

Литогеохимия и условия формирования отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-запада Балтийской моноклинали*

В. Н. Подковыров, Л. Н. Котова

Институт геологии и геохронологии докембрия Российской академии наук, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2

Для цитирования: Подковыров В. Н., Котова Л. Н. (2020). Литогеохимия и условия формирования отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-запада Балтийской моноклинали. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 65 (3), 600–619. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.310>

Проведено литохимическое изучение пограничных верхневендских — нижнекембрийских отложений Балтийской моноклинали в разрезах скважин Ленинградской области и северо-востока Эстонии в объеме редкинского, котлинского и лонтоваского горизонтов. Выявлены как общие особенности, так и отличия в породных ассоциациях отдельных горизонтов в различных скважинах, что является следствием локальных вариаций условий осадконакопления. Отложения редкинского горизонта, вскрытые только в скважинах центральной и восточной частей региона представлены умеренно глубоководными песчано-глинистыми осадками небольшой мощности. Накопление редкинских отложений происходило в дисокисных и аноксических обстановках с выраженными процессами бактериальной сульфатредукции и пиритизации осадков. Отложения котлинского горизонта представлены двумя группами пород. Преобладают в разрезах скважин на востоке и западе Ленинградской области разнообразные песчано-алевритовые породы, представляющих прибрежно-морские отложения окислительных обстановок в бассейне. В разрезах центральной части Балтийской моноклинали (р-н г. Санкт-Петербурга) распространены тонкозернистые глубоководные осадки дисокисных и железистых аноксических обстановок с заметным накоплением сидерита. Морские песчано-глинистые отложения лонтоваского горизонта нижнего кембрия имеют сходные литохимические характеристики с котлинскими отложениями «восточных» и «западных» разрезов территории, но формировались в условиях некоторого дефицита кислорода (дисокисные фации). Петрохимический анализ кернового материала показал, что все изученные отложения относятся к литогенным осадкам, в которых не наблюдается присутствия вулканогенного или пирогенного материала. Формирование осадочной последовательности верхнего венда — нижнего кембрия Балтийской моноклинали происходило в условиях пассивного континентального режима при постепенной смене гумидных климатических обстановок семиаридными.

Ключевые слова: литогеохимия, обстановки осадконакопления, терригенные породы, верхний венд, нижний кембрий, Балтийская моноклинали, Восточно-Европейская платформа.

* Работа выполнена в рамках темы НИР 0153-2019-0003 и при поддержке гранта РФФИ 17-05-00858.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2020

1. Введение

Балтийская моноклиналь является краевой северо-западной частью Московской синеклизы, где базальные отложения венд-кембрийского осадочного чехла Восточно-Европейской платформы (ВЕП) залегают на небольших глубинах и слабо изменены вторичными процессами (Аксенов, 1985), что создает благоприятные предпосылки для изучения истории их формирования. Отложения переходных горизонтов верхнего венда — нижнего кембрия Балтийской моноклинали на северо-западе ВЕП представлены валдайской и балтийской сериями (Решения..., 1965). Валдайская серия на данной территории, трансгрессивно перекрывающая дорифейский кристаллический фундамент ВЕП, охватывает редкинский и котлинский горизонты верхнего венда (Аксенов, 1985; Гниловская и др., 1979; Палеогеография..., 1980; Хераскова и др., 2005; Гражданкин и Маслов, 2015). Балтийская серия в изученных разрезах Балтийской моноклинали включает ломоносовскую и сиверскую свиты лонтоваского горизонта нижнего кембрия на территории России (Решения..., 1965; Келлер и Семихатов, 1979) и лонтоваскую свиту одноименного горизонта на территории Эстонии (Meidla, 2017).

Нами проведено литохимическое изучение пограничных отложений верхнего венда и нижнего кембрия Балтийской моноклинали Московской синеклизы на основе анализа образцов, отобранных из скважин (рис. 1) на территории Ленинградской области и прилегающей части северо-востока Эстонии. Эти отложения охватывают интервал редкинского и котлинского горизонтов верхнего венда и лонтоваского горизонта нижнего кембрия (рис. 2). Сопоставление разрезов проведено с учетом имеющихся современных представлений по стратиграфии отложений верхнего венда и нижнего кембрия данной территории (Вербицкий и др., 2012; Meidla, 2017), особенностей распределения палеонтологических остатков (Голубкова и др., 2016; 2018; Кушим и др., 2016), имеющихся данных по Rb-Sr- и Sm-Nd-возрастам генераций глинистых минералов пород (Горохов и др., 2007) и полученных в последнее время данных о возрастах обломочных цирконов в отложениях редкинского, котлинского и лонтоваского горизонтов (Ивлева и др., 2016; 2018; Ershova et al., 2019).

2. Литостратиграфия отложений верхнего венда — нижнего кембрия

Осадочный чехол Балтийской моноклинали начал формироваться в позднем венде, когда морской бассейн охватил большую часть северо-запада Восточно-Европейской платформы (Палеогеография..., 1980; Аксенов, 1985; Хераскова и др., 2005). Отложения редкинского горизонта, выделенные в старорусскую свиту, залегают в пределах Ленинградской области с несогласием на породах докембрийского фундамента Балтийского щита или же на нижнерифейских отложениях Пашского грабена (Вербицкий и др., 2012; Купцова и др., 2011; Жамойда, 2011; Максимов и др., 2015). Трансгрессивная последовательность умеренно глубоководных морских отложений старорусской свиты представлена в основании чередованием конгломератов и грубозернистых полимиктовых песчаников, вверх по разрезу замещающихся средне-мелкозернистыми песчаниками, а в кровле — глинами с прослоями алевропесчаников. Мощность свиты, полого погружающейся на юго-восток, составляет

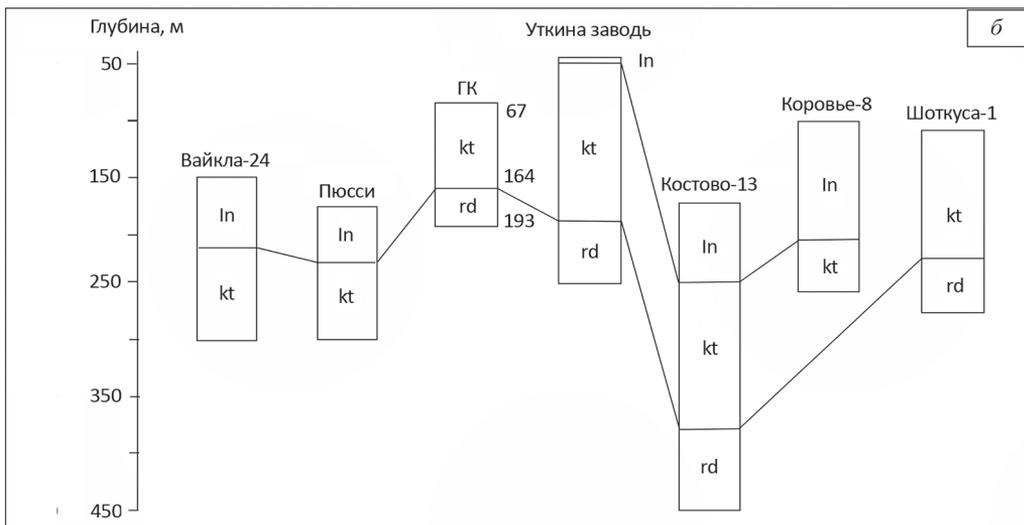
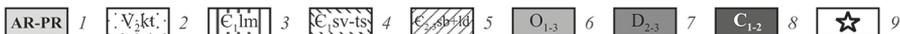
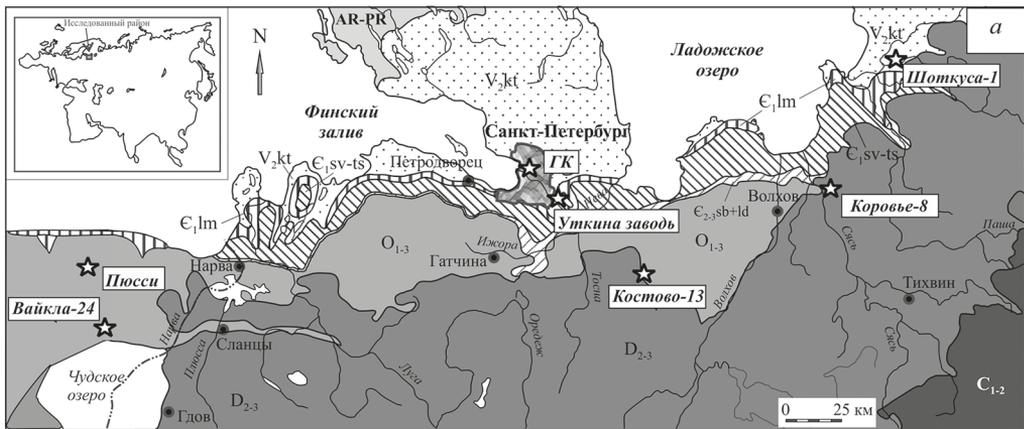


Рис. 1. Схематическая геологическая карта северо-востока Балтийской моноклинали (а), по (Вербицкий и др., 2012; Подковыров и др., 2017) с изменениями, положение исследованных скважин. Схема сопоставления и глубины выделенных стратиграфических горизонтов в изученных скважинах Балтийской моноклинали (б)

а: 1 — архей-протерозой; 2 — верхний венд (котлинский горизонт); 3–5 — кембрий (на территории Эстонии не расчлененный): 3 — нижний кембрий (ломоносовская свита); 4 — нижний кембрий (сиверская, люкатская и тискреская свиты); 5 — средний-верхний кембрий (саблинская и ладожская свиты); 6 — ордовик; 7 — средний-верхний девон; 8 — каменноугольные отложения нерасчлененные; 9 — положение исследованных скважин. б: ГК — скважина Геолкома, 1920-е гг., стратотип василеостровской свиты котлинского горизонта. Горизонты: rd — редкинский, kt — котлинский, ln — лонтоваский.

от 40–45 м в скв. Уткина-заводь и Шоткуса-1 до 60 м в скв. Костово-13 (рис. 1). Данные, полученные при изучении комплексов микрофоссилий в отложениях старорусской свиты, определяют ее принадлежность к редкинскому горизонту (Кушим и др., 2016). На территории Эстонии редкинские отложения в настоящее время не выделяются (Менс и Пиррус, 1986; 1987; Meidla, 2017).



Рис. 2. Стратиграфическая схема отложений верхнего венда и нижнего кембрия Балтийской моноклинали северо-запада ВЕП, по (Гражданкин и Маслов, 2015; Маслов и др., 2019) с изменениями

На севере и северо-востоке Балтийской моноклинали (Ленинградская область) к котлинскому горизонту относятся василеостровская и воронковская свиты (Вербицкий и др., 2012; Максимов и др., 2015). На территории Эстонии к данному горизонту относятся (рис. 2) гдовская, котлинская и воронковская свиты (Менс и Пиррус, 1987; Meidla, 2017). Василеостровская свита залегает согласно на старорусских отложениях в восточной части территории (скв. Шоткуса-1) (Кушим и др., 2016; Подковыров и др., 2017) или же непосредственно на породах фундамента в северо-западной части Ленинградской области (Вербицкий и др., 2012; Максимов и др., 2015; Подковыров и др., 2017) и на территории Эстонии (гдовская свита) (Менс и Пиррус, 1986; 1987). Отложения нижней части свиты мощностью 15–30 м, представлены переслаиванием мелкозернистых песчаников и алевролитов с тонкими слоями зеленовато-серых глин. Верхняя часть свиты сложена тонко переслаивающимися сероцветными алевролитами и глинами (ламинаритовые глины) с линзами и прослоями сидерита. Общая мощность свиты варьирует от 100 до 150 м.

Возраст василеостровской свиты однозначно не установлен, однако в верхней ее части (скв. Коровье-8) наиболее молодые конкордантные датировки обломочных цирконов группируются в интервале 536–545 млн лет (Ивлева и др., 2016; 2018;

Подковыров и др., 2017; Ershova et al., 2019) и присутствуют остатки организмов, характерных для раннекембрийского времени, в первую очередь уплощенных организмов Ceratophyton (Кушим и др., 2016). Трансгрессивно-регрессивный цикл седиментации котлинского времени завершается отложениями воронковской свиты, мощностью 10–20 м. (Палеогеография., 1980). Свита сложена внизу пестроцветными тонкослоистыми глинами и алевролитами, содержащими в базальной части разреза песчаные и гравийные зерна, вверху — белыми мелкозернистыми кварцевыми песками и алевролитами (Вербицкий и др., 2012; Гаген-Торн, 2016).

Нижняя граница кембрия (535 млн лет) согласно ОСШ России (Общая стратиграфическая..., 2016) в данном регионе определяется по региональному несогласию в подошве балтийской серии (т. е. по нижней границе ломоносовской или же лонтоваской свиты, Эстония) и появлению на этом уровне остатков скелетных организмов, характерных ихно- и фитофоссилий (Менс и Пиррус, 1971; 1987; Вербицкий и др., 2012; Голубкова и др., 2016; Mens and Pirrus, 1997). Эстонские геологи оценивают возраст подошвы лонтоваской свиты (Isozaki et al., 2014; Poldevere et al., 2014) в 529 млн лет.

Ломоносовская (лонтоваская) свита нижнего кембрия лежит с несогласием на воронковской свите в западной части региона (скв. Пюсси, Вайкла-24), а восточнее г. Санкт-Петербурга (скв. Коровье-8) на песчано-глинистых отложениях василюостровской свиты (Вербицкий и др., 2012; Подковыров и др., 2017). Свита мелководно-морского генезиса сложена мелкозернистыми полевошпатово-кварцевыми песчаниками и алевролитами в основании, трансгрессивно замещающимися переслаиванием глин и алевролитов в верхней части последовательности. Мощность свиты колеблется от 5 (скв. Уткина заводь) до 15–20 м (скв. Коровье-8).

Сиверская свита, согласно залегающая на ломоносовской, представлена толщей мощностью от 70 до 120 м серо-голубых глин с редкими и тонкими слоями алевролитов, формировавшихся в умеренно мелководном морском бассейне с элементами стратификации и сероводородного заражения вод (Вербицкий и др., 2012; Максимов и др., 2015).

Минералогическое и Rb-Sr- и Sm-Nd-изотопное изучение «голубых глин» лонтоваского горизонта балтийской серии нижнего кембрия выявило существование двух генераций иллита (Gorokhov et al., 1994; Горохов и др., 2007). Первая из них (аутигенная) позволила оценить возраст раннего диагенеза (близкого к седиментации) раннекембрийских глинистых осадков — около 533 ± 8 млн лет (Gorokhov et al., 1994). Вторая крупнозернистая генерация иллита с небольшой примесью хлорита (детритовая) являлась результатом преобразования пород в областях сноса. Rb-Sr- и Sm-Nd-возрасты детритовой генерации показали, что минимальный возраст размываемых пород северо-западных районов Восточно-Европейской платформы был заключен в пределах 790–720 млн лет (Горохов и др., 2007).

Выполненное в последние годы U-Pb-датирование обломочных цирконов из песчаников пограничных венд-кембрийских осадочных образований Ладожско-Лужской моноклинали (Ивлева и др., 2016; 2018; Ershova et al., 2019) позволило оценить вклад различных источников сноса в формировании платформенных отложений Балтийской моноклинали. Редкинские и большая часть котлинских отложений характеризуются преобладанием цирконов палеопротерозойского возраста с подчиненным количеством цирконов мезопротерозойского возраста. В песчаниках

верхней части разреза котлинских отложений (скв. Коровье-8, гл. 232 м) (Ивлева и др., 2016), как и вышележащих отложениях лонтоваской свиты нижнего кембрия преобладают обломочные цирконы мезопротерозойского возраста с появлением значимой популяции цирконов неопротерозойского, а также и раннекембрийского возраста (Ивлева и др., 2018; Ershova et al., 2019). Это свидетельствует, что в позднем венде основной питающей провинцией для северо-западных районов Русской платформы являлись кристаллические породы Балтийского щита с возрастов более 1.5 млрд лет, а в раннем кембрии и, по-видимому, даже в конце котлинского времени наряду с породами фундамента к ним добавились другие источники, вероятнее всего Тиманский ороген на северо-востоке ВЕП (Ивлева и др., 2018; Ershova et al., 2019).

Ранее для отдельных разрезов Балтийской моноклинали на основе анализа литохимических индикаторов состава и условий формирования глинистых пород было проведено сопоставление их с другими осадочными последовательностями котлинского «кризисного» этапа верхнего венда Восточно-Европейской платформы с целью определения обстановок формирования отложений и взаимосвязи с ними эволюции биоты (Маслов и др., 2018; 2019). В задачу наших исследований входил анализ вариаций и трендов изменения литохимических характеристик всего спектра терригенных пород пограничных отложений верхнего венда и нижнего кембрия Балтийской моноклинали, которые позволяют в той или иной мере судить об общих обстановках осадконакопления, палеоклимате, геодинамике и составе пород на палеоводосборах (Маслов, 2005). Исследования основаны на данных, полученных при изучении керна скважин Ленинградской области: Шоткуса-1, Коровье-8, Костово-13, Уткина заводь, и на территории северо-восточной Эстонии скважин Пюсси и Вайкла-24 (рис. 1).

3. Фактический материал и методика исследования

В основу настоящей работы положены данные о содержании главных породобразующих окислов для 250 образцов из всего спектра пород, вскрытых при бурении шести скважин. Часть аналитического материала взята из банка данных PRECSED ИГГД РАН (1994) (скв. Костово-13, Пюсси), другая часть аналитики была получена в последние годы в химических лабораториях ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) (скв. Шоткуса-1, Коровье-8) и ИГГ УрО РАН (г. Екатеринбург) (скв. Уткина заводь). Данные по скв. Вайкла-24 (Эстония) были заимствованы из работы Л. Сепп (Sepp, 2016).

В основу изучения особенностей химического состава исследуемых отложений и их номенклатурной принадлежности были положены различные петрохимические модули, широко применяемые в литохимической практике и используемые в генетических и классификационных целях (Юдович, 1981; Ефремова и Стафеев, 1985; Маслов и др., 2018). Слабометаморфизованные осадочные отложения, какими являются изучаемые нами платформенные образования ВЕП, содержат непостоянные и зачастую высокие содержания ППП (потери при прокаливании). В исследуемых нами отложениях содержание ППП варьирует в пределах от 0.25 мас. % (в кварцевых песчаниках) до 13 мас. % (в железистых аргиллитах с сидеритом). В этом случае применение модулей в виде отношений

породообразующих макроэлементов в составе пород по сравнению с абсолютными содержаниями окислов дают более достоверную геохимическую информацию (Ефремова и Стафеев, 1985).

Для геохимической характеристики состава изученных венд-кембрийских отложений были использованы шесть основных петрохимических модулей: $AM = Al_2O_3 / SiO_2$ — алюмокремневый модуль, $GM = (Al_2O_3 + TiO_2 + \sum FeO + MnO) / SiO_2$ — гидролизатный модуль, $FM = (\sum FeO + MnO + MgO) / SiO_2$ — фемический модуль, $NKM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$ — модуль нормированной щелочности, $JM = (\sum FeO + MnO) / (TiO_2 + Al_2O_3)$ — железный модуль, $TM = TiO_2 / Al_2O_3$ — титановый модуль.

Алюмокремневый модуль (AM) был взят в основу литолого-петрохимической классификации осадочных пород по (Неелов, 1980), где параметр a (атом. кол.) соответствует величине AM (мас. %). По величине AM выделяются следующие группы силикатных пород: кварцевые песчаники (0–0.07), полимиктовые песчаники (0.07–0.19), алевролиты (включая алевроаргиллиты) (0.19–0.30), аргиллиты (0.30–0.42), сиаллиты (>0.42). Границы по группам пород рассчитаны нами путем интерполяции. В целом эта классификация в большей степени соответствует литологической характеристике терригенных алюмосиликатных пород, к которым относится подавляющая часть исследуемые нами отложения.

Гидролизатный модуль (GM) по (Юдович, 1981; Юдович и Кетрис, 2000) в основе своей отражает гипергенные процессы дифференциации вещества (выщелачивание и гидролиз) и при этом хорошо коррелируется с алюмокремневым модулем, с учетом различий в терминологии (см. рис. 3–8). Так, в классификации А. Н. Неелова (1980) к группе сиаллитов относятся высокоглиноземистые пелитолиты, в которых величина $AM > 0.42$ (в атом. кол. $AM > 0.50$). Приведенный нами модуль GM дополняет использование других петрохимических модулей, таких как JM, FM, НКМ и ТМ, которые разделяют породы на подтипы и классы. Разделение типов пород на геохимические классы (низко-, умеренно- и высоко-) была проведена по сиаллитовому стандарту (Юдович и Кетрис, 2000), так как основная часть отложений изученных разрезов относится по GM к типу сиаллитов.

Дополнительно рассмотрены модули JM и ТМ, которые косвенно могут свидетельствовать о наличии или отсутствии пирокластики в осадках (Юдович и Кетрис, 2000) и о климатических условиях их формирования (Мигдисов, 1960). Проанализирована общая и относительная щелочность пород по (Неелов, 1980), их тектоническая принадлежность (Roser and Korsch, 1986), генетический тип осадков (Cox et al., 1995; Юдович и Кетрис, 2000), а также охарактеризована величина CIA — индекс химического изменения (Nessbit and Young, 1982) для оценки интенсивности выветривания пород областей сноса осадков.

4. Описание разрезов по скважинам

Лито- и хемотратиграфический анализ терригенных отложений в рамках выделенных горизонтов верхнего венда — нижнего кембрия северо-запада Балтийской моноклинали проведен по разрезам отдельных скважин, начиная с восточной части территории Ленинградской области (скв. Шоткуса-1) до западной — скв. Пюсси и Вайкла-24 на северо-востоке Эстонии (рис. 1).

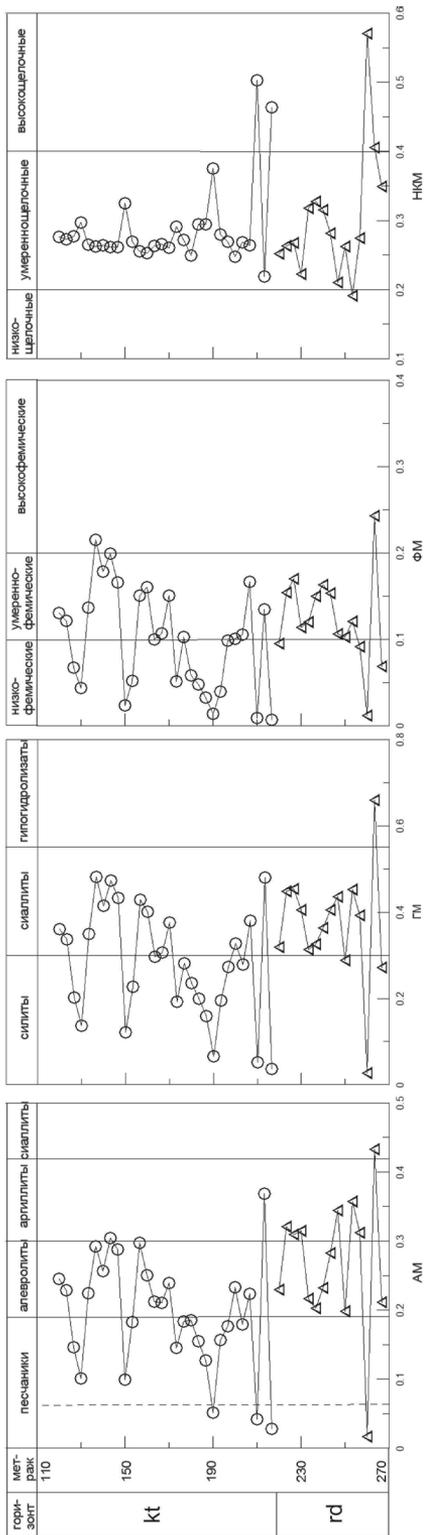


Рис. 3. Диаграммы вариаций отдельных модулей в осадочных породах скв. Шоткуса-1. Названия горизонтов: см. рис. 1, б

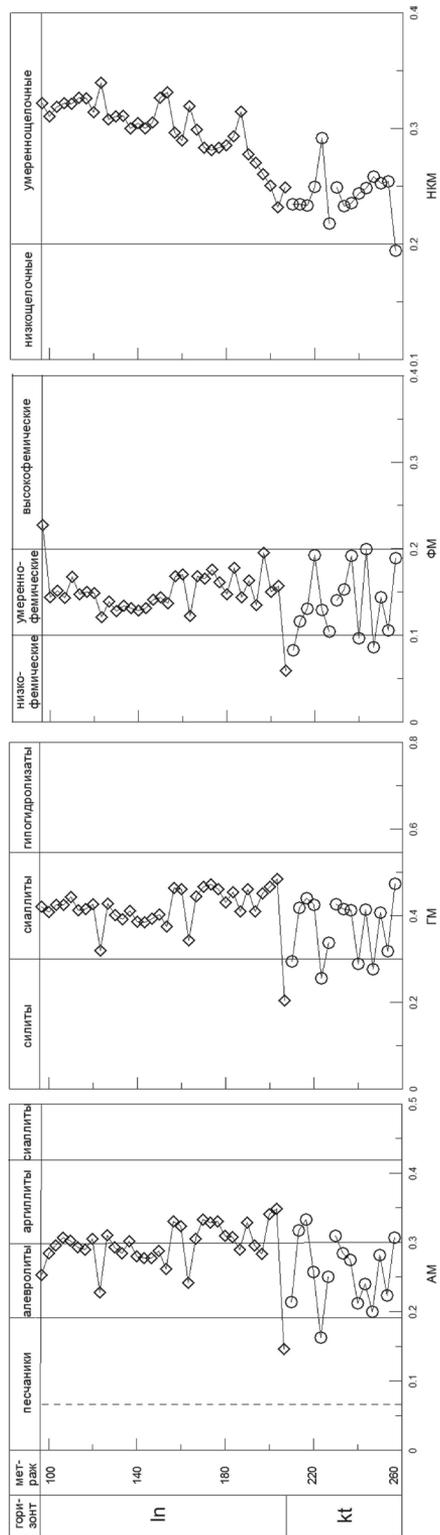


Рис. 4. Диаграммы вариаций отдельных модулей в осадочных породах скв. Коровье-8. Названия горизонтов: см. рис. 1, б.

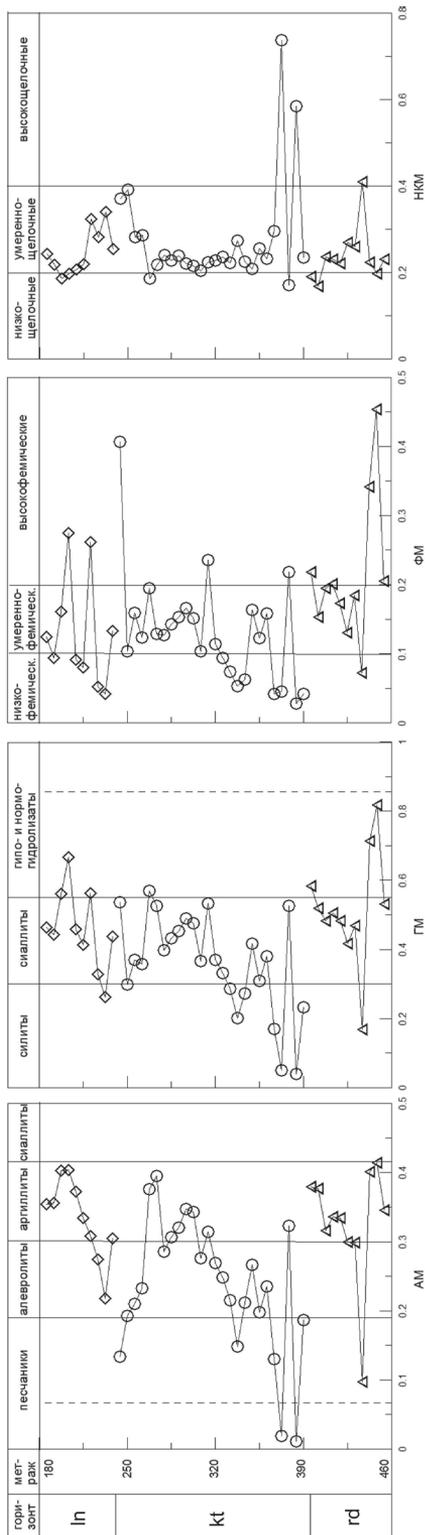


Рис. 5. Диаграммы вариаций отдельных модулей в осадочных породах скв. Костово-13. Названия горизонтов: см. рис. 1, б

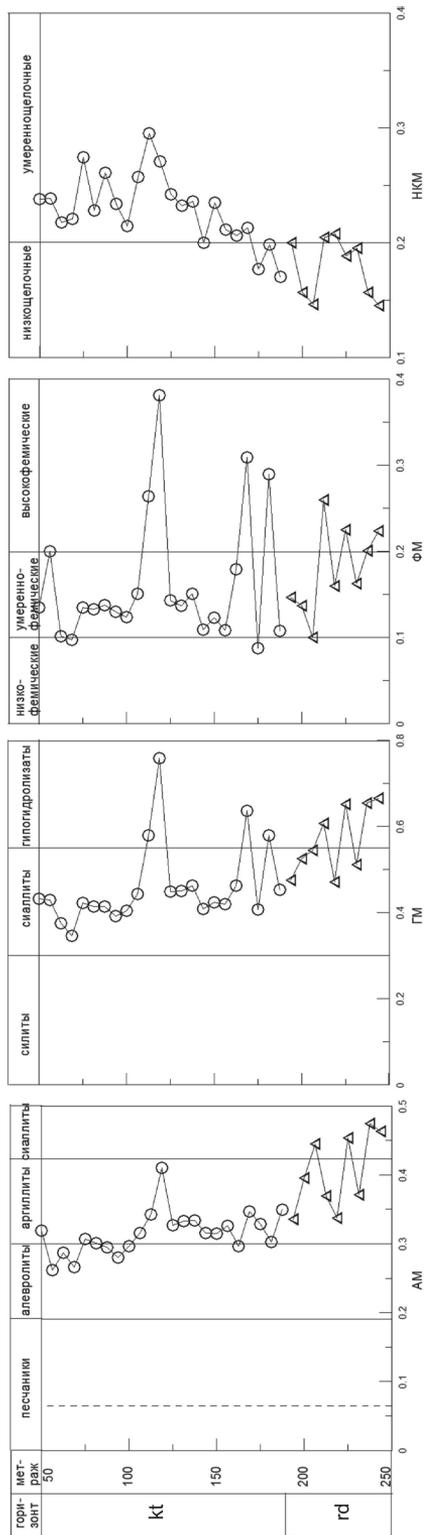


Рис. 6. Диаграммы вариаций отдельных модулей в осадочных породах скв. Уткина заводь. Названия горизонтов: см. рис. 1, б

Скв. Шоткуса-1 (рис. 1, 3). В базальной части разреза редкинского горизонта, несогласно перекрывающего песчаники приозерской свиты нижнего рифея (Ивлева и др., 2018) наблюдается переслаивание алевролитов, аргиллитов, сиаллитов и кварцевых песчаников с варьирующими значениями ФМ и НКМ. Верхняя часть редкинского горизонта включает переслаивание алевролитов и аргиллитов, которые относятся к умереннофемическому и умереннощелочному классам пород. Котлинский горизонт представлен переслаиванием полимиктовых песчаников и алевролитов. Песчаники относятся к низкофемическому классу пород, а алевролиты — к умереннофемическому классу; все отложения являются умереннощелочными и характеризуются большей частью близкими величинами НКМ.

Скв. Коровье-8 (рис. 1, 4). В низах разреза вскрыты отложения котлинского горизонта, сложенные преимущественно умереннофемическими и умереннощелочными алевролитами, среди которых встречаются прослои карбонатистых песчаников. Верхи разреза скважины относятся к лонтоваскому горизонту нижнего кембрия сложенного в нижней части разреза аргиллитами, а в верхней части — преимущественно алевролитами. В целом отложения лонтовасского уровня сложены достаточно однообразной толщиной умереннофемических и умереннощелочных алевроаргиллитов. При этом наблюдается заметный тренд увеличения НКМ от низов к верхам данного горизонта, что связано с уменьшением глинистой каолинитиллитовой компоненты от аргиллитов к алевролитам и возрастанием содержания обломочного калиевого полевого шпата (КПШ).

Скв. Костово-13 (рис. 1, 5). Отложения редкинского горизонта представлены преимущественно аргиллитами с отдельными прослоями полимиктовых песчаников. Нижние слои аргиллитов относятся к группе высокофемических пород за счет присутствия в них сидерита; вышележащие аргиллиты относятся к умереннофемическому и умереннощелочному классу пород. Отложения котлинского горизонта характеризуются разнообразным составом пород, где наблюдается незакономерное переслаивание кварцевых (в низах разреза), полимиктовых песчаников, алевролитов и аргиллитов. Эти отложения обладают варьирующей фемичностью и относятся к умереннощелочному классу пород. Исключение представляют кварцевые песчаники, относящиеся к высокощелочному классу за счет низкого содержания глинозема и примеси КПШ в их составе. Выделяются отдельные слои полимиктовых песчаников и отдельные слои аргиллитов, содержащих железистый карбонат (сидерит). Лонтовасский горизонт сложен в нижней части алевролитами, а в верхней — аргиллитами. По величине ФМ составы пород варьируют от низкофемических до высокофемических, а по величине НКМ относятся к умереннощелочному классу пород.

Скв. Уткина заводь (рис. 1, 6). Отложения редкинского горизонта по литохимическим данным представлены ассоциацией аргиллитов и сиаллитов. Аргиллиты относятся к умереннофемическому классу пород, сиаллиты — к высокофемическому классу (примесь пирита); те и другие относятся к низкощелочному классу пород. Котлинский горизонт представлен в нижней части разреза аргиллитами, в верхней части — алевролитами, которые в большей своей массе относятся к умереннофемическому и умереннощелочному классам пород. При этом в толще алевроаргиллитов в нижней и верхней частях горизонта наблюдаются слои высокофемических пород, содержащих по литохимическим и петрографическим данным до 50–70 % сидерита.

Скв. Пюсси (рис. 1, 7). Отложения котлинского горизонта представлены в основном толщей алевролитов с небольшой долей алевроаргиллитов. В нижней и верхней частях разреза появляются отдельные слои полимиктовых песчаников. В средней части котлинского горизонта выделяются слои высокофемических железистых пород на фоне основной группы отложений, относящихся к умереннофемическому и к умереннощелочному классам пород. Отложения лонтоваского горизонта включают толщу закономерно переслаивающихся кварцевых песчаников, полимиктовых песчаников и алевролитов. Эти отложения, за исключением кварцевых песчаников, относятся к умереннощелочному классу пород; полимиктовые песчаники относятся к классу низкофемических, а алевролиты — к классу умереннофемических пород.

Скв. Вайкла-24 (рис. 1, 8). По данным из работы Л. Сепп (Sepp, 2016) отложения котлинского горизонта представляют пеструю по петрохимическому составу толщу переслаивания алевролитов, аргиллитов (реже сиаллитов) с отдельными прослоями полимиктовых песчаников в нижней и верхней частях разреза. Песчаники и алевролиты относятся к низкофемическому классу пород, а аргиллиты — к умереннофемическому классу. Верхние слои песчаников относятся к низкощелочным составам, а основная часть алевролитов и аргиллитов при варьирующей величине НКМ относится к умереннощелочному классу пород. Лонтовасские отложения представлены умереннофемическими и умереннощелочными алевроаргиллитами.

5. Геохимическая характеристика терригенных отложений

На иллюстрируемых графиках приводятся только четыре модуля, поэтому отдельно охарактеризуем железистый модуль, который при расчетах оказался аналогом фемического модуля, и титановый модуль, который несмотря на некоторые вариации его величины характеризует весь комплекс исследуемых пород как однотипный.

Величина ЖМ, вычисленная для тонкозернистых осадков (сиаллитов), по (Юдович и Кетрис, 2000), всех шести разрезов не превышает 0.75, что свидетельствует об отсутствии в исследуемых отложениях такого типа пород как сиферлиты, наличие которых обозначало бы присутствие вулканогенного материала. Кроме того, об отсутствии пирокластики и вулканитов (подтипы пород псевдосиаллитов и псевдосиферлитов), по (Юдович и Кетрис, 2000) в исследуемых отложениях свидетельствуют низкие содержания MgO, которые составляют большей частью 1–2 мас. % и редко достигают 3 мас. %. Кривая вариаций ЖМ в приведенных разрезах практически аналогична таковой на графике ФМ, что косвенно свидетельствует об отсутствии влияния стабильно низких содержаний MgO и MnO на величину ФМ.

Титановый модуль (ТМ) варьирует в зависимости от состава отложений в пределах 0.04–0.07, что соответствует умереннотитановому классу пород. Исключение составляют наиболее кварцевые разности песчаников ($\text{SiO}_2 > 90\%$), в которых ТМ из-за низких содержаний Al_2O_3 увеличивается в несколько, а иногда и в десятки раз, что отвечает высокотитановым (кластогенный рутил) составам. Большая часть исследуемых отложений характеризуется величиной $\text{ТМ} > 0.05$, при которой величина $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2 < 20$, что может свидетельствовать (Мигдисов, 1960) о пре-

обладании гумидных климатических обстановок формирования изучаемых венд-кембрийских отложений.

Изучение щелочности осадочных пород по методике А.Н.Неелова (1980) показало, что практически все изученные породы относятся в основном к малощелочному ($\{Na_2O + K_2O\} < 0.10$, ат. кол.) и в меньшей степени к умереннощелочному ($\{Na_2O + K_2O\} = 0.10-0.20$, ат. кол.) классу пород; по соотношению щелочей они относятся к высококалиевому ($\{K_2O / (K_2O + Na_2O)\} = 0.75-0.90$, ат. кол.) и суперкалиевому ($\{K_2O / (K_2O + Na_2O)\} > 0.90$, ат. кол.) семействам за счет постоянного присутствия иллита и обломочного калиевого полевого шпата при отсутствии или низких концентрациях кислого плагиоклаза. Таким образом, все составы исследуемых осадочных пород характеризуются величиной $K_2O / Na_2O = 1-100$ (и больше) и на тектонической дискриминантной диаграмме $SiO_2 - K_2O / Na_2O$ (Roser and Korsch, 1986) ложатся в поле пассивных окраин, что свойственно платформенным отложениям.

Величина модуля нормированной щелочности НКМ в исследуемых отложениях за исключением кварцевых песчаников варьирует в пределах 0.20–0.40, что свидетельствует (Юдович и Кетрис, 2000) о присутствии как глинистого минерала (иллита), так и калиевого полевого шпата. Кроме того, из-за низкого содержания Na_2O в составе пород величина модуля НКМ приближается к величине K_2O / Al_2O_3 не превышающей 0.40, что также указывает (Cox et al., 1995) на присутствие литогенных компонентов в исследуемых породах.

Подтверждением литогенного генезиса осадочных пород как результат неоднократного рециклирования первичного осадочного субстрата может также служить величина индекса химического изменения $CIA = \{100 * Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)$, мол. кол.} (Nessbit and Young, 1982). Величина CIA в изученных нами тонкозернистых алюмосиликокластических отложениях частично обсуждалась ранее (Подковыров и др., 2017; Маслов и др., 2018; 2019). К этому можно добавить, что в преобладающей массе изученных нами терригенных отложений (за исключением кварцевых песчаников) величина CIA изменяется вполне закономерно и в среднем составляет в аргиллитах 80, в алевролитах — 70, а в полимиктовых песчаниках — около 60.

6. Заключение

Как следует из описания фактического материала (раздел 4), изученные ассоциации пород отдельно взятых горизонтов из различных разрезов не являются по составу вполне идентичными, что на наш взгляд объясняется, прежде всего, различиями в фациальных условиях осадконакопления.

Отложения редкинского горизонта (старорусская свита) вскрыты только в восточной части региона в трех скважинах Ленинградской области (Шоткуса-1, Костово-13 и Уткина заводь); в западной части Балтийской моноклинали на территории Эстонии они отсутствуют (Менс и Пиррус, 1971; 1987; Meidla, 2017). Эти отложения характеризуются относительно сходным составом пород и одинаковой небольшой мощностью (рис. 1, 40–60 м) и соответствуют своему геостратотипу в районе г. Старая Русса (Вербицкий и др., 2012). Здесь преобладают тонкозернистые осадки, представленные алевролитами, аргиллитами и сиаллитами (глиноземистыми аргиллитами); в основании свиты отмечаются песчаные прослои. Наиболее тонкозернистые глиноземистые составы, содержащие микроконкреции и лин-

зы пирита, присутствуют в отложениях скв. Уткина заводь, что свидетельствует об относительно глубинных дисокисных и аноксических условиях осадконакопления в данной части морского бассейна (Подковыров и др., 2017).

Отложения котлинского горизонта (василеостровская и воронковская свиты) отчетливо разделяются на две ассоциации или две толщи пород. Первая из них — пестрая по составу и преобладающая по распространенности толща (в пяти скважинах из шести) переменной мощности (рис. 1) — представлена незакономерным переслаиванием песчаников с алевролитами, реже с аргиллитами. На графиках АМ и ГМ кривая изменения состава этих отложений имеет пилообразный характер. Вторая — это весьма однородная по составу мощная толща (скв. Уткина заводь, 150 м), представленная умеренно и высокожелезистыми сидеритовыми алевроаргиллитами. Очевидно, что первая ассоциация осадочных пород отвечает прибрежным, мелководным фациям, а вторая — относительно глубоководным условиям формирования осадочных отложений.

Отложения лонтоваского горизонта, вскрытые в четырех скважинах, также как и котлинские, разделяются на две породные ассоциации. В трех скважинах нижнекембрийские отложения представлены неоднородной по составу толщей переслаивания алевролитов и аргиллитов, иногда с песчаниками (скв. Пюсси); эти отложения, скорее всего, относятся к ломоносовской или к лонтоваской (в Эстонии) свите. В одной из четырех скважин (Коровье-8) наблюдается преобладание тонкозернистых умеренно глубоководных алевроаргиллитов, характерных для отложений сиверской свиты, которые непосредственно ложатся на отложения котлинского горизонта. Поэтому изменения породных ассоциаций ломоносовской и сиверской свит, вероятно, связаны с локальными обстановками осадконакопления внутри лонтоваского горизонта. Таким образом, дифференцированный характер фациальных условий осадконакопления и перерывов в седиментации, которые подразумевает геоморфологические особенности бассейна осадконакопления, сохраняется от верхнего венда к нижнему кембрию, на что неоднократно обращали внимание Р. Э. Дашко с коллегами (2011). Принятая согласно ОСШ граница венда и кембрия в данном регионе (Жамойда, 2011), вероятно, далеко не всегда совпадает с подошвой отложений балтийской серии (ломоносовская или лонтоваская свиты), а определяется длительностью перерыва в осадконакоплении между верхнекотлинскими и лонтоваскими отложениями. Этот перерыв и сопутствовавший ему размыв верхнекотлинских отложений, судя по возрастам обломочных цирконов, может соответствовать интервалу от ~541 (граница кембрия в МСШ) до 535 млн лет (граница кембрия ОСШ), а, возможно, на западе территории и до принимаемого эстонскими геологами возраста начала лонтоваской трансгрессии в 529 млн лет.

Авторы выражают благодарность В. Б. Ершовой и А. С. Ивлевой за плодотворное обсуждение результатов исследования.

Литература

- Аксенов, Е. М. (1985). Венд Восточно-Европейской платформы. В: Б. С. Соколов, М. А. Федонкин, под ред. *Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2.* Москва: Наука, 3–34.

- Вербицкий, В.Р., Вербицкий, И.В., Васильева, О.В. и др. (2012). *Государственная геологическая карта Российской Федерации. М. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Листы О-35 (Псков), (N-35), О-36 (Санкт-Петербург). Объяснительная записка.* Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ.
- Гаген-Торн, О.Я. (2016). О формировании верхневендских-среднекембрийских глинистых толщ предглинтовой области. *Георесурсы*, 18 (2), 120–126. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.18.2.9>
- Гниловская, М.Б., Менс, К.А., Пашкявичене, Л.Т., Пиррус, Э.А. (1979). Погоризонтное расчленение верхнего венда в стратотипической местности. В: Б.М.Келлер, М.А.Семихатов, под ред., *Стратиграфия верхнего протерозоя СССР (рифей и венд)*. Ленинград: Наука, 117–121.
- Голубкова, Е.Ю., Кушим, К.А., Плоткина, Ю.В. (2016). Палеонтологическая характеристика пограничных отложений венда-кембрия северо-запада Русской плиты. В: *Материалы LXII сессии палеонтологического общества*. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 55–57.
- Голубкова, Е.Ю., Кушим, К.А., Кузнецов, А.Б., Яновский, А.С., Маслов, А.В., Шведов, С.Д., Плоткина, Ю.В. (2018). Редкинская биота макроскопических ископаемых организмов северо-запада Восточно-Европейской платформы (Южное Приладожье). *Доклады Академии наук*, 469 (2), 163–167. <https://doi.org/10.7868/S086956521808011X>
- Горохов, И.М., Мельников, Н.Н., Кузнецов, А.Б., Константинова, Г.В., Турченко, Т.Л. (2007). Sm-Nd систематика тонкозернистых фракций нижнекембрийских «синих глин» Северной Эстонии. *Литология и полезные ископаемые*, (5), 536–551.
- Гражданкин, Д.В., Маслов, А.В. (2015). Место венда в Международной стратиграфической шкале. *Геология и геофизика*, 56 (4), 703–717. <https://doi.org/10.15372/GiG20150406>
- Дашко, Р.Э., Александров, О.Ю., Котюков, П.В., Шидловская, А.В. (2011). Особенности инженерно-геологических условий Санкт-Петербурга. В: *Развитие городов и геотехническое строительство*, (1). Доступно на: www.urban-development.ru/2011/2.pdf (Дата доступа: 23.09.2020).
- Ефремова, С.В., Стафеев, К.Г. (1985). *Петрохимические методы исследования горных пород: Справочное пособие*. Москва: Недра.
- Жамойда, А.И. (ред.) (2011). *Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. Вып. 40*. Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ. Доступно на: http://www.vsegei.com/ru/about/msk/postanovleniya/msk2011_40.pdf (Дата доступа 23.09.2020).
- Ивлева, А.С., Подковыров, В.Н., Ершова, В.Б., Анфинсон, О., Худолей, А.К., Федоров, П.В., Маслов, А.В., Здобин, Д.Ю. (2016). Результаты U-Pb (LA-ICP-MS) датирования обломочных цирконов из верхневендско-нижнекембрийских отложений востока Балтийской моноклизы. *Доклады Академии наук*, 468 (4), 441–446. <https://doi.org/10.7868/S0869565216160209>
- Ивлева, А.С., Подковыров, В.Н., Ершова, В.Б., Хубанов, В.Б., Худолей, А.К., Сычев, С.Н., Вдовина, Н.И., Маслов, А.В. (2018). U-Pb (LA-ICP-MS)-возраст обломочных цирконов из отложений нижнего рифея и верхнего венда Лужско-Ладожской моноклинали. *Доклады Академии наук*, 480 (4), 439–443. <https://doi.org/10.7868/S0869565218160120>
- Келлер, Б.М., Семихатов, М.А. (ред.) (1979). *Стратиграфия верхнего протерозоя СССР (рифей и венд)*. Ленинград: Наука.
- Купцова, А.В., Худолей, А.К., Дэвис, В., Рейнбирд, Р.Х., Ковач, В.П., Загорная, Н.Ю. (2011). Возраст и источники сноса песчаников приозерской и салминской свит рифея в восточном борту Пашско-Ладожского бассейна (южная окраина Балтийского щита). *Стратиграфия. Геологическая корреляция*, 19 (2), 3–19.
- Кушим, Е.А., Голубкова, Е.Ю., Плоткина, Ю.В. (2016). Биостратиграфическое расчленение венд-кембрийских отложений Южного Приладожья. *Вестник ВГУ. Серия: геология*, (4), 18–22. Доступно на: <http://www.vestnik.vsu.ru/pdf/heologia/2016/04/2016-04-03.pdf> (Дата доступа 23.09.2020).
- Максимов, А.В., Богданов, Ю.Б., Воинова, О.А., Коссовая, О.Л. и др. (2015). *Государственная геологическая карта Российской Федерации. М. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Балтийская. Лист Р-(35), 36 — Петрозаводск. Объяснительная записка.* Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ.
- Маслов, А.В. (2005). *Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных*. Екатеринбург: Изд-во УГГУ.
- Маслов, А.В., Подковыров, В.Н., Гражданкин, Д.В., Колесников, А.В. (2018). Верхний венд востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы: процессы осадконакопления

- и эволюция биоты. *Литосфера*, 18 (4), 520–542. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-520-542>
- Маслов, А. В., Гражданкин, Д. В., Подковыров, В. Н. (2019). Поздневендский котлинский кризис на Восточно-Европейской платформе: литогеохимические индикаторы среды осадконакопления. *Литология и полезные ископаемые*, 54 (1), 1–26. <https://doi.org/10.31857/S0024-497X201912-30>
- Менс, К. А., Пиррус, Э. А. (1971). О стратиграфии пограничных слоев венда и кембрия на северо-западе Русской платформы. *Известия АН СССР. Серия геологическая*, (11), 93–103.
- Менс, К., Пиррус, Э. (1986). Северо-Прибалтийский фациальный профиль венда и кембрия. В: Э. А. Пиррус, под ред., *Фашии и стратиграфия венда и кембрия запада Восточно-Европейской платформы*. Таллинн: ИГ АН ЭССР, 7–23.
- Менс, К., Пиррус, Э. (1987). Стратиграфические пробелы в разрезе венда и кембрия Северной Прибалтики. *Известия АН ЭССР. Геология*, 36 (2), 49–57.
- Мигдисов, А. А. (1960). О соотношении титана и алюминия в осадочных породах. *Геохимия*, (2), 149–163.
- Неелов, А. Н. (1980). *Петрохимическая классификация метаморфизованных осадочных и вулканических пород*. Ленинград: Наука.
- Общая стратиграфическая шкала и методические проблемы разработки региональных стратиграфических шкал России. Материалы Межведомственного рабочего совещания*. (2016). Санкт-Петербург: Изд-во ВСЕГЕИ. Доступно на: https://vsegei.ru/ru/conf/events/obshchaya-stratigraficheskaya-shkala/tezisy_scale.pdf (Дата доступа 23.09.2020).
- Палеогеография и литология венда и кембрия запада Восточно-Европейской платформы*. (1980). Москва: Наука.
- 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. Геологическая корреляция*, 25 (1), 3–23. <https://doi.org/10.7868/S0869592X16060065>
- Решения Межведомственного совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем верхнего докембрия и палеозоя Русской платформы*. (1965). Ленинград: Недра.
- Хераскова, Т. Н., Андреева, Н. К., Воронцов, А. К., Каграманян, Н. А. (2005). История развития и геодинамика осадочного бассейна Московской синеклизы в позднем венде. *Литосфера*, (1), 16–40.
- Юдович, Я. Э. (1981). Региональная геохимия осадочных толщ. Ленинград: Наука.
- Юдович, Я. Э., Кетрис, М. П. (2000). Основы литохимии. Санкт-Петербург: Наука.
- Cox, R., Lowe, D. R. and Cullers, R. L. (1995). The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the south-western United States. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 59, 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Gorokhov, I. M., Clauer, N., Turchenco, T. L., Melnikov, N. N., Kutavin, E. P., Pirrus, E. and Baskakov, A. V. (1994). Rb-Sr systematics of Vendian-Cambrian claystones from the East European Platform: implications for a multi-stage illite evolution. *Chemical Geology*, 112, 71–89. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90105-8)
- Ershova, V. B., Ivleva, A. S., Podkovyrov, V. N., Khudoley, A. K., Fedorov, P. V., Stockli, D., Anfandon, O., Maslov, A. V. and Khubanov, V. (2019). Detrital zircon record of the Mesoproterozoic to Lower Cambrian sequences of NW Russia: implications for the paleogeography of the Baltic interior. *GFF*, 141 (3). <https://doi.org/full/10.1080/11035897.2019.1625073>
- Isozaki, Y., Pildvere, A., Bauert, H., Nakahata, H., Aoki, K., Sakata, S. and Hirata, T. (2014). Provenance shift in Cambrian mid-Baltica: detrital zircon chronology of Ediacaran-Cambrian sandstones in Estonia. *Estonian J. Earth Sciences*, 63, 251–256. <https://doi.org/10.3176/earth.2014.27>
- Meidla, T. (2017). Ediacaran and Cambrian stratigraphy in Estonia: an updated review. *Estonian Jour. of Earth Sciences*, 66 (3), 152–160. <https://doi.org/10.3176/earth.2017.12>
- Mens, K. and Pirrus, E. (1997). Cambrian. In: A. Raukas, A. Teedum, ed., *Geology and mineral resources of Estonia*. Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717. <http://dx.doi.org/10.1038/299715a0>
- Poldvere, A., Isozaki, Y., Bauert, H., Aoki, K., Sakata, S. and Hirata, T. (2014). Provenance of the Lower-Middle Paleozoic of Estonia in central Baltica: a possible link to Avalonia. *GFF*, 136, 214–217. <https://doi.org/10.1080/11035897.2013.873986>

- Roser, B.P. and Korsch, R.J. (1986). Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 94 (5), 635–650. <https://doi.org/10.1086/629071>
- Sepp, L. (2016). Redokssensitiivsed elemendid Balti basseini Ediacara-Kambriumi settekivimites Magis-tritöö, Tartu Ülikool. Available at: <https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/51607/LiinaSeppMSc.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 23 Sep. 2020].

Статья поступила в редакцию 25 мая 2019 г.
Статья рекомендована к печати 15 июня 2020 г.

Контактная информация:

Подковыров Виктор Николаевич — vpodk@mail.ru
Котова Людмила Николаевна — l.n.kotova@ipgg.ru

Lithochemistry and depositional environments of sedimentary rocks of the upper Vendian and lower Cambrian of the North-West Baltic monocline

V. N. Podkovyrov, L. N. Kotova

Institute of Precambrian Geology and Geochronology
of the Russian Academy of Sciences,
2, nab. Makarova, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

For citation: Podkovyrov V.N., Kotova L.N. (2020). Lithochemistry and depositional environments of sedimentary rocks of the upper Vendian and lower Cambrian of the North-West Baltic monocline. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 65 (3), 600–619. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2020.310> (In Russian)

A lithochemical and chemostratigraphic study of the boundary Upper Vendian–Lower Cambrian deposits of the Baltic monocline in the well sections of Leningrad Oblast and northeastern Estonia was carried out in the volume of the Redkino, Kotlin and Lontova horizons. Both common features and differences in the rock associations of individual horizons in different wells are revealed, which is a consequence of local variations of sedimentation conditions. The deposits of the Redkino horizon uncovered in the central and eastern parts of the region are characterized by a similar composition of rocks, represented by moderately deep-water sandy-clayey sediments of small thickness, formed in disoxic and anoxic environments with pronounced processes of bacterial sulfate reduction. The deposits of the Kotlin horizon are represented by two groups of rocks. In the sections of wells in the east and west of Leningrad Oblast, a variety of sandy-siltstone rocks, representing coastal-marine sediments of oxidative conditions in the basin, predominate. In sections of the central part of the Baltic monocline (district of St. Petersburg), fine-grained deep-water disoxic and ferruginous anoxic environments with a marked accumulation of siderite are common. Marine sandy-clay deposits of the Lontova horizon of the Lower Cambrian have similar lithochemical characteristics with the Kotlin deposits of the “eastern” and “western” sections of the territory, but they were formed under conditions of some oxygen deficiency (disoxic facies). Petrochemical analysis of core material showed that all the sediments studied belong to lithogenic sediments in which no presence of volcanic or pyrogenic material is observed. The formation of the sedimentary sequence of the Upper Vendian–Lower Cambrian of the Baltic monocline took place under the conditions of a passive continental regime with a gradual change of humid climatic conditions with semiarid ones.

Keywords: lithogeochemistry, sedimentation conditions, terrigenous rocks, Upper Vendian, Lower Cambrian, Baltic monocline, East European platform.

References

- Aksenov, Ye. M. (1985). Vend of the East European Platform. In: B. S. Sokolov, M. A. Fedonkin, ed., *Vendskaia sistema. Istoriko-geologicheskoe i paleontologicheskoe obosnovanie T. 2*. Moscow: Nauka Publ., 3–34. (In Russian)
- Cox, R., Lowe, D. R. and Cullers, R. L. (1995). The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the south-western United States. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 59, 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Dashko, R. E., Aleksandrov, O. Yu., Kotyukov, P. V. and Shidlovskaya, A. V. (2011). Peculiarities of geotechnical conditions of St. Petersburg. *Urban development and geotechnical construction*, (1). Available at: www.urban-development.ru/2011/2.pdf [Accessed 23 Sep. 2020].
- Decisions of the Interdepartmental Meeting on the Development of Unified Stratigraphic Schemes of the Upper Precambrian and Paleozoic of the Russian Platform*. (1962). Leningrad: Nedra Publ. (In Russian)
- Efremova, S. V. and Stafeyev, K. G. (1985). *Petrochemical methods for the study of rocks: A reference guide*. Moscow: Nedra Publ. (In Russian)
- Ershova, V. B., Ivleva, A. S., Podkovyrov, V. N., Khudoley, A. K., Fedorov, P. V., Stockli, D., Anfandon, O., Maslov, A. V. and Khubanov, V. (2019). Detrital zircon record of the Mesoproterozoic to Lower Cambrian sequences of NW Russia: implications for the paleogeography of the Baltic interior. *GFF*, 141 (3). <https://doi.org/full/10.1080/11035897.2019.1625073>
- Gagen-Torn, O. Y. (2016). Formation of the Upper Vendian-Middle Cambrian clayey strata of the pre-clint area. *Georesursy*, 18 (2), 120–126. <http://dx.doi.org/10.18599/grs.18.2.9> (In Russian)
- General stratigraphic scale and methodological problems of developing regional stratigraphic scales in Russia. Materials of the Interdepartmental Workshop*. (2016). St. Petersburg: Russian Geological Research Institute Press. Available at: https://vsegei.ru/ru/conf/events/obshchaya-stratigraficheskaya-shkala/tezisy_scale.pdf [Accessed 23 Sep. 2020]. (In Russian)
- Gnilovskaya, M. B., Mens, K. A., Pashkyavichene, L. T. and Pirrus, E. A. (1979). Horizontal dissection of the Upper Vendian in the stratotype locality. In: B. M. Keller, M. A. Semikhatov, ed., *Stratigrafia verkhnego proterozoya SSSR (Rifei i Vend)*. Leningrad: Nauka Publ., 117–121. (In Russian)
- Golubkova, Ye. Yu., Kushim, K. A., Kuznetsov, A. B., Yanovskiy, A. S., Maslov, A. V., Shvedov, S. D. and Plotkina, Yu. V. (2018). Redkinskaya biota of macroscopic fossil organisms in the northwest of the East European platform (Southern Ladoga area). *Doklady Akademii nauk*, 469 (2), 163–167. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18030169> (In Russian)
- Golubkova, Ye. Yu., Kushim, K. A. and Plotkina, Yu. V. (2016). Paleontological characteristics of the Vendian-Cambrian boundary deposits of the northwest of the Russian plate. In: *Materialy LXII sessii paleontologicheskogo obshchestva*, St. Petersburg: Russian Geological Research Institute Press, 55–57. (In Russian)
- Gorokhov, I. M., Clauer, N., Turchenko, T. L., Melnikov, N. N., Kutavin, E. P., Pirrus, E. and Baskakov, A. V. (1994). Rb-Sr systematics of Vendian-Cambrian claystones from the East European Platform: implications for a multi-stage illite evolution. *Chemical Geology*, 112, 71–89. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90105-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90105-8)
- Gorokhov, I. M., Melnikov, N. N., Kuznetsov, A. B., Konstantinova, G. V. and Turchenko, T. L. (2007). Sm-Nd taxonomy of fine-grained fractions of the Lower Cambrian “blue clays” of Northern Estonia. *Litologiya i poleznye iskopayemye*, (5), 536–551. <https://doi.org/10.1134/S0024490207050069>. (In Russian)
- Grazhdankin, D. V. and Maslov, A. V. (2015). The room of the Vendian in the International Stratigraphic Chart. *Russian Geology and Geophysics*, 56 (4), 549–559. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.03.007>
- Isozaki, Y., Pildvere, A., Bauert, H., Nakahata, H., Aoki, K., Sakata, S. and Hirata, T. (2014). Provenance shift in Cambrian mid-Baltica: detrital zircon chronology of Ediacaran–Cambrian sandstones in Estonia. *Estonian J. Earth Sciences*, 63, 251–256. <https://doi.org/10.3176/earth.2014.27>
- Ivleva, A. S., Podkovyrov, V. N., Ershova, V. B., Anfandon, O., Khudoley, A. K., Fedorov, P. V., Maslov, A. V. and Zdobin, D. Yu. (2016). Results of U-Pb (LA-ICP-MS) dating of detrital zircons from the Upper

- Vendian-Lower Cambrian deposits of the eastern Baltic monocline. *Doklady Akademii nauk*, 468 (4), 441–446. <https://doi.org/10.7868/S0869565216160209> (In Russian)
- Ivleva, A. S., Podkovyrov, V. N., Ershova, V. B., Khubanov, V. B., Khudoley, A. K., Sychev, S. N., Vdovina, N. I. and Maslov, A. V. (2018). U-Pb (LA-ICI-MS)-age of detrital zircons from the Lower Riphean and Upper Vendian deposits of the Luga-Ladoga monocline. *Doklady Akademii nauk*, 480 (4), 439–443. <https://doi.org/10.7868/S0869565218160120> (In Russian)
- Keller, B. M., Semikhatov, M. A. (ed.) (1979). *Stratigraphy of the Upper Proterozoic of the USSR (Riphean and Vendian)*. St. Petersburg: Nauka Publ. (In Russian)
- Kheraskova, T. N., Andreeva, N. K., Vorontsov, A. K. and Kahramanyan, N. A. (2005). History of development and geodynamics of the sedimentary basin of the Moscow syncline in the Late Vendian. *Lithosphere*, (1), 16–40. (In Russian)
- Kuptsova, A. V., Khudoley, A. K., Devis, V., Reynbird, R. Kh., Kovach, V. P. and Zagornaya, N. Yu. (2011). Age and sources of drift of sandstones of the Priozerskaya and Salma formations of the Riphean in the eastern side of the Pashko-Ladoga basin (southern edge of the Baltic shield). *Stratigrafiia. Geologicheskaiia korreliatsiia*, 19 (2), 3–19. (In Russian)
- Kushim E. A., Golubkova, E. Y. and Plotkina, Y. V. (2016). Biostratigraphic subdivision of the Vendian-Cambrian deposits of the Southern Ladoga area. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: geologiia*, (4), 18–22. (In Russian)
- Maksimov, A. V., Bogdanov, Iu. B., Voinova, O. A. and Kossovaia, O. L. et al. (2015). *State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1,000,000 (third generation). Baltic series. Sheet P (35), 36 — Petrozavodsk. Explanatory letter*. St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory. (In Russian)
- Maslov, A. V. (2005). *Sedimentary rocks: methods of studying and interpreting the data obtained*. Ekaterinburg: UGGU Publishing House. (In Russian)
- Maslov, A. V., Grazhdankin, D. V. and Podkovyrov, V. N. (2019). The Late Vendian Kotlin Crisis on the East European Platform: Litho-geochemical indicators of depositional environment. *Lithology and Mineral Resources*, 54 (1), 1–26. <https://link.springer.com/article/10.1134/S0024490219010048>
- Maslov, A. V., Podkovyrov, V. N., Grazhdankin, D. V. and Kolesnikov, A. V. (2018). Upper Vendian of the East, Northeast, and North of the East European Platform: Sedimentation Processes and Biota Evolution. *Lithosphere*, 18 (4), 520–542. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-4-520-542> (In Russian)
- Meidla, T. (2017). Ediacaran and Cambrian stratigraphy in Estonia: an updated review. *Estonian Jour. of Earth Sciences*, 66 (3), 152–160. <https://doi.org/10.3176/earth.2017.12>
- Mens, K. and Pirrus, E. (1986). North Baltic facial profile of the Vendian and Cambrian. In: *Fatsii i stratigrafiia venda i kembriia zapada Vostochno-Yevropeyskoi platformy*. Tallinn: Institute of Geology of the Academy of Sciences of the ESSR, 7–23. (In Russian)
- Mens, K. and Pirrus, E. (1987). Stratigraphic gaps in the Vendian and Cambrian section of the Northern Baltic. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaiia*, 36 (2), 49–57. (In Russian)
- Mens, K. and Pirrus, E. (1997). Cambrian. In: A. Raukas, A. Teedum, ed., *Geology and mineral resources of Estonia*. Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Mens, K. A. and Pirrus, E. A. (1971). Stratigraphy of the Vendian and Cambrian boundary layers in the northwest of the Russian Platform. *Izvestiia Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaiia*, 11, 93–103. (In Russian)
- Migdisov, A. A. (1960). About the ratio of titanium and aluminum in sedimentary rocks. *Geokhimiia*, (2), 149–163. (In Russian)
- Nesbitt, H. W. and Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299, 715–717. <http://dx.doi.org/10.1038/299715a0>
- Neyelov, A. N. (1980). *Petrochemical classification of metamorphosed sedimentary and volcanic rocks*. Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Paleogeography and lithology of the Vendian and Cambrian of the west of the East European Platform*. (1980). Moscow: Nauka Publ. (In Russian)
- Podkovyrov, V. N., Maslov, A. V., Kuznetsov, A. B. and Ershova, V. B. (2017). Lithostratigraphy and geochemistry of Upper Vendian-Lower Cambrian deposits in the northeastern Baltic monocline. *Stratigraphy and Geological Correlation*, 25 (1), 3–23. <https://doi.org/10.1134/S086959381606006X>

- Poldvere, A., Isozaki, Y., Bauert, H., Aoki, K., Sakata, S. and Hirata, T. (2014). Provenance of the Lower-Middle Paleozoic of Estonia in central Baltica: a possible link to Avalonia. *GFF*, 136, 214–217. <https://doi.org/10.1080/11035897.2013.873986>
- Roser, B.P. and Korsch, R.J. (1986). Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *The Journal of Geology*, 94 (5), 635–650. <https://doi.org/10.1086/629071>
- Sepp, L. (2016). Redokssensitiivsed elemendid Balti basseini Ediacara-Kambriumi settetikivimites Magistritöö, Tartu Ulikool. Available at: <https://dspace.ut.ee/bitstream/handle/10062/51607/LiinaSeppMSc.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accessed 23 Sep. 2020]. (In Estonian)
- Verbitskiy, V. R., Verbitskiy, I. V., Vasil'yeva, O. V. et al. (2012). *State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Central European series. Sheets O-35 (Pskov), (N-35), O-36 (St. Petersburg). Explanatory letter.* St. Petersburg: VSEGEI Cartographic Factory. (In Russian)
- Yudovich, Ya. E. (1981). *Regional geochemistry of sedimentary strata.* Leningrad: Nauka Publ. (In Russian)
- Yudovich, Ya. E. and Ketris, M.P. (2000). *Fundamentals of lithochemistry.* St. Petersburg: Nauka Publ. (In Russian)
- Zhamoyda, A.I. (ed.) (2011). *Resolutions of the Interdepartmental Stratigraphic Committee and its standing commissions. Issue 40.* St. Petersburg: Russian Geological Research Institute Press. Available at: http://www.vsegei.com/ru/about/msk/postanovleniya/msk2011_40.pdf [Accessed 23 Sep. 2020]. (In Russian)

Received: May 25, 2019

Accepted: June 15, 2020

Contact information:

Victor N. Podkovyrov — vpodk@mail.ru

Ludmila N. Kotova — l.n.kotova@ipgg.ru