диаграмме La/Yb–Ba/La (Kilian, Behrman, 2003) (рис. 4а) исследуемые пробы не сопоставимы с известными в регионе осадками, а также с составами PAAS и имеют заметно низкие значения Ba/La ( $<8$ ), что объясняется достаточно высокими содержаниями La (около 10 г/т) и предельно низкими содержаниями бария (ввиду отсутствия полевых шпатов).

На диаграмме Co/Hf–Ce/Cr (рис. 4б) практически ни одна из проб не попадает в поле значений, характерных для продуктов размыва примитивных архейских субстратов. В то же время они тяготеют к вендскому полю, для которого исходным материалом, вероятно, являлись комплексы Тиманского неопротерозойского орогена (Маслов и др., 2009).

Благодаря низким содержаниям хрома фигуративные точки изученных образцов кварцевых песков лежат за пределами известных полей осадочных пород, но близки среднему составу гранитов рапакиви (рис. 4в).

На диаграмме Sc/Th–La/Sm (рис. 4г) изученные пески Дудергофского разреза образуют компактное поле, отличающееся от поля составов пород верхнего венда, которые могли быть для них источником сноса. Также они отличаются и от девонских отложений, для которых, в свою очередь, теоретически они могли быть источником питания. Хотя в последние годы и было показано, что девонские пески в обрамлении Балтийского щита образовались за счет размыва тиманид (Кузнецов и др., 2011) или свекофеннид (Терехов и др., 2017).

По соотношениям La/Sc–Th/Co (рис. 4д) тренд эволюции состава изученных песков принципиально отличается от трендов изменения состава пород других известных в регионе комплексов. Вероятно, это обусловлено другим механизмом концентрирования индикативных компонентов (например, флюидного привноса).

На диаграмме Th/Sc–Sc (рис. 4е) состав песков также имеет принципиально иной тренд эволю-

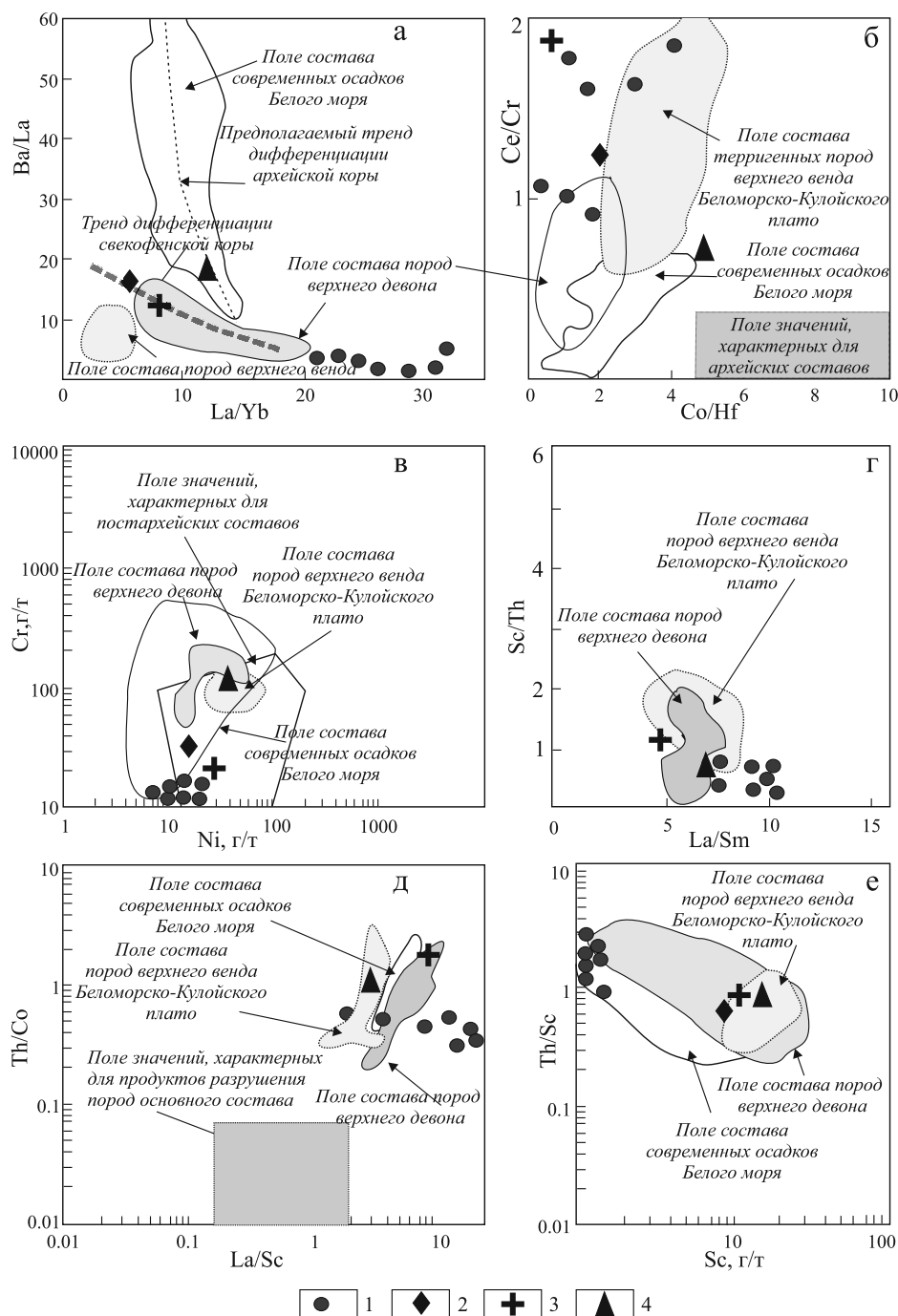
ции по сравнению с большей частью современных осадков Белого моря, что указывает на постархейский возраст источника.

Распределение РЗЭ на диаграмме для кварцевых песков образует достаточно компактный диапазон значений (рис. 5а), вероятно обусловленный одинаковым набором и количеством акцессориев, которые являются единственными их концентраторами. Благодаря этому в кембрийских песках отрицательная Eu аномалия выражена лучше, чем на кривой PAAS, и ее значение варьирует от 0.6 до 0.8 при достаточно высоких La/Yb<sub>n</sub> (16–22) (см. рис. 5). При этом в современных осадках Белого моря, характеризующих валовый состав коры восточной части Балтийского щита, отрицательная Eu аномалия менее выражена, чем в кривой PAAS, вплоть до ее отсутствия и появления слабой положительной. Среди известных нам опробованных на РЗЭ песков и кварцевых пород наибольшее сходство исследованные пески обнаруживают с позднепротерозойскими вторичными кварцитами о-ва Бол. Тютерс (Финский залив, вблизи о-ва Гогланд) (см. рис. 5), тогда как по сравнению с девонскими песками они содержат меньше РЗЭ. Все это позволяет предполагать, что снос обломочного материала для кембрийских осадков проходил с территории со зрелой континентальной корой. Между тем можно предполагать, что наблюдаемый состав кварцевых песков не в полной мере отвечает их исходному составу.

Все (структурные, минералогические и геохимические) данные позволяют предположить, что наблюдаемые кварцевые пески, хоть и являются осадочными образованиями, но подверглись значительным наложенным преобразованиям.

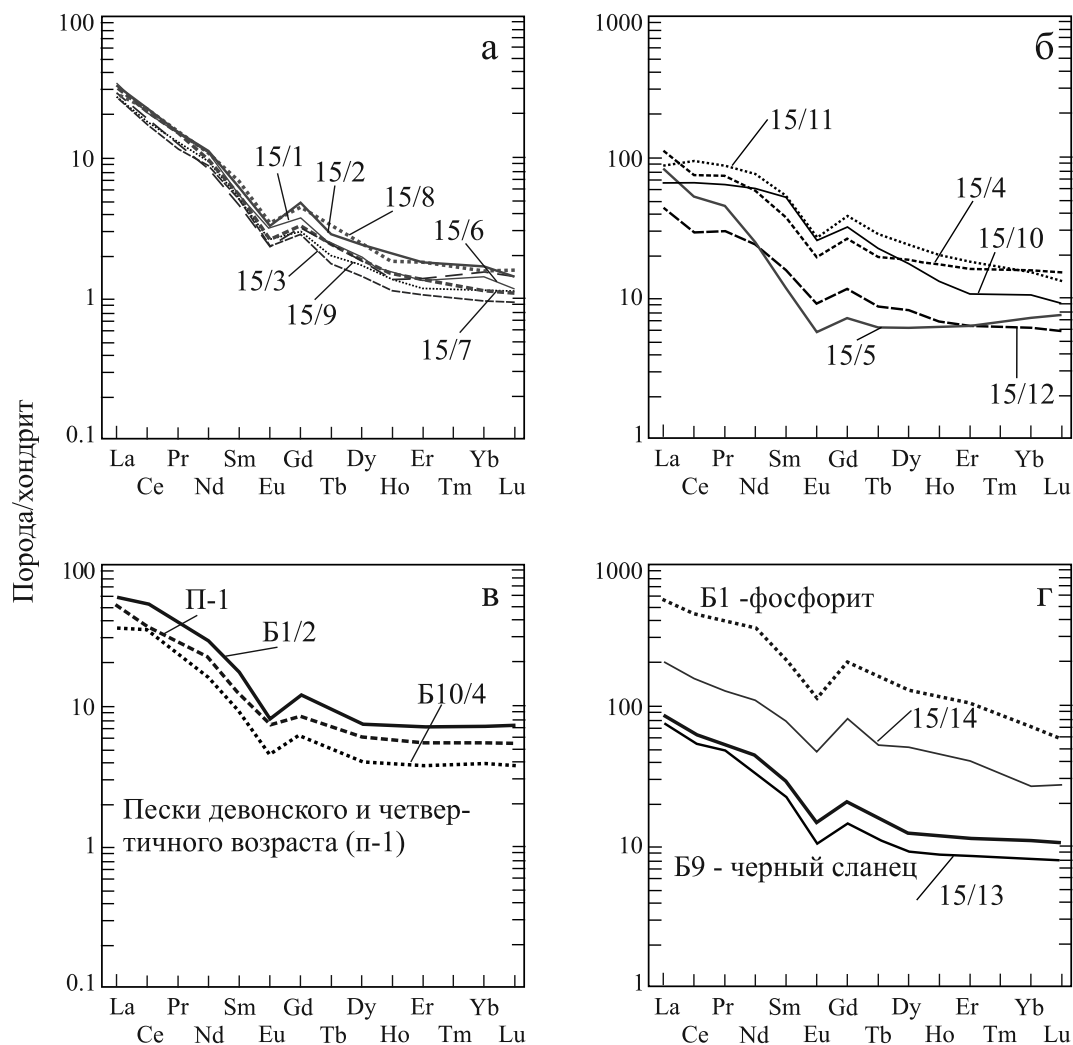
## ГЕОХИМИЯ ПЛАСТОВЫХ ФОСФОРИТОВ И ЧЕРНЫХ СЛАНЦЕВ

Проба фосфоритов 15/14 по содержанию макро- и микроэлементов близка среднему составу фосфоритов Прибалтийского региона (табл. 3) (Вялов и др., 2013). Согласно имеющимся данным, продуктивные слои фосфатоносных пород, состоящих из песка и ракушечного материала, содержат (мас. %): P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – от 9 до 13, CaO – 13–18, SiO<sub>2</sub> – 55–62, а также CO<sub>2</sub> – 1.3–1.7, F – 0.36–1.01 и C<sub>орг</sub> –  $\approx$  0.2, кроме того, в них присутствуют пирита – 1–2% и примерно столько же оксидов железа. В гравийной фракции, состоящей преимущественно из ракушечного материала, содержание фосфатных компонентов и пирита возрастает в 2–3 раза, а содержание кремнезема уменьшается в 7–8 раз (Батурин, Ильин, 2013). В пробе 15/14 в 2.5 раза меньше РЗЭ, Y, Mo (см. рис. 5б, г), чем в среднем в фосфоритах Прибалтийского бассейна, что мы связываем с их выносом в зоне флюидной проработки. Образцы из разных частей сланцевой зоны довольно однородны



**Рис. 4.** Распределение фигуративных точек состава песков нижнепалеозойского разреза района Дудергофских дислокаций на диаграммах Ba/La–La/Yb (а), Ce/Cr–Co/Gf (б), Cr–Ni (в), Sc/Th–La/Sm (г), Th/Co–La/Sc (д), Th/Sc–Sc (е). 1 – песок; 2 – средний состав свекофенского сланца, по (Котова, Подковыров, 2014); 3 – средний состав гранитов рапакиви, по (Ларин, 2011); 4 – PAAS – средний постархейский австралийский глинистый сланец, по (Тейлор, Мак-Леннан, 1988). Поле современных осадков Белого моря, тренды рециклинга, по (Маслов и др., 2014). Поле состава пород верхнего венда, по (Маслов и др., 2009). Поле позднедевонских отложений горы Андома, по (Терехов и др., 2017).

**Fig. 4.** Distribution of figurative points of sand composition in the Lower Paleozoic section of the Duderhof dislocations area in the diagrams Ba/La–La/Yb (a), Ce/Cr–Co/Gf (б), Cr–Ni (в), Sc/Th–La/Sm (г), Th/Co–La/Sc (д), Th/Sc–Sc (е). 1 – sand; 2 – average composition of the Svecofennian shale, according to (Kotova, Podkovyrov, 2014); 3 – medium composition – rapakivi granites, by (Larin, 2011); 4 – PAAS – medium post-Archean Australian clay shale, according to (Teilor, Mak-Lennan, 1988). The field of modern precipitation of the White sea, recycling trends according to (Maslov et al., 2014). Field of rock composition of the upper Vendian, according to (Maslov et al., 2009). Field of late Devonian deposits of Andoma by (Terexhov et al., 2017).



**Рис. 5.** Нормированные по хондриту спектры распределения РЗЭ в породах нижнепалеозойского разреза района Дудерговских дислокаций.

а и в – пески, б – жильные образования, г – черный сланец (проба 15/13) и фосфорит (проба 15/14) в сравнении со средними составами Прибалтийского бассейна (Б9 и Б1) (Батурин, Ильин, 2013).

**Fig. 5.** Chondrite-normalized spectra REE distribution for in rocks of the lower paleozoic section of the Dudergoff dislocations area.

а and в – are sands, б – vein formations, and г – black shale (sample 15/13) and phosphorite (sample 15/14) in comparison with the average compositions of the Baltic basin (B9 and B1) (Baturin, Il'in, 2013).

по химическому составу (мас. %):  $\text{SiO}_2$  – 41–52,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 10–13 и  $\text{TiO}_2$  – 0.2–0.8 (см. табл. 3). Содержание в них общего железа колеблется от 1.2 до 5.7, серы – от 1.00 до 3.14 мас. %, что обусловлено постоянным присутствием пирита. Как и большинство других черных сланцев, они обеднены фосфором (0.03–0.19 мас.%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) и обогащены органическим углеродом (4.34–11.9 мас. %  $\text{C}_{\text{орг}}$ ) (Батурин, Ильин, 2013). Проба 15/13 (черные сланцы) по большинству элементов идентична среднему составу черных сланцев в этом регионе, отличаясь от них только очень высокими содержаниями ва-

надия (2589 против 680 г/т в медианном составе), молибдена (596 против 200 г/т) и урана (889 против 98 г/т) (Батурин, Ильин, 2013). При сравнении пробы 15/13 с породами месторождений района Нарке (Швеция) также отмечается превышение содержания рудных компонентов не только над средними, но и над максимальными значениями (г/т): U – 889 против 185, V – 2589 против 684, Mo – 596 против 229, Cu – 216 против 97, Pb – 401 против 129, Gd – 8.6 против 1.13 (Фадин и др., 2016). Аномально высокое содержание этих элементов можно объяснить двояко: 1) эпигенетическими преобразованиями,

**Таблица 3.** Химический состав, мас.% и элементы-примеси, г/т, дайкоподобных тел, фосфоритов и черных сланцев

**Table 3.** Chemical composition, wt% and trace-elements, ppm, dike-like bodies, phosphorite and black shale

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Пр. 15/4	Пр. 15/5	Пр. 15/10	Пр. 15/11	Пр. 15/12	Пр. 15/13	Пр. 15/14	Пр. Б9	Пр. Б1
SiO <sub>2</sub>	53.79	62.00	55.93	57.14	6.88	42.36	34.96	42.8	55.3
TiO <sub>2</sub>	0.81	0.67	0.77	0.60	0.10	0.72	0.18	0.81	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.77	9.17	12.38	9.88	1.42	11.07	0.80	10.7	2.32
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.75	10.70	5.55	9.58	1.55	2.45	12.71	1.5	2.52
FeO	0.29	0.20	0.35	0.44	0.15	1.30	0.41	-	-
MnO	0.09	0.02	0.05	0.14	0.11	0.02	0.02	0.01	0.05
MgO	1.50	1.09	1.44	4.08	1.78	0.53	4.50	0.48	0.76
CaO	3.20	0.71	2.69	4.59	47.73	0.58	15.39	-	18.12
K <sub>2</sub> O	6.85	3.62	6.88	3.96	0.93	4.77	0.04	6.3	-
Na <sub>2</sub> O	0.18	0.08	0.11	<0.01	<0.01	0.08	0.06	0.07	1.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	0.24	0.45	1.65	0.15	2.63	19.28	-	12.70
П.п.п.	15.48	11.48	13.36	7.89	39.18	33.34	11.59	0.04	0.55
Сумма	99.98	99.98	99.96	99.95	99.98	99.85	99.95	-	-
Li	21	15.7	18	29	3.8	9.8	2.1	13	3.9
Be	4.2	1.8	2.6	10.6	0.8	3.7	1.7	1.9	1.9
Sc	11.9	10.4	9.8	14.1	4.0	13.8	3.0	10	3.9
V	1439	75	1133	174	15.1	2589	23	680	16
Cr	77	51	68	89	10	160	9	145	9
Co	35	1.56	16.3	15.6	1.70	2.74	1.05	5.5	6.2
Ni	284	5.1	146	104	15.7	40	14.1	85	17
Cu	268	<5	206	108	4	216	40	65	22
Ga	17	15.4	16.0	20	2.43	23	0.61	14	3.8
Rb	107	113	113	126	24	84	1.18	106	1.1
Sr	71	103	103	162	324	96	819	85	3157
Y	43	15	21	47	15	17	156	27	392
Zr	148	146	128	106	18	157	42	150	17
Nb	19	15	18	10.8	2.4	16	4.7	12.5	1.0
Mo	78	1.8	103	8.1	3.1	596	7.8	200	24
Sn	2.89	2.64	3.26	3.22	0.47	2.01	0.21	2.8	0.33
Cs	6.1	5.4	6.6	6.5	1.3	4.5	0.07	4.5	0.05
Ba	435	297	443	142	40	496	170	380	207
La	37	28	27	30	15.3	22	72	28	194
Ce	73	50	50	84	26	59	158	55.5	406
Pr	10.2	6.1	6.9	11.6	4.1	9.2	18.7	7.25	54
Nd	41.9	17.4	24	51	15.7	40	79	29.4	225
Sm	8.77	2.75	5.5	12.0	3.54	10.9	17.0	6.17	42
Eu	1.68	0.50	0.98	2.27	0.75	2.05	3.9	1.25	9.3
Gd	8.31	2.25	4.81	11.6	3.4	8.6	23.2	5.8	56
Tb	1.16	0.36	0.63	1.64	0.48	1.27	3.18	0.88	8.3
Dy	7.12	2.29	3.71	9.1	2.8	6.6	18.7	4.92	50
Ho	1.53	0.53	0.81	1.69	0.56	1.08	3.93	0.96	10.2
Er	4.09	1.57	2.11	4.31	1.42	2.58	10.4	2.68	26
Tm	0.63	0.27	0.35	0.58	0.22	0.39	1.28	0.39	3.0
Yb	3.83	1.78	2.20	3.51	1.36	2.48	6.4	2.67	16
Lu	0.56	0.29	0.29	0.47	0.19	0.30	0.97	0.38	2.0
Hf	4.42	3.88	3.88	3.14	0.53	4.6	1.41	3.5	0.44
W	1.96	1.58	1.93	1.58	0.47	1.94	1.03	2.4	0.8
Tl	1.7	0.6	1.85	1.36	0.09	8.6	1.34	6.6	1.0
Pb	45	97	49	24.6	4.8	401	124	94	82
Th	14.2	9.0	11.1	18.1	5.4	20.4	2.7	12	2.9
U	93.1	2.5	168	23.6	3.8	889	26	98	48

Примечание. 1–3 – дайкоподобные тела, 4 – куполоподобные тела; 5 – известняк (будина?); 6 – черный сланец; 7 – фосфорит; 8, 9 – средний состав черного сланца (8) и фосфорита (9) Прибалтийского бассейна (Батурин, Ильин, 2013). Прочерк – элемент не определялся.

Note. 1–3 – dike-like and 4 – dome-like bodies; 5 – limestone (budina?); 6 – black shale; 7 – phosphorite; 8, 9 – average composition of black shale (8) and phosphorite (9) of the Baltic basin (Baturin, Il'in, 2013). Dash – the element was not defined.



связанными с мобилизацией вещества в разломных зонах, что отмечается в других проявлениях черных сланцев на севере Русской плиты (Енгальчев, 2013); 2) первоначальной аномалией, приуроченной или к литологической “ловушке”, или к разломной зоне, что часто бывает взаимосвязано. Исследования последних лет показали, что значительная часть рудных элементов в черных сланцах не образует минеральных фаз, а находится в коллоидно-солевой фракции (нанофракции), которая хорошо растворима в воде (Фадин и др., 2016). Таким образом, в пределах аномальной Дудергофской тектонической структуры изученные пластовые тела нижнепалеозойского разреза по ряду геохимических характеристик значительно отличаются от аналогичных образований, слагающих ненарушенную моноклинали на склоне Балтийского щита.

### ГЕОХИМИЯ СЕКУЩИХ “ЖИЛ”

В исследуемом разрезе наблюдается три вида секущих “жилных” образований: тонкие ветвистые жилки мощностью от первых миллиметров до первых сантиметров, дайкоподобные и диапироподобные образования (см. рис. 3). Состав тонких жилок можно косвенно оценить по изменению химического состава от наиболее чистых песков к пескам, содержащим жилки или стяжения. Так, при сравнении наиболее чистой пробы песков (проба 15/1) с пробой песков, содержащей тонкие ветвистые жилки толщиной до 1–2 мм (проба 15/2), можно видеть, что содержание макроэлементов почти не меняется, тогда как концентрации микроэлементов возрастают весьма значительно: Li, Be, Cr, Co, Cu, Ga, Y, Zr, Ba, Pb – в 1.5 раза, а V, Ni, Rb, Mo – в 2 раза и более. При этом концентрации РЗЭ практически не меняются (см. рис. 5). Более информативными являются пробы, отобранные из дайкоподобных тел, – это пробы 15/4, 15/5 и 15/10. Пробы 15/4 и 15/10 (см. рис. 3д, е) по внешнему виду и содержаниям макро- и микроэлементов близки к пробе черных сланцев (15/13), но породы менее сланцеватые. Обращают на себя внимание аномальные содержания в них таких элементов, как ванадий и уран, типичных для черных сланцев, но в то же время в них значительно меньше молибдена (см. табл. 3). Проба 15/5 – дайкоподобное тело (см. рис. 3д), по составу принципиально отличается как от кварцевых песков, так и от фосфоритов и черных сланцев, что указывает на небольшую вероятность того, что подобное тело является кластической дайкой. Порода этой пробы, по сравнению с кварцевыми песками, заметно обогащена железом. Проба 15/11 отобрана из диапироподобной структуры, нарушающей стратификацию разреза. По составу это кварц-полевошпатовый алевропесчаник, который имеет повышенные содержания  $P_2O_5$  и высокие концентрации микроэлементов

(V, Sc, Cu, Th, U) относительно нормальных осадков. При этом, по сравнению с пластовым фосфоритом (проба 15/14), порода из куполоподобной структуры заметно обогащена рудными компонентами V, Cr, Co, Ni, Cu, а также Rb, Cs, Li, Be, Sc, Th и особенно Ga.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ряд исследователей считают, что кембро-ордовикские пески (песчаники) северо-запада Русской плиты в целом благоприятны для формирования “титан-циркониевых” ископаемых прибрежно-морских россыпей. При этом важнейший структурный фактор локализации этих образований – близость Балтийского щита как источника сноса рудных компонентов (Лаломов и др., 2015). Однако масштаб эрозии и направления сноса обломочного материала особенно с восточной (архейской) части щита в настоящее время являются объектом дискуссии. Так, последние исследования показывают, что для образования венд-кембрийских отложений Балтийской моноклинали важную роль сыграла область сноса в районе Тимана (Подковыров и др., 2017). Наши геохимические данные по пескам саблинской свиты также указывают на малую вероятность поступления обломочного материала с восточной части Балтийского щита. При этом важно остановиться на вопросе преобладания лейкоксена в изученной пробе 15/1 (песок саблинской свиты). В крупнейшем в мире Ярегском титан-циркониевом месторождении, насыщенном тяжелыми углеводородами (восстановительная среда), лейкоксен также заметно преобладает над ильменитом. Подобная ситуация и на Пижменском месторождении, но здесь нет нефти и, возможно, поэтому больше ильменита. На ранних стадиях изучения этих месторождений была высказана традиционная гипотеза об их россыпной природе, но затем была предложена полигенетическая модель, согласно которой на первично-осадочные породы накладывается гидротермально-метасоматическое титановое оруденение. При этом получены данные о переходе ильменита в лейкоксен при температурах процесса от 300 до 510°C (Макеев, 2016). Это свидетельствует о том, что процесс преобразования ильменита проходил под влиянием высокой температуры, которую обеспечивали глубинные, соответственно, горячие, флюиды. В ряде случаев эти флюиды достигали поверхности и формировали линейные коры выветривания. В пользу флюидного воздействия на исследуемые пески саблинской свиты могут указывать и повышенные значения потерь при прокаливании (п.п.п.), достигающие 2% (см. табл. 2).

Как показано в наших структурных исследованиях (Колодяжный, 2016; Колодяжный и др., 2020а, б), участки аномальной складчатости яв-

ляются характерными элементами строения Балтийско-Мезенской тектонической зоны и причины дислокаций – эндогенные факторы, а не гляциодислокации. Геохимические исследования подтверждают этот вывод. Так, опробованные пески и черные сланцы по содержанию микроэлементов отличаются от аналогичных образований, развитых вне зон дислокаций, что может указывать на определенный тектонический контроль в их поступлении. При этом породы из дайкоподобных и диапироподобных образований, хоть и имеющие повышенные концентрации рудных элементов, по составу отличаются от пластовых тел, т. е. эти образования не являются следствием гляциодислокаций. Все это указывает на то, что секущие образования могли быть своеобразными каналами для поступления рудных компонентов в пластовые тела на стадии их формирования или постдиагенетических преобразований, что и предопределило в них высокие содержания химически неустойчивых минералов: сульфидов, гидроокислов железа и фосфатов.

Палеогеографические реконструкции и современные наблюдения свидетельствуют о том, что формирование как фосфоритов, так и углеродистых сланцев обусловлено специфическим сочетанием благоприятных условий осадконакопления в биологически продуктивных зонах Мирового океана (Батулин, Ильин, 2013). При этом весьма популярна модель апвеллинга, в соответствии с которой глубинные воды океана поднимаются вверх и на определенном уровне континентального склона происходит осаждение фосфоритов (Батулин, 2004). Однако в нашем случае нет никаких данных, что в районе южной границы Балтийского щита в раннем палеозое существовала структура, близкая по морфологии к континентальному склону. Пространственная и хронологическая близость фосфатных и углеродистых фаций различного возраста прослеживается во многих регионах мира. С классических позиций, это осадочные образования, которые маркируют определенные зоны литогенеза. В настоящее время такие образования все чаще рассматриваются с позиции глубинного тектогенеза и поступления главных компонентов из мантии (Беленицкая, 2020). Появляется все больше данных о связи необычно высоких концентраций металлов с региональными разломами, которые контролируют глубинный привнос этих элементов (Енгальчев, 2011). Подобная ассоциация (фосфориты–черные сланцы), но рифейского возраста известна в северном обрамлении Балтийского щита в районе полуостровов Средний–Рыбачий, где также прогнозируются и титан-циркониевые месторождения (россыпи?) и выделяется региональная сдвиговая зона, известная как Тролльфиорд–Рыбачий–Канин (Балуев и др., 2016).

Таким образом, распределение U, Mo, V, Re и других рудных компонентов контролировалось

системой долгоживущих проницаемых зон и горизонтами флюидоупоров (поверхности несогласия, глинистые пласты, обогащенные органикой или коры выветривания). Все это сближает наблюдаемую ситуацию с месторождениями типа несогласия и позволяет предполагать, что участки ордовикских пород с аномальными содержаниями рудных компонентов могут являться индикаторами глубинных залежей в подошве венда или рифея.

## ВЫВОДЫ

Представленная работа продолжает структурные исследования Балтийско-Мезенской тектонической зоны (Колодяжный, 2016; Колодяжный и др., 2020а, б), направленной на геохимическое изучение пород в пределах Дудергофской структуры. С этой целью были изучены образцы пластовой и жильной формы залегания нижнепалеозойского разреза. Проведенные исследования позволили прийти к следующим выводам.

1. В пределах Балтийско-Мезенской сдвиговой зоны, развитой в южном обрамлении Балтийского щита, выделяются участки аномальной складчатости, в которых породы чехла Русской плиты деформированы. Одним из таких участков является район Дудергофских дислокаций, для которых характерны специфические геохимические характеристики как пластовых стратифицируемых тел, сложенных песками, фосфоритами и черными сланцами, так и жильных образований. Изученные образцы черных сланцев и фосфоритов по некоторым элементам (U, V, Mo, REE, Th) заметно отличаются от аналогичных образований Прибалтийского урано-фосфоритового бассейна вне зон дислокаций.

2. Составы акцессорных минералов в породах из пластовых – стратифицируемых и секущих – тел принципиально различаются. В первом случае это устойчивые к механическому выветриванию минералы: циркон, лейкоксен, турмалин, ильменит, а во втором – сульфиды и гидроокислы железа. Преобладание лейкоксена над ильменитом в стратифицируемых горизонтах указывает на термальное воздействие (порядка 300–500°C, по данным А.Б. Макеева (2016)), приведшее к “лейкоксенизации” ильменита. Высокие температуры обусловлены не глубиной погружения этих пород (более 10 км), а поступлением горячих флюидов вдоль тектонических нарушений.

3. Изученные пески саблинской свиты содержат большое количество SiO<sub>2</sub> и ряд микроэлементов, отличающих их от других подобных образований. Использование дискриминационных диаграмм La/Yb–Ba/La, Co/Hf–Ce/Cr, Sc/Th–La/Sm, Th/Sc–Sc для оценки условий образования кварцевых песков показывает, что областью сноса для песков кембрийского возраста не могла быть восточная

(архейская) часть Балтийского щита. Все (структурные, минералогические и геохимические) данные позволяют предположить, что наблюдаемые кварцевые пески, хоть и являются осадочными, но подверглись значительным наложенным преобразованиям.

4. Породы из секущих жилородных и диапироподобных тел близки по содержанию урана, ванадия, тория или фосфора к пластовым – стратифицируемым – телам, которые в ряде случаев рассматриваются как комплексные месторождения. Поэтому секущие образования могли быть каналами высокой флюидной проницаемости, которые обусловили не только вторичное преобразование исходных пород из стратифицируемых образований, но и контролировали поверхностное накопление рудных элементов в пределах Балтийско-Мезенской тектонической зоны, являющейся границей Балтийского щита.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасов М.Н., Казак А.П. (2009) Проявление тектономагматической активизации на северо-западе Русской плиты и перспективы поисков полезных ископаемых (Псковская, Ленинградская, Новгородская области). *Вестн. СПбГУ. Сер. 7*, (4), 20-30.
- Афанасов М.Н., Казак А.П., Лейкум М.С. (2008) Необычный состав рыхлых отложений в бассейне р. Мга в Ленинградской области. *Вестн. СПбГУ. Сер. 7*, (2), 60-66.
- Афанасов М.Н., Николаев В.А. (2003) Перспективы алмазности Карельского перешейка (Западное Приладожье). *Регион. геология и металлогения*, **18**, 116-121.
- Балуев А.С., Морозов Ю.А., Терехов Е.Н., Баянова Т.Б., Тюпанов С.Н. (2016) Тектоника области сочленения Восточно-Европейского кратона и Западно-Арктической платформы. *Геотектоника*, (5), 3-35. DOI: 10.7868/S0016853X16050027
- Батурин Г.Н. (2004) Фосфатонакопление в океане. М.: Наука, 460 с.
- Батурин Г.Н., Ильин А.В. (2013) Сравнительная геохимия ракушечных фосфоритов и диктионемовых сланцев Прибалтики. *Геохимия*, (1), 27-37. DOI: 10.7868/S0016752513010020
- Беленицкая Г.А. (2020) Соли земли: тектонические, кинематические и магматические аспекты геологической истории. М.: ГЕОС, 605 с.
- Вялов В.И., Ларичев А.И., Балахонова А.С. (2013) Рудогенез диктионемовых сланцев и оболовых песчаников Прибалтийского бассейна. *Регион. геология и металлогения*, **55**, 87-98.
- Геология СССР. Т. 1. Ленинградская, Псковская и Новгородская области (1971) Гл. ред. А.В. Сидоренко. М.: Недра, 503 с.
- Енгальчев С.Ю. (2007) Геолого-геохимические особенности жил инъекционных туфизитов из среднедевонских песчаников юго-запада Ленинградской области. *Вестн. СПбГУ. Сер. 7*, (4), 3-14.
- Енгальчев С.Ю. (2011) Восходящие флюидные разгрузки и металлогения плитных комплексов Восточно-Европейской платформы. *Вестн. ВГУ. Сер.: Геол.*, (2), 16-25.
- Енгальчев С.Ю. (2013) Перспективные на рений объекты в осадочном чехле северо-запада Русской плиты. *Разведка и охрана недр*, (5), 3-8.
- Колодяжный С.Ю. (2016) Структурно-кинематические условия формирования Дудергофской структуры (юго-восточная окраина Балтийского щита). *Изв. вузов. Геология и разведка*, (5), 8-15.
- Колодяжный С.Ю., Терехов Е.Н., Балуев А.С. (2020б) Структурно-кинематические парагенезы и динамическая модель эволюции Балтийско-Мезенской зоны в фанерозое, северо-запад Восточно-Европейской платформы. *Геотектоника*, (2), 48-74. DOI: 10.31857/S0016853X20020071
- Колодяжный С.Ю., Терехов Е.Н., Балуев А.С., Польшук А.В., Зыков Д.С. (2020а) Тектоника и этапы эволюции Балтийско-Мезенской сдвиговой зоны в фанерозое, северо-запад России. *Геотектоника*, (1), 3-22. DOI: 10.31857/S0016853X20010051
- Котова Л.Н., Подковыров В.Н. (2014) Раннепротерозойские ортопороды в свекокарелидах пояса Саво, Западное Приладожье: Геохимические особенности. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **22**, (5), 3-21. DOI: 10.7868/S0869592X14050068
- Кузнецов Н.Б., Орлов С.Ю., Миллер Е.Л., Шацилло А.В., Дронов А.В., Соболева А.А., Удоратина О.В., Герелс Дж. (2011) Первые результаты U-Pb датирования детритных цирконов из раннепалеозойских и девонских песчаников Южного Приладожья. *Докл. АН*, **438**(6), 787-793.
- Лаломов А.В., Платонов М.В., Тугарова М.А., Боичева А.А., Чефранова А.В. (2015) Редкометалльно-титановая россыпная металлоносность кембро-ордовикских песчаников северо-запада Русской плиты. *Литология и полез. ископаемые*, (6), 563-575.
- Ларин А.М. (2011) Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 402 с.
- Лобанов И.Н. (1976) О природе дислокаций Дудергофских высот в окрестностях Ленинграда. *Геотектоника*, (6), 89-98.
- Макеев А.Б. (2016) Типоморфные особенности минералов титановых руд Пижемского месторождения. *Минералогия*, (1), 24-49.
- Малаховский Д.Б., Амантов А.В. (1991) Геолого-геоморфологические аномалии на севере Европы. *Геоморфология*, (1), 85-95.
- Малаховский Д.Б., Саммет Э.Ю. (1982) Ледниковые отторженцы и гляциодислокации Северо-Запада Русской равнины. *Материалы гляциологических исследований*, **44**, 121-128.
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н. (2009) Состав питающих провинций и особенности геологической истории позднедевонского форландового бассейна Тиманского орогена. *Геохимия*, (12), 1294-1318.
- Маслов А.В., Шевченко В.П., Подковыров В.Н., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Новигатский А.Н., Филиппов А.О., Шевченко Н.В. (2014) Особенности распределения элементов-примесей и редкоземельных элементов в современных донных осадках нижнего течения р. Северной Двины и Белого моря. *Литология и полез. ископаемые*, (6), 463-492.
- Можаев Б.Н. (1973) Новейшая тектоника Северо-Запада Русской равнины. М.: Л.: Недра, 231 с.
- Никитин М.Ю. (2008) О природе Дудергофских дислокаций. *Отечественная геоморфология: прошлое, настоящее, будущее*. Мат-лы XXX пленума Геомор-

- фологической комиссии РАН. СПб.: СПб ГУ, 314-317.
- Подковыров В.Н., Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Ершова В.Б. (2017) Литостратиграфия и геохимия отложений верхнего венда–нижнего кембрия Северо-Востока Балтийской моноклинали. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **25**(1), 3-23. DOI: 10.7868/S0869592X16060065
- Пуура В., Туулинг И. (1988) О геологической позиции раннеордовикских кластических даек на о-ве Осмусаар. *Изв. АН Эстонской ССР*, **37**(1), 1-8.
- Скопенко Н.Ф., Иванов А.И., Корнилов М.Ф. (1998) Перспективы алмазности зоны сочленения Балтийского щита и Русской плиты. *Разведка и охрана недр*, (7-8), 31-32.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. (1988) Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 384 с.
- Терехов Е.Н., Балуев А.С., Колодяжный С.Ю., Белокрыс М.А. (2017) Элементы-примеси в верхнедевонских отложениях из зоны складчато-разрывных дислокаций горы Андома (Юго-Восточное Прионежье) и их индикативная роль в выявлении источников сноса. *Литология и полез. ископаемые*, (4), 367-382. DOI: 10.7868/S0024497X17040061
- Терехов Е.Н., Макеев Д.А., Панфилов И.П., Щербакова Т.Ф., Балуев А.С., Ермолаев Б.В. (2017) О природе вторичных кварцитов острова Большой Тютерс (Финский залив), Россия. *Литосфера*, **17**(6), 34-56. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2017-6-062-080>
- Фадин Я.Ю., Панова Е.Г., Олейникова Г.А., Воронин Д.О. (2016) Геохимические особенности черных сланцев месторождений района Нарке (Швеция). *Вестн. СПбГУ*, Сер. 7, (2), 27-36.
- Чувардинский В.Г. (2012) Четвертичный период. Новая геологическая концепция. Апатиты: КНЦ РАН, 179 с.
- Якобсон К.Э., Казак А.П., Толмачева Е.В. (2003) Туф-физиты под Санкт-Петербургом. *Природа*, (5), 61-63.
- Fedorov P.V., Palkina A.I. (2015) Surface textures of sand grains from quartz arenite stratotype sections of sablika formation (Cambrian, series 3; Saint Petersburg vicinity, Northwest Russia): The key to understanding of continental processes at the Guzhangian-Furongian boundary. *Вестн. СПбГУ. Сер. 7*, (4), 37-49.
- Kilian R., Behrman J.H. (2003) Geochemical constraints on the sources of Southern Chile Trench sediments and their recycling in arc magmas of the Southern Andes. *J. Geol. Soc. (London)*, **160**, 57-70.
- Okina O., Lyapunov S., Avdosyeva M., Ermolaev B., Golubchikov V., Gorbunov A., Sheshukov V. (2016) An investigation of the reliability of HF acid mixtures in the bomb digestion of silicate rocks for the determination of trace elements by ICP-MS. *Geostand. Geoanal. Res.*, **40**, 583-597.
- (2), 60-66. (In Russian)
- Afanasov M.N., Nikolaev V.A. (2003) Prospects of diamond bearing of the Karelian isthmus (Western Ladoga region). *Region. Geologiya i Metallogeniya*, **18**, 116-121. (In Russian)
- Baluyev A.S., Morozov Yu.A., Terekhov E.N., Bayanova T.B., Tupanov S.N. (2016) Tectonics of the junction of the East European craton and the West Arctic platform. *Geotektonika*, (5), 3-35. (In Russian)
- Baturin G.N. (2004) *Fosfatonakoplenie v okeane* [Phosphat-accumulation in the ocean]. Moscow, Nauka Publ., 460 p. (In Russian)
- Baturin G.N., Il'in A.V. (2013) Comparative Geochemistry of shell phosphorites and dictionem shales of the Baltic States. *Geokhimiya*, (1), 27-37. (In Russian)
- Belenitskaya G.A. (2020) *Soli zemli: tektonicheskie, kinematicheskie i magmaticheskie aspekty geologicheskoi istorii* [Earth's salts: tectonic, kinematic and magmatic aspects of geological history]. Moscow, GEOS Publ., 605 p. (In Russian)
- Chuvardinskii V.G. (2012) *Chetvertichnyi period. Novaya geologicheskaya kontseptsiya* [Quaternary period. New geological concept]. Apatity, KSC RAS, 179 p. (In Russian)
- Geologiya SSSR. T. 1. Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti.* (Gl. red. A.V. Sidorenko) (1971) [Geology of the USSR. T. 1. Leningrad, Pskov and Novgorod regions. (Ch. ed. A.V. Sidorenko)] Moscow, Nedra Publ., 503 p.
- Engalychev S.Yu. (2007) Geological and geochemical features of injection tuffite veins from the Middle Devonian sandstones of the South-West of the Leningrad region. *Vestn. St.Petersburg. Univ. Ser. 7*, (4), 3-14. (In Russian)
- Engalychev S.Yu. (2011) Ascending fluid discharges and metallogeny of plate complexes of the East European platform. *Vestn. VGU. Ser.: Geol.*, (2), 16-25. (In Russian)
- Engalychev S.Yu. (2013) Promising rhenium objects in the sedimentary cover of the North-West of the Russian plate. *Razvedka i Okhrana Nedr*, (5), 3-8. (In Russian)
- Fadin Ya.Yu., Panova E.G., Oleinikova G.A., Voronin D.O. (2016) Geochemical features of black shale deposits in the Nerke region (Sweden). *Vestn. St.Petersburg. Univ. Ser. 7*, (2), 27-36. (In Russian)
- Fedorov P.V., Palkina A.I. (2015) Surface textures of sand grains from quartz arenite stratotype sections of Sablika formation (Cambrian, series 3; Saint Petersburg vicinity, Northwest Russia): The key to understanding of continental processes at the Guzhangian-Furongian boundary. *Vestn. St.Petersburg. Univ. Ser. 7*, (4), 37-49.
- Kilian R., Behrman J.H. (2003) Geochemical constraints on the sources of Southern Chile Trench sediments and their recycling in arc magmas of the Southern Andes. *J. Geol. Soc. (London)*, **160**, 57-70.
- Kolodyazhnyi S.Yu. (2016). Structural and kinematic conditions for the formation of the Duderhof structure (South-Eastern margin of the Baltic shield). *Izv. Vyssh.Uchebn. Zaved. Geologiya i Razvedka*, (5), 8-15. (In Russian)
- Kolodyazhnyi S.Y., Terekhov E.N., Baluyev A.S. (2020) Structural-kinematic parageneses and dynamic evolution model of the Baltic-Mezen shear zone in the Phanerozoic, the northwestern part of the East European platform. *Geotectonics*, **54**(2), 188-211. DOI: 10.1134/S0016852120020077

## REFERENCES

- Kolodyazhnyi S.Y., Terekhov E.N., Baluev A.S., Poleshchuk A.V., Zykov D.S. (2020a) Tectonic features and stages of evolution of the Baltic–Mezen shear zone in the Phanerozoic, northwestern Russia. *Geotectonics*, **54**(1), 1–18. DOI: 10.1134/S0016852120010057
- Kotova L.N., Podkovyrov V.N. (2014) Early Proterozoic orthorocks in the svekokarelid of the Savo belt, Western Ladoga region: Geochemical features. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **22**, (5), 3–21. (In Russian)
- Kuznetsov N.B., Orlov S.Yu., Miller E.L., Shatsillo A.V., Dronov A.V., Soboleva A.A., Udoratina O.V., Gerels J. (2011) First results of U/Pb Dating of detritus zircons from early Paleozoic and Devonian sandstones of the southern Ladoga region. *Dokl. Akad. Nauk*, **438**, (6), 787–793. (In Russian)
- Lalomov A.V., Platonov M.V., Tugarova M.A., Bochnova A.A., Chefranova A.V. (2015) Rare-Metal titanium placer metal content of the cambro-Ordovician sandstones of the North-West of the Russian plate. *Litol. Polezn. Iskop.*, (6), 563–575. (In Russian)
- Larin A.M. (2011) *Granity rapakivi i assotsiiruyushchie porody* [Rapakivi granites and associated rocks]. St.Petersburg, Nauka Publ., 402. (In Russian)
- Makeev A.B. (2016) Typomorphic features of the minerals titanium ore Pizhensky deposit. *Mineralogiya*, (1), 24–49. (In Russian)
- Malakhovskii D.B., Amantov A.V. (1991) Geological and geomorphological anomalies in the North of Europe. *Geomorfologiya*, (1), 85–95. (In Russian)
- Malakhovskii D.B., Sammet E.Yu. (1982) Glacial outcrops and glacioidislocations of the North-West of the Russian plain. *Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy* [Glaciological research materials], **44**, 121–128. (In Russian)
- Maslov A.V., Grazhdankin D.V., Podkovyrov V.N. (2009) Composition of feeding provinces and features of the geological history of the late Vendian foreland basin of the Timan orogen. *Geochimiya*, (12), 1294–1318. (In Russian)
- Maslov A.V., Shevchenko V.P., Podkovyrov V.N., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P., Novigatskii A.N., Filippov A.O., Shevchnko N.V. (2014) Features of the distribution of trace elements and rare earth elements in modern bottom sediments of the lower stream of the Northern Dvina river and the White Sea. *Litol. Polezn. Iskop.*, (6), 463–492. (In Russian)
- Mozhaev B.N. (1973) *Noveishaya tektonika Severo-Zapada Russkoi ravniny* [The newest tectonics of the North-West of the Russian plain]. Moscow; Leningrad, Nedra Publ., 231 p. (In Russian)
- Nikitin M. (2008) About the nature of Duderhof dislocations. Russian geomorphology: past, present, and future. *Materialy XXX Plenuma Geomorfologicheskoi komissii RAN* [Proc. XXX Plenum of the Geomorphological Commission of RAS] St.Petersburg, St.Petersburg St. Univ. Publ., 314–317. (In Russian)
- Okina O., Lyapunov S., Avdosyeva M., Ermolaev B., Golubchikov V., Gorbunov A., Sheshukov V. (2016) An investigation of the reliability of HF acid mixtures in the bomb digestion of silicate rocks for the determination of trace elements by ICP-MS. *Geostand. Geoanal. Res.*, **40**, 583–597.
- Podkovyrov V.N., Maslov A.V., Kuznetsov A.B., Ershova V.B. (2017) Lithostratigraphy and Geochemistry of Upper Vendian–Lower Cambrian deposits in the North-East of the Baltic monocline. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **25**, (1), 3–23. (In Russian)
- Puura V., Tuuling I. (1988). On the geological position of the early Ordovician clastic dikes on Osmussaar island. *Izv. Akad. Nauk. Eston. SSR*, **37**(1), 1–8. (In Russian)
- Skopenko N.F., Ivanov A.I., Kornilov M.F. (1998) Prospects for diamond-bearing areas of the Baltic shield and Russian plate junction. *Razvedka Okhrana Nedr*, (7–8), 31–32. (In Russian)
- Teilor S.R., Mak-Lennan S.M. (1988) Kontinental'naya kora: ee sostav i evolyutsiya [Continental crust: Its composition and evolution]. Moscow, Mir Publ., 384 p. (In Russian)
- Terekhov E.N., Baluev A.S., Kolodyazhnyi S.Yu., Belokrys M.A. (2017) Impurity Elements in upper Devonian deposits from the zone of fold-discontinuous dislocations of mount Andoma (South-Eastern Prionezhye) and their indicative role in identifying sources of demolition. *Litol. Polezn. Iskop.*, (4), 367–382. (In Russian)
- Terekhov E.N., Makeev D.A., Panfilov I.P., Shcherbakova T.F., Baluev A.S., Ermolaev B.V. (2017) On the nature of secondary quartzites on Bolshoy Tyuters island (Gulf of Finland), Russia. *Litosfera*, **17**(6), 34–56. (In Russian)
- Vyalov V.I., Larichev A.I., Balakhonova A.S. (2013) Rudogenesis of dictionem shales and obolov sandstones of the Baltic basin. *Region. Geol. Metall.*, **55**, 87–98. (In Russian)
- Yakobson K.E., Kazak A.P., Tolmacheva E.V. (2003) Coffinite near St.Petersburg. *Priroda*, (5), 61–63. (In Russian)