

УДК 551.72/73+552.5+550.422

ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ И ГЕОХИМИЯ ОТЛОЖЕНИЙ ВЕРХНЕГО ВЕНДА–НИЖНЕГО КЕМБРИЯ СЕВЕРО-ВОСТОКА БАЛТИЙСКОЙ МОНОКЛИНАЛИ

© 2017 г. В. Н. Подковыров*, А. В. Маслов**, А. Б. Кузнецов*, В. Б. Ершова***

*Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург

**Институт геологии и геохимии УрО РАН, Екатеринбург

***Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

e-mail: vpodk@mail.ru

Поступила в редакцию 25.11.2015 г.

Получена после доработки 18.01.2016 г.

Результаты проведенных исследований верхневендско-нижнекембрийских отложений северо-востока Балтийской моноклинали детализируют представления об эволюции обстановок накопления осадочных ассоциаций базальных горизонтов осадочного чехла внутренних районов северо-запада Восточно-Европейской платформы. Показано, что в позднем венде и в начале кембрия происходило последовательное, с заметными, но, по всей видимости, неодновременными перерывами в основании василеостровской и воронковской свит верхнего венда и в основании ломоносовской свиты нижнего кембрия, поступление достаточно зрелого терригенного обломочного материала, источником которого являлись как коры выветривания пород Балтийского щита, так и петрогенный материал новых источников сноса. Если в позднем венде основным источником кластики выступал Балтийский щит, то уже в самом начале раннего кембрия, как это следует из анализа данных о U-Pb изотопных возрастах обломочных цирконов, дополнительную роль в формировании грубозернистой части осадочного чехла Балтийской моноклинали начала играть Тиманская окраина Балтики, при этом литогеохимические характеристики тонкозернистых пород существенно не изменились.

Ключевые слова: литостратиграфия, геохимия, терригенные породы, венд, кембрий, Балтийская моноклинали, Восточно-Европейская платформа

DOI: 10.7868/S0869592X16060065

ВВЕДЕНИЕ

Отложения переходных горизонтов верхнего венда–нижнего кембрия на северо-востоке Балтийской моноклинали представлены валдайской и балтийской сериями (Решения..., 1965). Валдайская серия, на данной территории трансгрессивно перекрывающая дорифейский кристаллический фундамент Восточно-Европейской платформы, охватывает редкинский и котлинский горизонты верхнего венда (Аксенов и др., 1978; Гниловская и др., 1979; Соколов, Федонкин, 1985; Гражданкин, Маслов, 2015). Балтийская серия в изученных нами разрезах представлена ломоносовской и лонтоваской (сиверской) свитами нижнего кембрия (Решения..., 1965; Стратиграфия..., 1979).

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). Одна из генераций (аутигенная) позволила оценить воз-

раст раннего диагенеза (близкий к возрасту 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 – заключен в пределах 790–720 млн лет (Горохов и др., 2007).

Цель настоящей работы – рассмотреть основные тренды изменения литологических и геохимических характеристик терригенных пород старорусской, василеостровской и воронковской свит верхнего венда и перекрывающих их отложений ломоносовской и сиверской свит балтийской серии, а также провести их сопоставление с аналогичными трендами, установленными в разрезах верхнего венда Юго-Восточного Беломорья, юго-востока Мезенской синеклизы и западного склона Среднего Урала (Маслов, Подковыров,

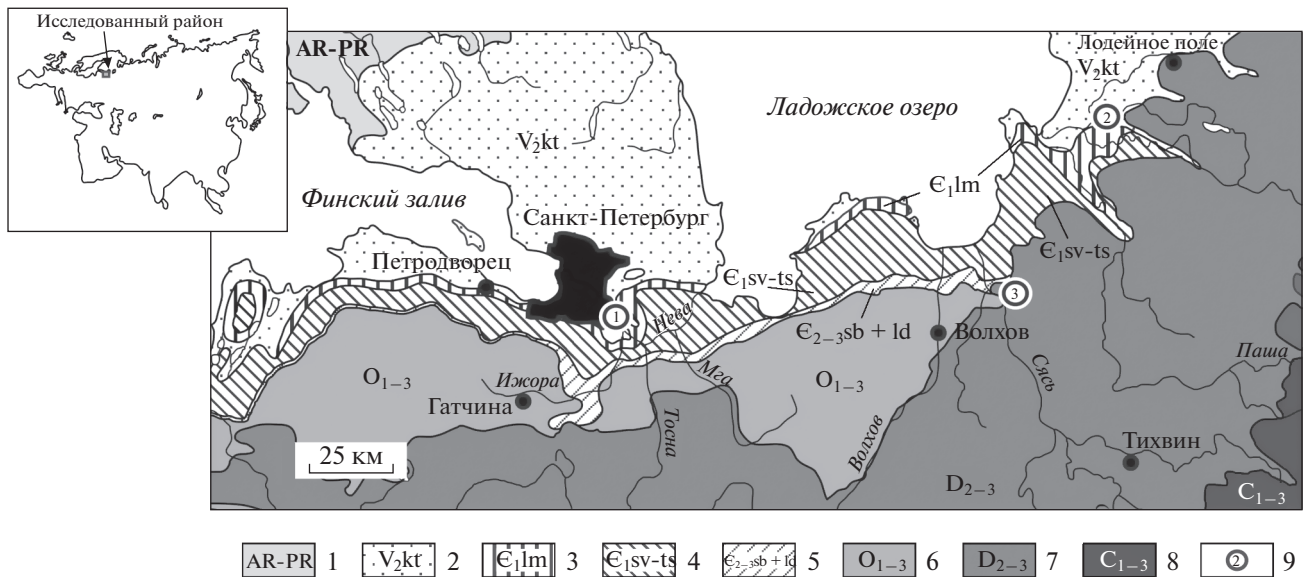


Рис. 1. Схематическая геологическая карта северо-востока Балтийской моноклинали по (Вербицкий и др., 2012, с изменениями) и положение исследованных скважин.

1 – архей–протерозой; 2 – верхний венд (котлинский горизонт); 3 – нижний кембрий (ломоносовская свита); 4 – нижний кембрий (сиверская, локатская и тискрская свиты); 5 – средний–верхний кембрий (саблинская и ладожская свиты); 6 – ордовик; 7 – средний–верхний девон; 8 – каменноугольные отложения нерасчлененные; 9 – положение исследованных скважин (1 – Уткина заводь, 2 – Шоткуса-1, 3 – Коровье-8).

2010; Маслов и др., 2013). Исследования основаны на данных, полученных при изучении керна недавно пробуренных скважин Уткина заводь (г. Санкт-Петербург), Коровье-8 (правобережье р. Сясь в ее низовьях) и Шоткуса-1 (район одноименной станции Октябрьской железной дороги) (рис. 1). Результаты этих работ важны для понимания истории формирования венд-кембрийского осадочного чехла палеоконтинента Балтики, реконструкции обстановок осадконакопления терригенных отложений, выявления источников сноса и, в конечном итоге, для уточнения стратиграфических схем пограничных венд-кембрийских отложений западной части Московской синеклизы.

ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ ОСАДОЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ И ОСАДОЧНЫЕ СИСТЕМЫ

Стратиграфическое расчленение венд-кембрийских отложений северо-востока Балтийской моноклинали принято нами согласно Общей стратиграфической шкалы России (ОСШР) (Жамойда, 2013).

Старорусская свита. В окрестностях г. Санкт-Петербурга и к востоку от него (рис. 1) в основании валдайской серии выделяется старорусская свита, относимая к редкинскому горизонту верхнего венда (Постановления..., 2011; Вербицкий и др., 2012). Стратотип свиты расположен в сква-

жине в г. Старая Русса Новгородской области (инт. 920–873 м) (Гейслер, 1967). Слагающие ее образования протягиваются в виде субширотно ориентированной полосы от г. Ломоносов на восток Ленинградской области, где перекрываются палеозойскими или четвертичными отложениями. Мощность старорусской свиты достигает 50 м. В изученных нами разрезах скважин Уткина заводь и Шоткуса-1 в основании разреза свиты присутствуют реликты дезинтегрированной и преотложенной коры выветривания пород дорифейского фундамента или песчано-гравелитовых отложений рифея. Нижняя часть разреза старорусской свиты представлена в скв. Уткина заводь песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов, а в междуречье Волхов–Сясь в ней преобладают песчаные аргиллиты с прослойками глинистых пудинговых песчаников мощностью до первых метров. Верхняя часть разреза мощностью до 35–45 м сложена пестроцветными аргиллитами с трещинами, выполненными песчано-алевритовым материалом, предполагающими местами субаэральную экспозицию отложений.

Проведенное изучение разреза отложений, вскрытых в скв. Шоткуса-1, и сопоставление его с другими разрезами старорусской свиты показало, что здесь в нижней подсите (инт. 267–248.9 м), выше несогласного контакта с кварцевыми песчаниками предположительно приозерской свиты нижнего рифея в интервале 267–260 м преобладают голубовато-серые алевроаргиллиты, перекры-

тые пластом (0.5–0.7 м) кварцевых песчаников. Отложения верхней подсвиты старорусской свиты (инт. 258.4–217 м) представлены в основании разреза (инт. 258.4–248.9 м) тонким переслаиванием темных зеленовато-серых и бурых аргиллитов и алевролитов с линзовидными слоями пудинговых полевошпат-кварцевых песчаников. В интервале 248–228.3 м чередуются пакеты (0.8–2.0 м) массивных и тонкослоистых голубовато-серых и бурых алевроаргиллитов, иногда со слоями мелкозернистых песчаников. В интервале 228.3–217 м преобладают пестроцветные тонкослоистые бурые и голубовато-серые аргиллиты с пропластками анкерита¹.

Аргиллиты старорусской свиты сложены иллитом, каолинитом, смешанослойным минералом смектит-иллит, что согласуется с данными, полученными ранее для аргиллитов редкинского горизонта территории изучения (Gorokhov et al., 1994), и разнозернистым обломочным материалом, среди которого преобладает кварц, при подчиненном количестве микроклина, мусковита, хлорита и хлоритизированного биотита. В этих породах встречается пирит, в том числе и в виде фрамбоидальных разностей (5–15 мкм). Песчаники старорусской свиты разнозернистые, полевошпат-кварцевые, с глинисто-кварцевым и пятнистым карбонатным (анкерит-сидерит) цементом.

Осадочная система старорусской свиты включает отложения трансрессивного тракта нижней подсвиты и регрессивного тракта верхней подсвиты, сформировавшиеся в обстановках подводных конусов выноса рек и зон слабых течений и волнений морского мелководья (Подковыров, 2010).

На рассматриваемой территории перекрывающие старорусскую свиту отложения василеостровской и воронковской свит (рис. 2) отнесены к котлинскому горизонту, выделенному как верхняя часть валдайской серии, соответствующая ламинаритовым глинам Восточно-Европейской платформы (Решения..., 1965; Вербицкий и др., 2012). Представления об объеме горизонта и его биостратиграфическая характеристика обобщены в ряде публикаций (Аксенов, 1985; Гниловская и др., 1979; Менс, Пиррус, 1971, 1987; Стратиграфия..., 1979; Бурзин, 1996).

Василеостровская свита. Свита имеет мощность 150–170 м и залегает на старорусской свите на востоке территории согласно (скв. Шоткуса-1) или же отделена от старорусской свиты несогласием (скв. Уткина заводь), совпадающим с поверхностью максимальной регрессии (Подковыров, 2010). Свита объединяет нижнюю песчано-

глинистую и верхнюю существенно глинистую подсвиты. В разрезах нижней подсвиты чередуются буровато- и зеленовато-серые алевроаргиллиты и серые слюдистые песчаники, а верхняя подсвита сложена толщей зеленовато- и голубовато-серых ламинаритовых глин с прослоями песчаников (Вербицкий и др., 2012).

В скв. Уткина заводь, литостратиграфическое расчленение которой принято по А.С. Яновскому (Вербицкий и др., 2012), нижняя подсвита василеостровской свиты представлена толщей (мощность до 12–13 м) тонкослоистых пестроцветных алевроаргиллитов с прослоями серых слюдистых песчаников. В скв. Шоткуса-1 ей, вероятно, отвечает пачка светлых рыхловатых полевошпат-кварцевых песчаников и алевропесчаников с каолинитовым цементом (инт. 217–210 м), сменяющаяся выше (инт. 210–195 м) светлыми кварцевыми песчаниками с прослоями алевроаргиллитов. Возможно, часть названных отложений представляет собой переотложенные продукты коры выветривания, на что указывает присутствие среди этих отложений прослоев табачно-розовых алевроаргиллитов с дресвой кварца и калиевых полевых шпатов. Этот интервал разреза скв. Шоткуса-1 можно сопоставить с нижней подсвитой василеостровской свиты в ее стратотипе (скв. Геолкома, музей ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). В скв. Коровье-8 нижняя часть свиты, по-видимому, не вскрыта.

Верхняя подсвита василеостровской свиты имеет мощность до 140 м. В скв. Уткина заводь она сложена монотонной последовательностью тонко-горизонтально-слоистых и волнисто-слоистых зеленовато-серых ламинаритовых глин с вкрапленностью и прослоями сидерита и редкими слоями серых слюдистых полевошпат-кварцевых песчаников. В кровле свиты на южном берегу Финского залива отмечаются ожелезненные алевроаргиллиты с интракластами слаболитифицированных алевролитов; вероятно, это корки взламывания, образовавшиеся после перерыва и уплотнения нижележащих осадков (Гаген-Торн, 2012).

Глинистые породы верхней подсвиты василеостровской свиты сложены в основном каолинитом и иллитом с примесью хлорита и, редко, смешанослойных минералов ряда смектит-иллит. Среди обломочных минералов в алевроаргиллитах василеостровской свиты преобладают кварц, мусковит и хлоритизированный биотит, реже встречается микроклин. Хлорит и анкерит-сидерит образуют своеобразные “порфиридные вкрапленники”. Присутствует здесь также фрамбоидальный пирит.

В скв. Коровье-8 вероятные аналоги верхней подсвиты василеостровской свиты (инт. 260–232.4 м) в нижней своей части (инт. 260–250 м) представлены чередованием темно-серых алевроаргиллитов с пропластками серых алевролитов.

¹ Идентификация карбонатных минеральных фаз Ca-Fe-Mg ряда (анкерит, анкерит-сидерит, Fe-доломит, железистый кальцит и доломит) и глинистых минералов выполнена в ИГГД РАН на электронном микроскопе JEOL со спектрометром LINK.

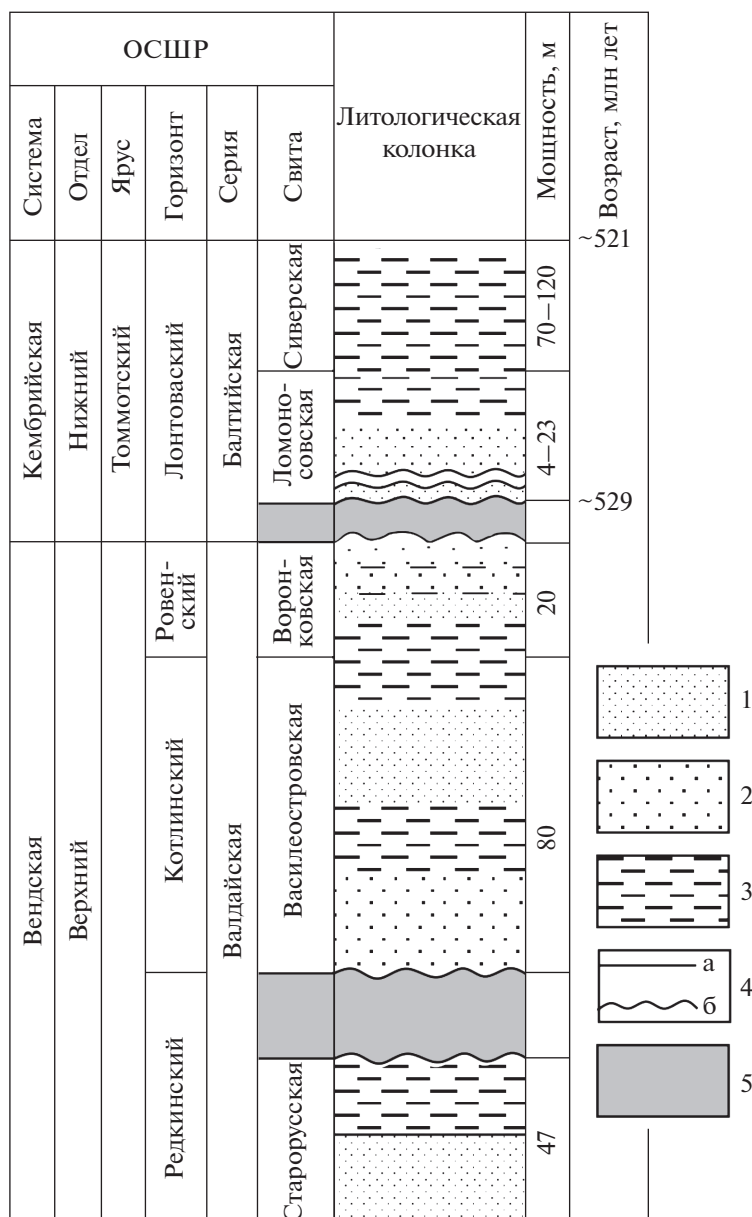


Рис. 2. Сводный стратиграфический разрез отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали (возрастные границы кембрийских подразделений по (Pöldvere et al., 2014), с некоторыми изменениями). 1 – песчаники; 2 – алевролиты; 3 – глины; 4 – стратиграфические контакты (а – согласный, б – несогласный); 5 – стратиграфические перерывы. ОСШР – Общая стратиграфическая шкала России.

Аргиллиты часто включают тончайшие слойки умеренно и плохо сортированного и окатанного алевропесчаного материала, в том числе зерна, вероятно, эолового кварца. Цемент в песчаниках каолинитовый и Fe-доломитовый. Выше по разрезу (инт. 250–232.4 м) преобладают темно-серые аргиллиты с тонкими прослоями серых алевропесчаников.

Сходный тип строения и состава пород верхней подсвиты василеостровской свиты наблюдается и в скв. Шоткуса-1 (инт. 195–96 м). Здесь

преобладают горизонтально- и пологоволнисто-слоистые буро- и сероцветные, нередко пятнистые алевроаргиллиты с прослоями светлых алевролитов и мелкозернистых песчаников с каолинитовым цементом. В кровле подсвиты для алевролитов характерны голубовато-серые окраски; алевроаргиллиты преимущественно бурые, со слойками зеленовато-серых разностей.

Накопление отложений василеостровской свиты происходило в обстановках циклической миграции фациальных поясов “зона субаэраль-

ных и прибрежных морских равнинных отложений—зона слабого волнения и течений—зона застойных депрессий дна сублиторали” в условиях относительно высокого стояния уровня моря (Подковыров, 2010).

Воронковская свита. Завершают разрез котлинского горизонта отложения воронковской свиты, выходы которой известны на южном побережье Финского залива, в приустьевой части р. Воронка. В этом разрезе мощностью до 15 м чередуются слои серых косослоистых полевошпатовых кварцевых песчаников, тонкослоистых голубовато- и табачно-серых аргиллитов, голубовато-серых песчаных алевролитов и розовато-серых ожелезненных песчаников (Гаген-Торн, 2012). В кровле свиты присутствует прослой ярко-желтых глин с лепидокрокитом, перекрытый пачкой каолинитизированных и лимонитизированных кварцевых песчаников (до 4.5 м).

В глинистой фракции алевроаргиллитов воронковской свиты преобладают иллит, каолинит и хлорит, есть также смешанослойный минерал типа смектит-иллит. Спорадически в глинистой массе встречаются крупные зерна кварца, глауконита, микролина и пирита. В тяжелой фракции присутствуют в основном рутил, эпидот и циркон.

В целом котлинская стадия эволюции поздневендского бассейна на рассматриваемой территории объединяет три сравнительно коротких цикла седиментации в объеме нижней (гдовские слои) и верхней (котлинские слои) подсвит василеостровской свиты и согласно перекрывающей их воронковской свиты (рис. 2). Поверхность морского затопления в основании котлинского горизонта отражает крупное эвстатическое событие, которое уверенно распознается на всей западной окраине Восточно-Европейской платформы (Гражданкин, Маслов, 2009). Относительная изолированность некоторых частей котлинского палеобассейна северо-запада и северо-востока Восточно-Европейской платформы, широкое распространение умеренно застойных обстановок, возможно, обусловили специфический состав органических остатков этого этапа — преобладание вендотениевой флоры и крайне редкие находки отпечатков мягкотелых организмов (Гниловская и др., 1979; Гражданкин и др., 2011; Марусин и др., 2011).

Однозначно установить положение нижней границы кембрия на Восточно-Европейской платформе в настоящее время не представляется возможным (Гражданкин, Маслов, 2015). Известно, что смена вендских отложений кембрийскими западнее изученного района (в Прибалтике) характеризуется крупным стратиграфическим перерывом в основании лонтоваского горизонта кембрия (Менс, Пиррус, 1971; Стратиграфия..., 1979; Соколов, Федонкин, 1985; Jensen, Mens,

2001). На северо-востоке Балтийской моноклинали, к востоку—юго-востоку от г. Санкт-Петербург, переход от отложений котлинского горизонта (воронковская свита) к породам ломоносовской свиты нижнего кембрия обычно постепенный (Геологический..., 2009; Гаген-Торн, 2012).

Переходные венд-кембрийские отложения, судя по литолого-минералогическим характеристикам, на рассматриваемой нами территории наиболее полно представлены в скв. Коровье-8. Интервал разреза 232–213 м в этой скважине представлен зеленовато-серыми алевроаргиллитами с темно-бурыми органическими пленками и микроагрегатами фрамбоидального пирита на плоскостях напластования и отдельными прослоями светлых субаркозовых песчаников. В инт. 217–213 м в скв. Коровье-8 на поверхностях напластования пород наблюдаются отпечатки следов ползания илоедов (возможно, *Treptichnus pedum*; Голубкова и др., 2016).

На изученной территории Балтийской моноклинали осадочные образования балтийской серии, перекрывающие валдайские отложения венда, объединяют ломоносовскую и сиверскую свиты (Решения..., 1965; Стратиграфия..., 1979).

Ломоносовская свита. Залегает как согласно, так и с размывом на подстилающих образованиях, сложена неравномерно переслаивающимися песчаниками, алевролитами и глинами. Ее мощность варьирует от нескольких метров до 45–50 м. Песчаники и алевролиты, слагающие нижнюю часть свиты, разномерные, светлые до розоватых, тонко-, горизонтально- и косослоистые. Песчаники преимущественно кварцевые (60–80% и более) с небольшой примесью полевых шпатов и слюды. Цемент контактовый, глинисто-кварцевый, с пятнами карбоната и пирита. В тяжелой фракции встречаются циркон, амфибол, дистен, пирит, глауконит, иногда сидерит или анкерит. Пирит часто наблюдается как в агрегатно-кристаллической форме, так и в виде фрамбоидальных выделений. Глины зеленовато-серые, песчано-алевритистые, образуют тонкие прослои и линзы, на плоскостях напластования содержат примазки органического вещества и тонкокристаллического пирита. Глинистые породы этой свиты сложены преимущественно иллитом, хлоритом и смешанослойными минералами смектит-иллитового ряда и примесью каолинита, как было отмечено ранее (Gorokhov et al., 1994). Среди акцессорных минералов в породах присутствуют апатит, сидерит и гидроокислы железа (Горохов и др., 2007). Обломочные зерна в глинах представлены кварцем, калиевым полевым шпатом, хлоритизированным биотитом и мусковитом. Породы ломоносовской свиты содержат характерные для томмотского яруса остатки *Sabellidites cambriensis* и *Serpulites petropolitanus* (Dronov et al., 2005). Ло-

монососовская свита согласно перекрыта отложениями сиверской свиты лонтоваского горизонта нижнего кембрия.

Сиверская свита. Отложения сиверской свиты (горизонт “синих глин”) выходят на дневную поверхность в предглинтовой полосе, протягивающейся с запада на восток от р. Нарва до р. Сясь (рис. 1). Как и подстилающие образования, породы свиты полого погружаются на юго-восток под более молодые отложения палеозоя. В пределах Ленинградской области мощность свиты варьирует от 100 до 120–130 м (Dronov et al., 2005). Свита представлена толщей глин с редкими прослоями песчаников и алевролитов. Глины часто песчаные, пятнисто-полосчатые (зеленовато- и красновато-серые), с конкрециями и одиночными кристаллами пирита, по составу хлорит-иллитовые, с примесью каолинита и примазками пирита. Песчаники и алевролиты свиты полевошпатовые, с вкраплениями пирита и глауконита. Цемент песчаников глинисто-кремнистый, иногда карбонатный.

В сиверской свите присутствуют многочисленные остатки *Sabellidites cambriensis*, *Platysolenites antiquissimus*, *Serpulites petropolitanus* и другие органические остатки раннекембрийского возраста. Сиверская свита на западе Ленинградской области с небольшим стратиграфическим несогласием перекрыта отложениями люкатиской свиты доминопольского горизонта атдабанского яруса нижнего кембрия (Dronov et al., 2005), а на востоке – песками и песчаниками саблинской свиты (средний кембрий).

ОБРАЗЦЫ И АНАЛИТИКА

В настоящей работе использованы данные о содержаниях основных породообразующих оксидов, а также ряда редких и рассеянных элементов в терригенных породах широкого спектра составов, но основные заключения сделаны на основании изучения валового химического состава тонкозернистых алюмосиликлатических пород – аргиллитов и алевроаргиллитов верхнего венда и глин нижнего кембрия трех основных разрезов, вскрытых скважинами Уткина заводь, Коровье-8 и Шоткуса-1.

Содержания петрогенных оксидов определены в 128 образцах в химической лаборатории ВСЕГЕИ методом рентгеновской флуоресценции на спектрометре ARL 9800 (Санкт-Петербург, аналитик Б.А. Цимошенко) и в ИГГ УрО РАН (Екатеринбург) методом РФА на СРМ-18 и XRF-1800 (аналитики Н.П. Горбунова, Л.А. Татарина, В.П. Власов, Г.С. Неупокоева и Г.М. Ятлук). Содержания элементов-примесей установлены там же методами атомной абсорбции, количественного спектрального анализа и ICP-MS

(спектрометр Optima 4300DV и масс-спектрометр ELAN 6100 DRC). Минеральный состав пород определен в полированных шлифах на электронном микроскопе JEOL в ИГГД РАН и с использованием стандартного рентгенофазового анализа.

U-Pb датирование цирконов проведено методом лазерной абляции (LA-ICP-MS) в Университете штата Техас (Остин, США) на масс-спектрометре Thermo Element2 с лазером 193 nm Excimer Laser (аналитики В.Б. Ершова и О. Анфисон).

ЛИТОГЕОХИМИЯ ТОНКОЗЕРНИСТЫХ ОБЛОМОЧНЫХ ПОРОД

Использование литогеохимических данных позволяет в ряде случаев во многом по-новому взглянуть на ряд общих особенностей формирования осадочных последовательностей различного возраста и оценить вклад в их состав крупных областей размыва (Rollinson, 1994; Интерпретация..., 2001; Маслов, 2005).

Подходы и методы интерпретации данных. Для реконструкции *палеоклиматических обстановок* формирования терригенных образований обычно используется широкий набор подходов: от различных модулей/отношений породообразующих оксидов (гидролизатный – $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$, алюмокремниевый – Al_2O_3/SiO_2 и др.) и индексов (химический индекс изменения, CIA: $100 \cdot Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)$, химический индекс выветривания, CIW: $100 \cdot Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)$ и др.) (Юдович, Кетрис, 2000; Интерпретация ..., 2001; Nessbit, Young, 1982; Cox et al., 1995; Fedo et al., 1995) до парных и треугольных диаграмм $(CaO + MgO + FeO + Fe_2O_3 + Na_2O + \text{ппп})-(Al_2O_3 + TiO_2)-(SiO_2 + K_2O)$, $(Al_2O_3 + K_2O + Na_2O)-SiO_2$, A-CN-K и (A-K)-C-N и др.) (Ронов, Хлебникова, 1961; Nesbitt, Young, 1982; Ерофеев, Цеховский, 1983; Suttner, Dutta, 1986; Fedo et al., 1995). В нашей работе мы использовали в основном индекс CIA, отражающий параметры выветривания в источниках сноса. Дополнительно применялась также диаграмма CIA-A-CN-K. Согласно представлениям (Nessbit, Young, 1982; Fedo et al., 1995), значения CIA для глинистых пород в пределах 60–70 соответствуют слабому, преимущественно физическому выветриванию в областях сноса, величины CIA в интервале 70–85 предполагают умеренное химическое выветривание (гидрослюдистые и каолинит-гидрослюдистые коры выветривания), а значения выше 85 указывают на интенсивное выветривание с формированием каолинитовых и аллитовых профилей выветривания, а также латеритов (Fe-Al остаточных кор).

Для интерпретации *палеогеодинамических обстановок* формирования платформенных и субплатформенных осадков используются в основ-

ном диаграммы $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ (Maynard et al., 1982) и SiO_2-K_2O/Na_2O (Roser, Korsch, 1986). Особенности применения перечисленных графиков рассмотрены нами ранее в публикации (Маслов и др., 2012).

Одним из часто используемых приемов *реконструкции состава пород на палеоводосборах* при литогеохимических исследованиях является анализ присущих тонкозернистым обломочным образованиям отношений ряда редких и рассеянных элементов (Th/Sc, La/Sc, La/Co, Th/Co, Th/Cr и V/Ni и др.). Детали подобного рода исследований можно найти в публикациях (McLennan, 1989; Condie, Wronkiewicz, 1990; Condie, 1993; Cullers, 1995; Тейлор, МакЛеннан, 1988; Интерпретация..., 2001; Маслов, 2005, 2012).

В качестве *индикатора соотношения в породах лито- и петрогенных компонентов* использован параметр K_2O/Al_2O_3 . Это позволяет оценить долю высококальциевых/петрогенных (КПШ, мусковит) и низкокальциевых/литогенных компонентов (каолинит, иллит) в тонкозернистых обломочных породах. При значениях $K_2O/Al_2O_3 > 0.4$ в аргиллитах и глинах преобладают первые, а при $K_2O/Al_2O_3 < 0.3$ – вторые (Cox et al., 1995).

Оценка *дальности переноса терригенного материала* иногда основывается на анализе значений такого параметра состава глинистых пород, как Ti/Zr (Интерпретация..., 2001), который отражает лучшую сохранность цирконов по сравнению с Ti -содержащими минералами при длительной транспортировке и перетолжении кластики.

В качестве показателей *окислительно-восстановительных особенностей придонных вод бассейнов седиментации* нами использованы отношение Mo/Mn (так называемый коэффициент стагнации; Холодов, Недумов, 1991; Гаврилов и др., 2002) и ряд других индикаторов – Ni/Co , V/Cr , $V/(V + Ni)$ (Jones, Manning, 1994; Hatch, Leventhal, 1992; Rimmer, 2004). Однако практика свидетельствует, что одновременное их применение не всегда дает согласующиеся результаты (Маслов и др., 2003). Выполненные нами исследования показывают, что, при отсутствии данных о содержаниях в глинистых породах Mo , судить о редокс-режиме бассейнов осадконакопления в определенной мере можно по величине Ni/Co .

ЛИТОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОТЛОЖЕНИЙ ВЕРХНЕГО ВЕНДА– НИЖНЕГО КЕМБРИЯ, ВСКРЫТЫХ СКВАЖИНАМИ УТКИНА ЗАВОДЬ, ШОТКУСА-1 И КОРОВЬЕ-8

Данные по валовому химическому составу тонкозернистых обломочных пород и их геохимическим особенностям, полученные при анализе kernового материала скважин Уткина заводь,

Шоткуса-1 и Коровье-8, использованы ниже для реконструкции ряда общих особенностей формирования отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали.

На классификационной диаграмме $\log(SiO_2/Al_2O_3)-\log(Fe_2O_{3\text{общ}}/K_2O)$ (Herron, 1988) точки состава исследованных терригенных пород распределены преимущественно в полях сланцев и вакк, ряд точек локализован в полях аркозов и литаренитов, а часть точек (в основном это породы воронковской свиты и некоторые образцы из разрезов старорусской свиты) оказались в поле кварцевых аренитов (рис. 3а). На диаграмме $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3-(Fe_2O_{3\text{общ}} + MgO)/SiO_2$ (Юдович, Кетрис, 2000) преобладающая часть точек состава терригенных отложений валдайской серии и лонтоваского горизонта сосредоточена в поле V (хлорит-сметтит-иллитовые глины) и II (преимущественно смектитовые глины с примесью каолинита и иллита) (рис. 3б). Точки состава пород воронковской свиты (песчаники и алевролиты с высоким содержанием SiO_2) и здесь занимают особое положение. Можно сделать вывод, что среди отложений верхнего венда–нижнего кембрия в изученных разрезах скважин преобладают глинистые и алевроглинистые осадки широкого спектра составов (преимущественно хлорит-иллитовые и смектит-каолинит-иллитовые глины с примесью обломочного калиевого полевого шпата, Fe-карбонатов и минералов железа (гетит-гематит или пирит)).

На диаграммах $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$ и SiO_2-K_2O/Na_2O точки терригенных пород валдайской серии и лонтоваского горизонта сосредоточены преимущественно в полях составов, характерных для обстановок пассивных континентальных окраин (рис. 4), то есть для весьма стабильных в палеотектоническом отношении областей континентальной коры, что согласуется с общей геологической ситуацией. Исходя из сказанного, можно считать, что палеогеодинамические обстановки накопления исследуемой нами осадочной последовательности на протяжении позднего венда–раннего кембрия принципиальным образом не менялись.

Так как среди имеющихся в нашем распоряжении аналитических данных отсутствуют сведения о содержании в глинистых породах Th, вместо таких широко используемых диаграмм, как $La/Sc-Th/Co$, $La/Sm-Sc/Th$, $Sc-Th/Sc$ и другие, мы применяли построенные примерно по тому же принципу диаграммы $V/Cr-La/Sc$ и $Cr/V-Y/Ni$ (McLennan et al., 1993). По соотношению V/Cr и La/Sc подавляющее большинство тонкозернистых обломочных пород сопоставимы с магматическими образованиями основного и среднего состава, а также с составом верхней континентальной коры (Rudnick, Gao, 2003). В то же время отношение La/Sc в

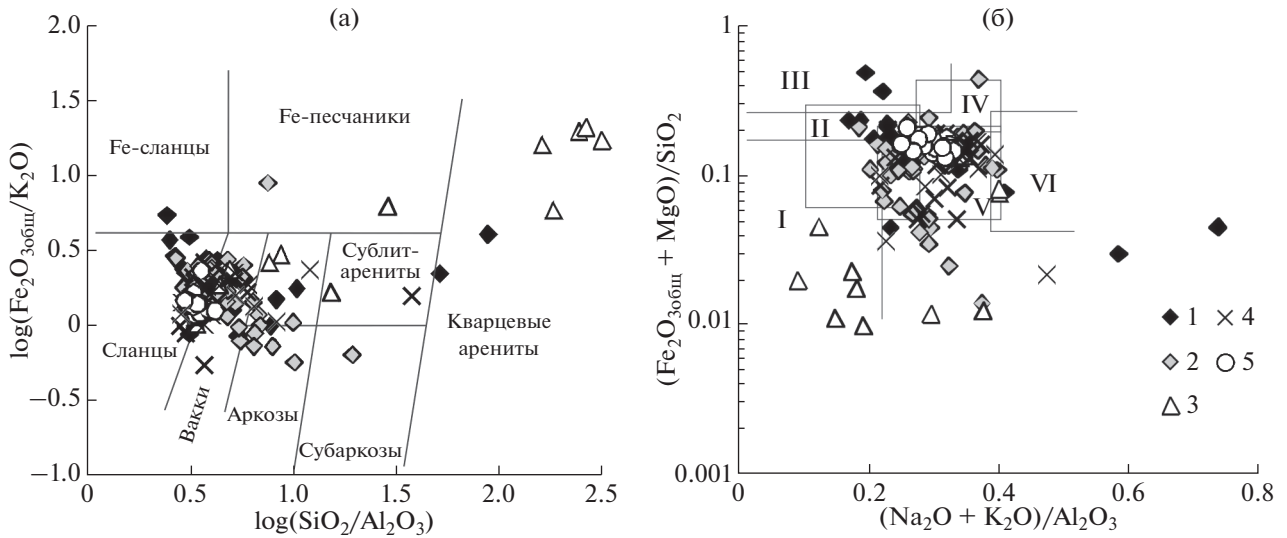


Рис. 3. Положение фигуративных точек состава терригенных пород верхнего венда—нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали на классификационных диаграммах (а) М. Хиррона (Hiron, 1988) и (б) Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис (2000).

Условные обозначения: 1 — старорусская свита; 2 — василеостровская свита; 3 — воронковская свита; 4 — ломоносовская свита; 5 — сиверская свита.

Рис. 3б: Поля составов глин: I — преимущественно каолиновые; II — преимущественно смектитовые с примесью каолинита и гидрослюда; III — преимущественно хлоритовые с примесью Fe-иллитов; IV — хлорит-иллитовые; V — хлорит-смектит-иллитовые; VI — иллитовые со значительной примесью дисперсных полевых шпатов.

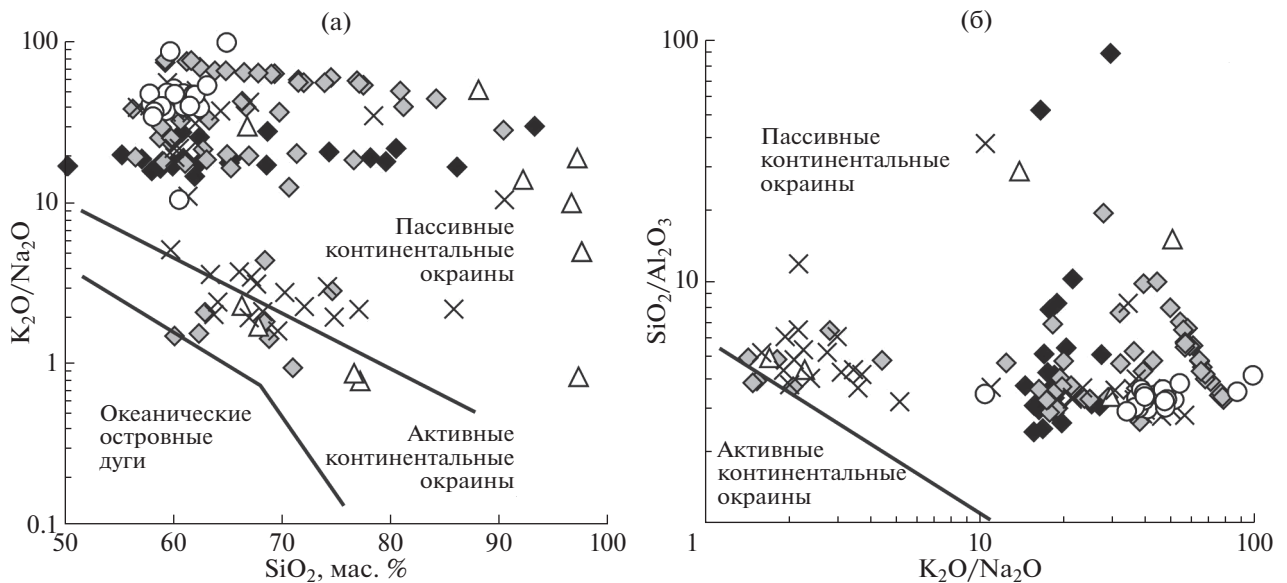


Рис. 4. Положение фигуративных точек состава терригенных пород верхнего венда—нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали на диаграммах (а) Б. Розера и Р. Корша (Roser, Korsch, 1986) и (б) Дж. Мейнарда с соавторами (Meynard et al., 1982). Условные обозначения см. рис. 3.

некоторых образцах достигает величин, характерных и для гранодиоритов (рис. 5а). Сходная картина наблюдается и на диаграмме Cr/V—Y/Ni (рис. 5б), где преобладающая часть точек составов глинистых пород различных свит валдайской серии и лонтоваского горизонта сосредоточены между точками среднего состава ранне- и поздне-

протерозойских базальтов, с одной стороны, и архейских и протерозойских тоналит-трондjemит-гранитных (ТТГ) ассоциаций, с другой. Здесь же расположена и точка PAAS.

Скважина Уткина заводь. Тонкозернистые обломочные породы старорусской свиты в разрезе скв. Уткина заводь характеризуются заметными

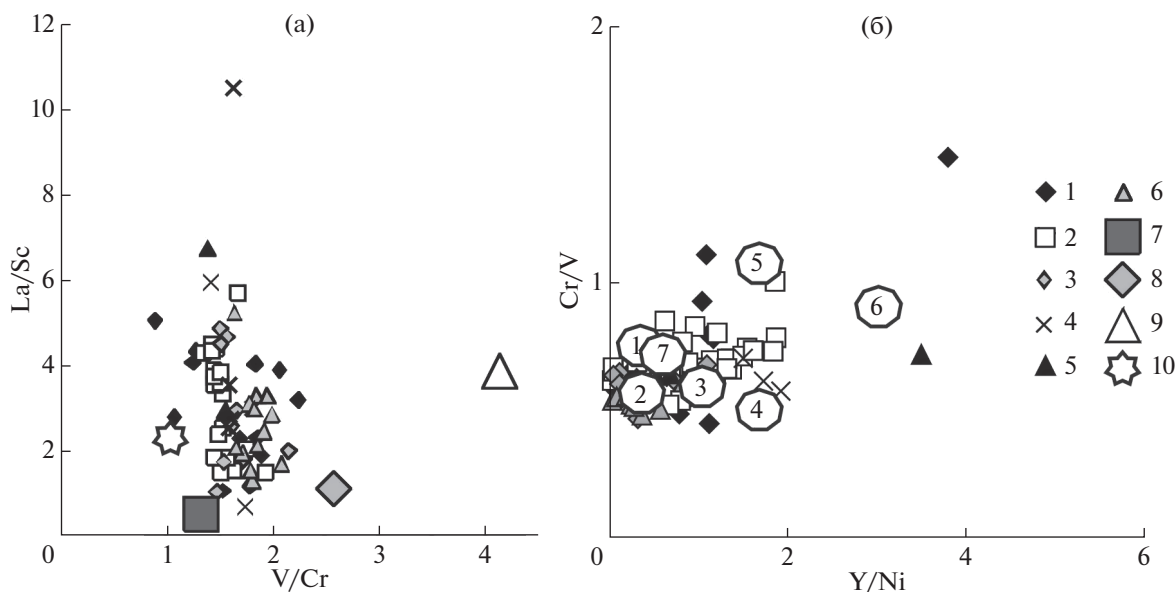


Рис. 5. Положение фигуративных точек состава глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали на диаграммах V/Cr–La/Sc (а) и Cr/V–Y/Ni (б).
 Условные обозначения: 1 – старорусская свита; 2 – василеостровская свита; 3 – воронковская свита; 4 – ровенский горизонт; 5 – ломоносовская свита; 6 – сиверская свита; 7–9 – средние составы магматических пород (по Интерпретация..., 2001); 7 – базиты, 8 – диориты, 9 – гранодиориты; 10 – средний состав верхней континентальной коры (Rudnick, Gao, 2003). На рис. 5б цифрами показаны: 1–6 – средние составы магматических пород (по Condie, 1993): 1 – раннепротерозойские базальты, 2 – позднепротерозойские базальты, 3 – архейские ТТГ-ассоциации, 4 – протерозойские ТТГ-ассоциации, 5 – архейские гранитоиды, 6 – протерозойские гранитоиды; 7 – PAAS (Condie, 1993).

вариациями значений химического индекса изменения (81–87) и K_2O/Al_2O_3 (0.12–0.17) (рис. 6а, 6б). Высокие значения CIA позволяют предполагать вовлечение в размыв на начальном этапе трансгрессии в различной степени зрелого материала, а присущие глинам относительно небольшие величины K_2O/Al_2O_3 дают основания считать, что они имеют существенно литогенную природу за счет поступления тонкозернистого материала из разной степени зрелых кор химического выветривания.

Для глинистых пород василеостровской свиты в скв. Уткина заводь значения CIA постепенно снижаются вверх по разрезу свиты, оставаясь вплоть до контакта с породами ломоносовской свиты в пределах характерных для отложений гумидного климата (70–100). Значения K_2O/Al_2O_3 во всем примерно 150–155-метровом разрезе василеостровской свиты не превышают 0.2, что также указывает на участие в осадконакоплении преимущественно литогенной тонкой алюмосиликокластики.

Значения Zr/Cr в глинистых породах вверх по разрезу старорусской свиты растут от ~2.3 до ~5.7, а в подошве василеостровской свиты величина этого параметра достигает 5.9 (рис. 6в). Однако стратиграфически выше и практически во всем разрезе василеостровской свиты наблюдается преобладание значений ~2.0–3.5 (в среднем 3.8).

По данным (Интерпретация..., 2001), среднее значение отношения Zr/Cr в гранодиоритах составляет ~6.4, в диоритах оно несколько меньше (~3.1), а в магматических породах основного состава снижается до ~0.7. Если исходить из предположения о том, что свойственные магматическим породам соотношения Zr и Cr без существенных изменений сохраняются и в образованных при их разрушении тонкозернистых обломочных породах, то можно считать, что в процессе формирования практически всей старорусско-василеостровской осадочной последовательности, вскрытой скв. Уткина заводь, на палеоводосборе преобладали породы основного и среднего состава. Только для конца старорусского и самого начала василеостровского времени можно предполагать появление пород гранодиоритового состава в источнике сноса. Это подтверждается и распределением точек состава аргиллитов и глин валдайской серии и лонтоваского горизонта на диаграммах V/Cr–La/Sc и V/Ni–Zr/Cr.

Отношение Ti/Zr в глинистых породах верхнего венда в рассматриваемой скважине составляет от 14 до 21, но каких-либо существенных вариаций его значений снизу вверх по разрезу не наблюдается (рис. 6г), что предполагает отсутствие значимых вариаций в дальности переноса обломочного материала, поступавшего в район зало-

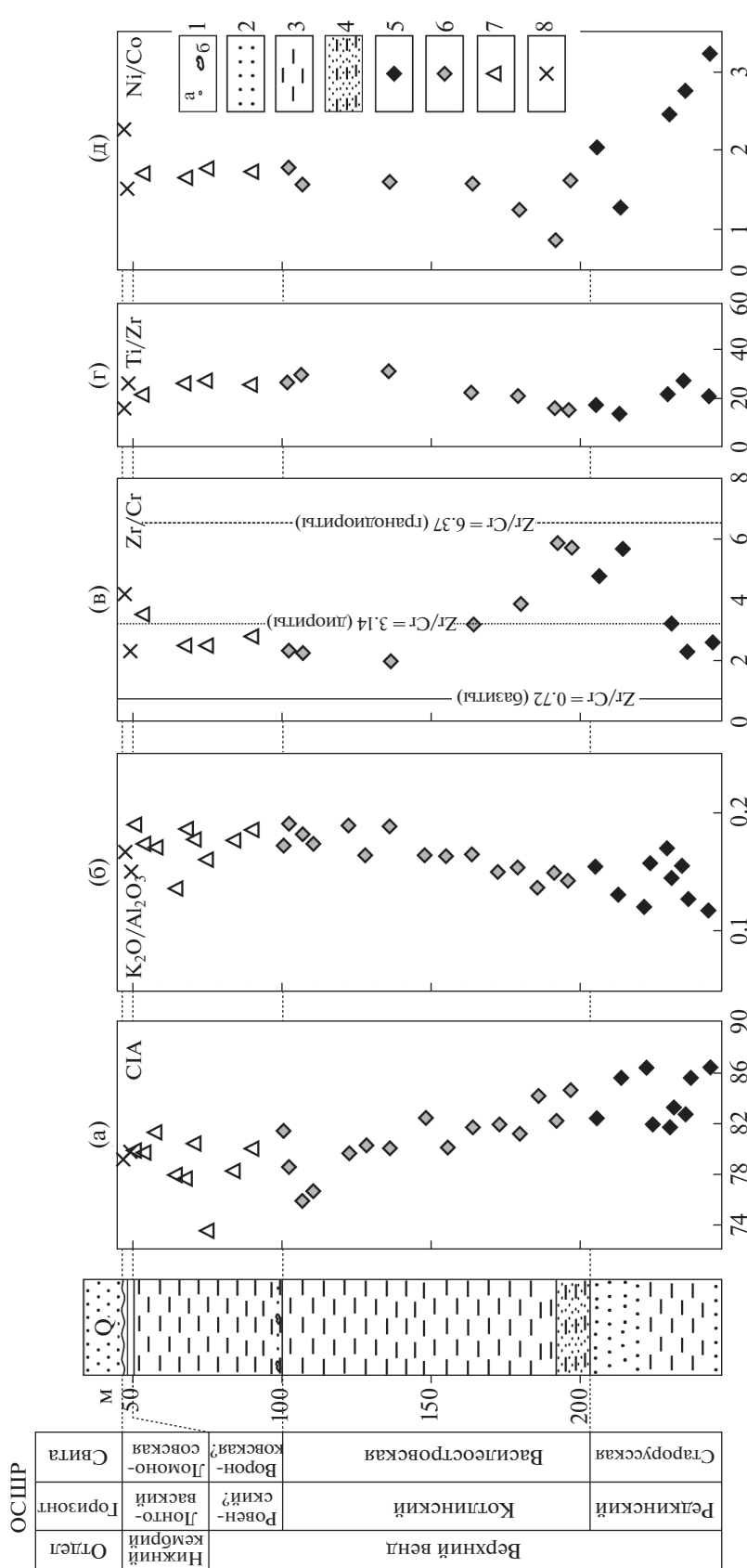


Рис. 6. Вариации ряда индикаторных отношений и индексов в глинистых породах старорусской, василеостровской и ломоносовской свит в разрезе скв. Уткина за-воль. 1 – гравий (а) и мелкая галька (б); 2 – песчаники; 3 – алевролиты и аргиллиты; 4 – песчаники с прослоями алевролитов и аргиллитов; 5–8 – старорусская, 6 – василеостровская, 7 – воронковская, 8 – ломоносовская. Значения Zr/Cr для магматических пород основного состава, диоритов и гранодиоритов приведены по (Интерпретация...., 2001).

жения скв. Уткина заводь, на протяжении всего старорусского и василеостровского времени.

Глинистые породы верхней части старорусской свиты и всей василеостровской свиты также характеризуются отсутствием значимых вариаций величины Ni/Co – индикатора окислительно-восстановительных обстановок придонных вод бассейна седиментации (0.9–3.2, рис. 6д), что предполагает накопление осадков в аэрируемых окислительных обстановках.

Скважина Шоткуса-1. В этой скважине вскрыт разрез верхневендских отложений, близкий по строению к разрезу скв. Уткина заводь. В первой из названных скажин в инт. 267–217 м, представляющем отложения старорусской свиты, наблюдаются разнонаправленные вариации значений химического индекса изменения CIA (рис. 7а), но в целом они не превышают пороговое значение 70, разделяющее отложения аридного/ниваляного климата, с одной стороны, и гумидного климата, с другой (Nesbitt, Young, 1982). Таким образом, так же как и в скв. Уткина заводь, в разрезе старорусской свиты здесь мы имеем дело с относительно зрелыми в литохимическом плане образованиями, а наблюдающиеся вариации CIA связаны с неравномерным процессом трансгрессии и вовлечением в размыв осадочного материала, в различной степени преобразованного процессами выветривания. Глинистые породы василеостровской свиты не имеют столь заметных вариаций CIA (73–78).

Поведение K_2O/Al_2O_3 инвертно к вариациям CIA (рис. 7б). Это, по-видимому, также отражает основную тенденцию накопления отложений старорусской свиты: вариации степени выветривания осадочного материала на палеоводосборах на начальной, трансгрессивной, стадии развития поздневендского осадочного бассейна, с возрастанием/уменьшением доли обломочных К-минералов (полевого шпата, мусковита), а затем усиление степени выветривания с повышением роли каолинита на регрессивном этапе редкинского цикла седиментации.

Значения Zr/Cr в глинистых породах старорусской свиты (1.1–5.2) сопоставимы со значениями данного индикаторного отношения в магматических породах основного и среднего состава (рис. 7в). Только в обр. 1-30, отобранном на глубине 216.5 м, параметр Zr/Cr достигает 8.4, однако это не глинистая порода, а кварцевый песчаник.

Во всем разрезе старорусской и василеостровской свит не наблюдается сколько-нибудь заметных вариаций Ti/Zr (рис. 7г), что указывает, по всей видимости, на отсутствие во время накопления пород названных литостратиграфических подразделений каких-либо существенных перестроек путей транспортировки обломочного материала.

Для всего исследованного разреза характерно также преобладание значений Mo/Mn ниже 0.005 (рис. 7д). Это предполагает накопление исходных осадков в аэрируемых обстановках. Только в нескольких пробах с ряда уровней установлены значения Mo/Mn 0.01–0.017, присущие осадкам, формировавшимся в дисокисных условиях.

С началом василеостровского цикла связано накопление в мелководно-морских, а возможно, и в наземных обстановках кварцевых и слюдисто-кварцевых песчаников (инт. 216.6–195 м), содержащих значительное количество обломочного калиевого полевого шпата, что отражено в повышенных величинах “калиевости” пород (K_2O/Al_2O_3 до 0.5). Литохимические характеристики алевроглинистых пород вышележащей части разреза василеостровской свиты в скв. Шоткуса-1 (инт. 197–102 м) указывают на сравнительно устойчивые обстановки осадконакопления. В это время в область седиментации, представлявшую собой мелководный эпиконтинентальный морской бассейн, поступал смешанный (литогенный и петрогенный) глинистый материал из кор выветривания платформенного типа, сформировавшихся в условиях умеренно гумидного климата.

В целом выявленные для разреза скв. Шоткуса-1 тенденции изменения литохимических параметров алевроглинистых отложений старорусской и василеостровской свит сопоставимы с таковыми для разреза скв. Уткина заводь. С учетом расстояния между этими скважинами (более 120 км), некоторые различия в вариациях литохимических индексов определяются локальными особенностями накопления отложений редкинских и котлинских горизонтов, при сохранении общей характеристики осадконакопления – преобладании калишпат-каолинит-иллитового материала, поступавшего в бассейн из кор химического выветривания.

Скважина Коровье-8. Вариации химического состава алевроглинистых пород верхов василеостровской свиты, а также воронковской, ломоносовской и сиверской свит в скв. Коровье-8 имеют свои особенности. Так, в пределах последовательности, относимой нами предположительно к василеостровской (инт. 262–232 м) и воронковской (инт. 232–213 м) свитам, наблюдается некоторое возрастание вверх по разрезу величин CIA в глинистых породах от ~77 до 79–80 и небольшое снижение содержания K_2O (рис. 8а, 8б). Подобный тренд отражает, по-видимому, слабо выраженное усиление выветривания пород в областях сноса и рециклирование глинистого материала на фоне некоторой регрессии мелководного бассейна.

Для вышележащей части разреза (ломоносовская свита, инт. 213–197 м) наблюдается постепенное снижение CIA для алеврито-глинистых

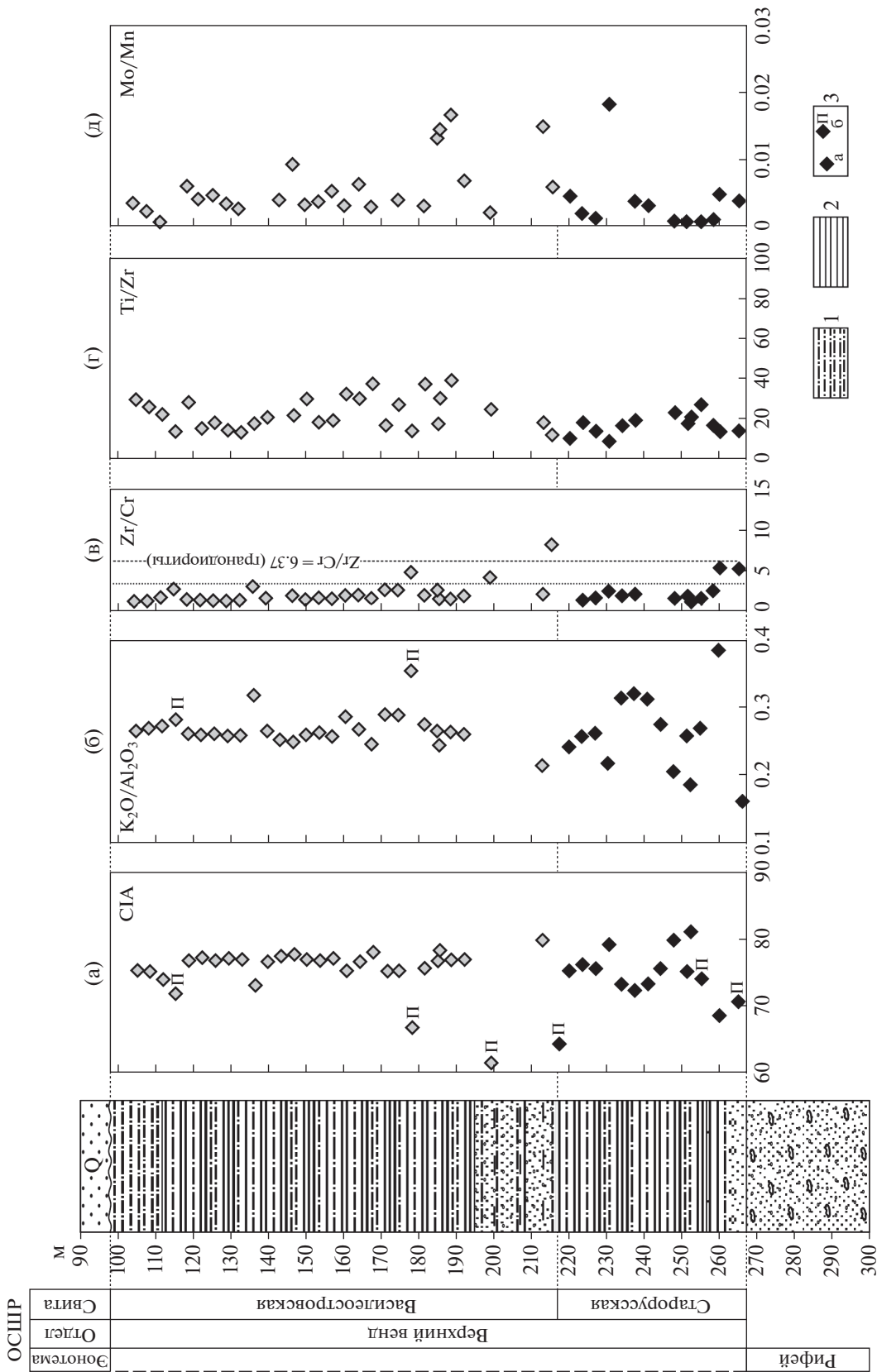


Рис. 7. Вариации ряда индикаторных отношений и индексов в глинистых породах старорусской и василеостровской свит в разрезе скв. Шоткуса-1. 1 – алевролиты; 2 – глины; 3 – значения отношений и индексов для алевролитов (а) и песчаников (б) одних и тех же стратиграфических уровней. Остальные условные обозначения см. рис. 6.

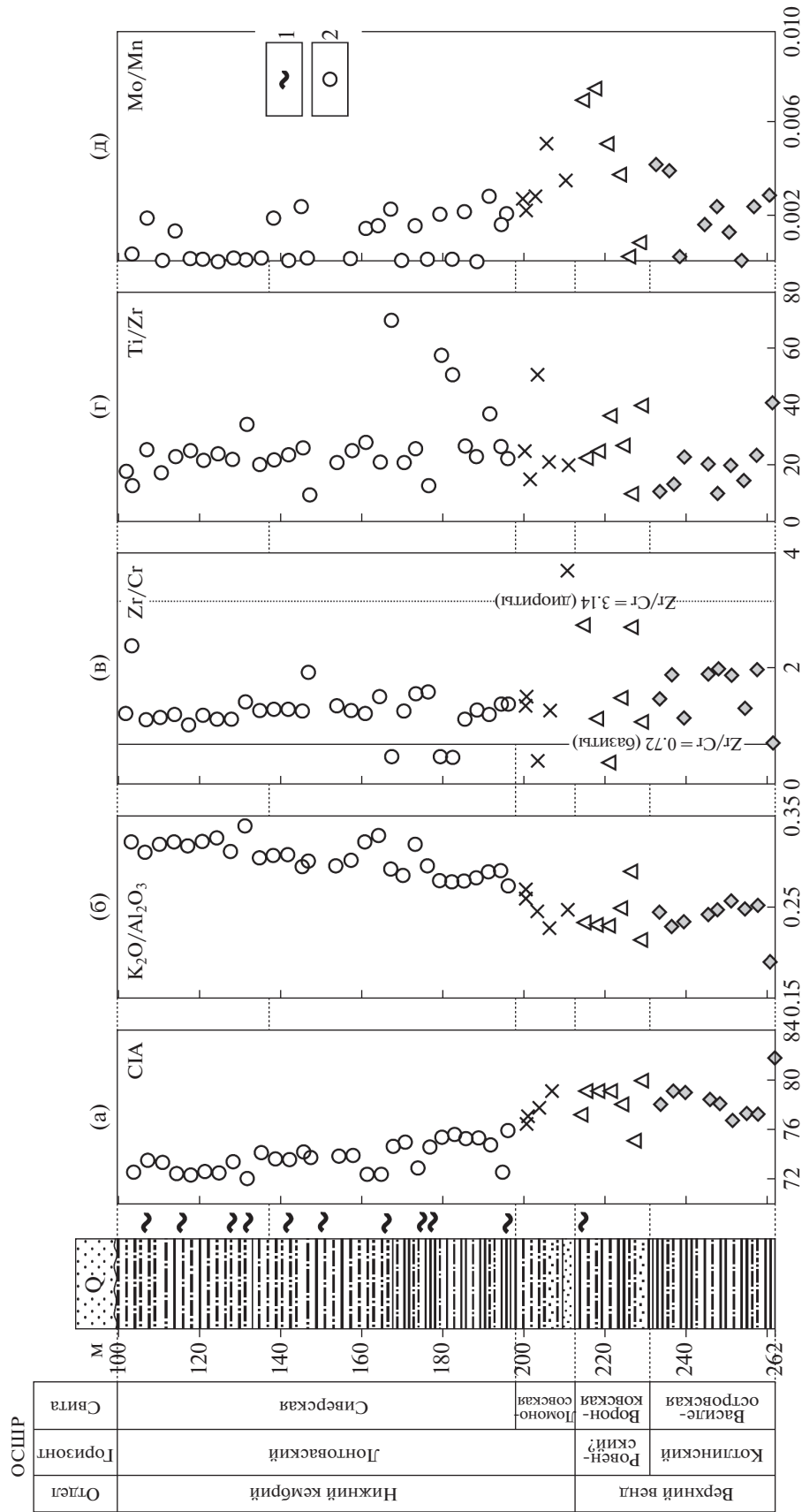


Рис. 8. Вариации ряда индикаторных отношений и индексов в глинистых породах василеостровской, воронковской, ломоносовской и сиверской свит в разрезе скв. Корольев-8. 1 – следы позлазня илюселов; 2 – сиверская свита. Остальные условные обозначения см. рис. 6 и 7.

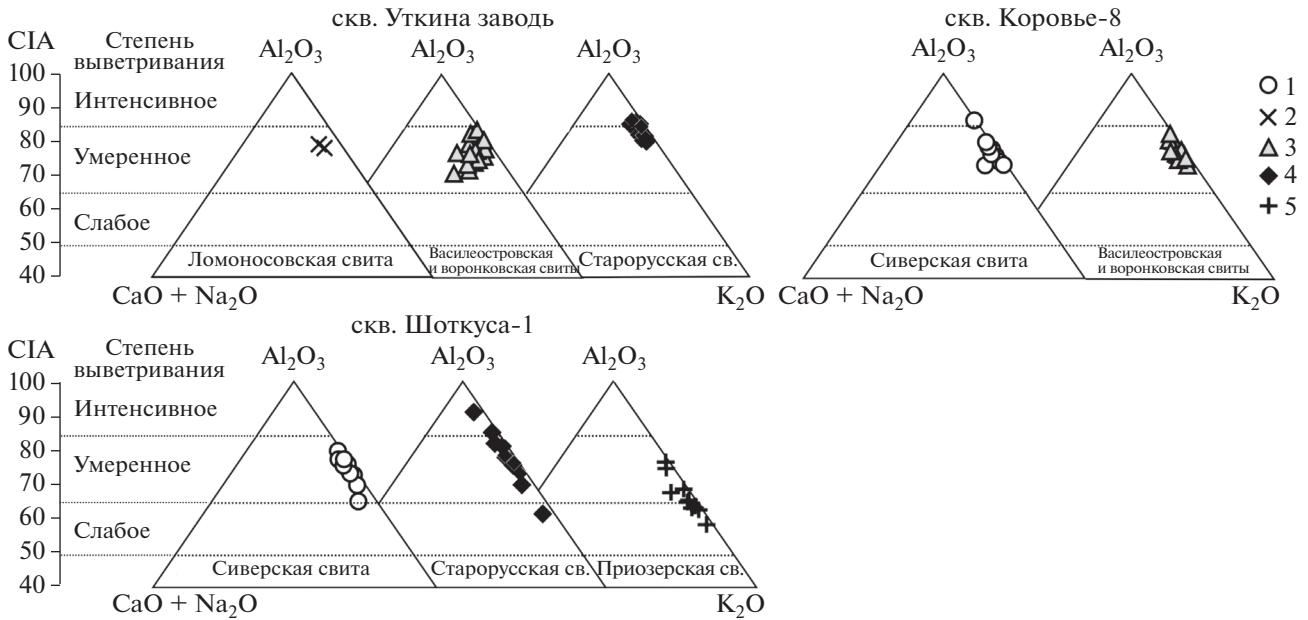


Рис. 9. Диаграммы CIA–A–CN–K для отложений верхнего венда и нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали.

Свиты: 1 – сиверская; 2 – ломоносовская; 3 – василеостровская и воронковская; 4 – старорусская; 5 – приозерская.

образований и некоторое возрастание значений K_2O/Al_2O_3 (рис. 86). Можно предполагать, что указанные особенности поведения описываемых параметров отражают начало нового, кембрийского, этапа эволюции бассейна (лентоваская (Менс, Пиррус, 1986) или ломоносовская трансгрессия), со сменой супралиторальных фаций несколько более “мористыми” литоральными и sublиторальными, пик распространения которых пришелся на начало формирования отложений сиверской свиты нижнего кембрия.

Ломоносовский этап седиментации сопровождался ослаблением влияния процессов химического выветривания на породы палеоводосбора (Балтийский щит). Это привело к постепенной смене существенно литогенных хлорит-каолинит-иллитовых ассоциаций глинистых минералов смешанными литогенно-петрогенными, с уменьшением доли каолинита и возрастанием роли обломочного калиевого полевого шпата.

Для последующего этапа указанная тенденция в целом сохраняется – в разрезе сиверской свиты преобладают алевроглинистые породы с невысокими, циклично варьирующими значениями CIA, но повышенными (0.3–0.35) величинами K_2O/Al_2O_3 , что отражает как в целом слабое, несмотря на присутствие каолинита в породах, выветривание в областях сноса, так и преобладание физического выветривания при достаточно быстрых темпах осадконакопления в умеренно глубоководном ($n \times 10$ –150 м) эпиконтинентальном морском бассейне. На преобладание на палеово-

досборах процессов физического выветривания во время формирования алевроглинистых отложений сиверской свиты указывает и минеральный состав последних.

Рассматриваемые тенденции отчетливо выражены и на диаграммах CIA–A–CN–K (рис. 9), где прослеживается смена высококальциевых, практически безнатровых составов пород старорусской свиты (скважины Уткина заводь и Шоткуса-1) несколько менее зрелым, но в целом чуть более натровым материалом василеостровской свиты и стабилизация составов нижнекембрийских алевропелитов в области значений CIA, характерных для литопетрогенных осадков областей умеренного химического выветривания. Небольшой диапазон вариаций CIA в этой последовательности свидетельствует: 1) о “стабильном” влиянии основного источника сноса – кор выветривания преимущественно дорифейского фундамента Балтийского щита; 2) о вкладе в формирование осадочных образований продуктов эрозии пород приозерской свиты рифея, уже являвшихся сравнительно зрелыми, калиевыми и рециклированными.

Анализ изотопного состава Nd алевропелитов осадочной последовательности валдайских–балтийских отложений показывает, что модельный возраст $T_{Nd}(DM)$ предполагаемых протолитов осадков изменяется незначительно от 2.3–2.0 млрд в старорусской свите и основании василеостровской свиты (скв. Уткина заводь) до 1.7 млрд лет в верхах василеостровской свиты (или основании

воронковской свиты) разреза скв. Коровье-8 и ломоносовской свите разреза скв. Уткина заводь. В раннекембрийских глинистых осадках лонтоваской свиты (аналог сиверской свиты) значения модельного возраста $T_{Nd}(DM)$ “омолаживаются” до 1.6–1.7 млрд лет (Горохов и др., 2007). Это также свидетельствует о преобладании палеопротерозойских субстратов в областях сноса осадков и незначительном влиянии рифейско-вендских источников.

Значения Zr/Cr в глинистых породах василеостровской, ломоносовской и сиверской свит варьируют от 0.35 до ~2.0. Это предполагает участие в их составе продуктов размыва преимущественно базитов и диоритов (рис. 8в). Несколько больше пределы вариаций этого параметра в глинистых породах воронковской свиты (0.35–3.7), что, однако, не свидетельствует о какой-либо кардинальной смене состава пород в областях размыва. Для глинистых пород верхов василеостровской свиты, а также воронковской и ломоносовской свит характерны вариации параметра Ti/Zr в пределах ~10–50, для глин сиверской свиты – от 9 до 70 (рис. 8г).

Вариации значений индикаторов редокс-обстановки показывают, что глинистые отложения венда, вскрытые скв. Коровье-8, формировались преимущественно в окислительных обстановках (рис. 8д). Лишь для отдельных интервалов разреза с преобладанием сероцветных пород можно предполагать некоторый дефицит кислорода (дисокисные фации), на что указывает практически только отношение Mo/Mn . То же можно сказать и о ломоносовском уровне нижнего кембрия. В целом следует констатировать, что отложения верхнего венда, вскрытые скв. Коровье-8, формировались в существенно более насыщенной кислородом водной среде, сравнительно с осадками василеостровской свиты скв. Шоткуса-1 и отложениями старорусской и василеостровской свит в разрезе скв. Уткина заводь.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В рассмотренных нами осадочных последовательностях северо-востока Балтийской моноклинали, вскрытых скважинами Уткина заводь, Шоткуса-1 и Коровье-8, по литологическим, минералогическим и литохимическим данным могут быть намечены три цикла осадконакопления в объеме (1) редкинского горизонта верхнего венда (старорусская свита); (2) котлинского (василеостровская свита) и ровенского? (воронковская свита) горизонтов верхнего венда; (3) ломоносовской и сиверской свит балтийской серии нижнего кембрия. Литологические границы указанных циклов в изученных разрезах чаще неотчетливые и лишь на западе территории частично несогласные, с поверхностями размыва в основании (ста-

рорусская и ломоносовская свита скв. Уткина заводь). В скв. Шоткуса-1 отложения старорусской свиты несогласно перекрывают песчаники нижнего (?) рифея. Достаточно отчетливо выражена и смена литологического состава, но без следов размыва, в основании василеостровской свиты (скважины Уткина заводь и Шоткуса-1), где фиксируется преобладание песчаных и алевритовых пород (нижняя подсвита или “гдовские песчаники”). Для кембрийской части разреза также характерно заметное “погружение” терригенных отложений в основании ломоносовской свиты.

В разрезах к востоку и юго-востоку от линии Ломоносов–Гдов верхние границы указанных циклов осадконакопления, как уже неоднократно отмечалось (Менс, Пиррус, 1971; Палеогеография..., 1980; Соколов, Федонкин, 1985; Гаген-Торн, 2011, 2012), достаточно часто бывают постепенными. В скв. Коровье-8 подобные соотношения характерны для контакта ломоносовской и сиверской свит и, по-видимому, для контакта василеостровской свиты с перекрывающими породами воронковской свиты ровенского горизонта (инт. 232–213 м).

В этой ситуации определенное значение имеют рекогносцировочные геохронологические данные, полученные при изучении обломочных цирконов валдайской и балтийской серий Балтийской моноклинали (Ивлева и др., 2016). В отложениях кровли старорусской свиты (скв. Уткина заводь, обр. Т36, глубина 203 м) практически отсутствуют зерна с возрастом менее 1.5 млрд лет и преобладают палеопротерозойские и мезопротерозойские цирконы, при 3–4% архейских. Среди обломочных цирконов, выделенных из песчаников воронковской свиты в скв. Коровье-8 с глубины 232 м (обр. 8-16), напротив, кроме архей-мезопротерозойских, до 36% популяции составляют неопротерозойские цирконы и присутствуют также цирконы венд-кембрийского (~9%) возраста (Ивлева и др., 2016). Возраст пяти конкордантных зерен циркона из наиболее молодой популяции интервала 232–231 м скв. Коровье-8 (обр. 8-16) варьирует в пределах 546–532 млн лет (табл. 1), что позволяет отнести в целом интервал 232–213 м к воронковской свите верхнего венда, хотя нельзя исключить его принадлежность и к лонтоваскому (ломоносовскому) уровню нижнего кембрия.

Минеральный и химический состав пород, с учетом литологических построений, позволяет наметить предварительный вариант корреляции изученных разрезов (рис. 10).

На недостаток палеонтологических данных о возрасте верхних горизонтов венда (возрастной интервал от ~550 до 540 млн лет) первым обратил внимание М. Бразье (Brasier, 1992), предложивший для этого феномена термин “котлинский

Результаты U-Pb датирования цирконов из образца 8-16 (скв. Коровье-8) (приведены возрасты, определяющие самую молодую популяцию цирконов)

Номер анализа	U, мкг/г	Th, мкг/г	U/Th	Изотопные отношения				Ошибка корреляции	Возраст, млн лет			
				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	2 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	2 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	2 σ
8-16_42.FIN2	175	157.9	1.108	0.66	0.013	0.0826	0.0013	0.412	511.5	8	536	45
8-16_12.FIN2	307.9	232.2	1.326	0.677	0.01	0.083	0.0014	0.487	514	8.3	607	36
8-16_14.FIN2	170.9	210.2	0.813	0.698	0.016	0.086	0.0019	0.422	532	11	573	62
8-16_30.FIN2	355.4	381.7	0.931	0.6918	0.0081	0.08643	0.00081	0.306	534.4	4.8	545	31
8-16_33.FIN2	94.4	115.4	0.818	0.702	0.014	0.0865	0.0012	0.487	534.6	6.9	590	40
8-16_36.FIN2	79.1	93.2	0.849	0.71	0.022	0.0873	0.0018	0.050	540	11	569	80
8-16_32.FIN2	75.8	102.6	0.739	0.712	0.02	0.0881	0.0015	0.090	545.8	9	541	67

кризис”. По его мнению, котлинский кризис мог быть важным звеном в цепочке событий, приведших к “кембрийскому взрыву биоразнообразия”. В качестве характерных признаков указанного кризиса в настоящее время рассматривается исчезновение трибрахиоморф, дикинсониеморф и билатераломорф, за которым последовало появление биологически контролируемой минерализации и роющих организмов (Grazhdankin, 2014).

Предложено несколько сценариев возможного развития событий, предшествовавших и в той или иной степени обусловивших котлинский кризис. Первым был предложен “питательно-стимулирующий сценарий” (Brasier, 1992; Brasier, Lindsay, 2001), в соответствии с которым кризис был вызван ростом количества питательных веществ в относительно глубоководных бескислородных морских условиях на фоне глобальной морской регрессии (“котлинская регрессия”), с последующей трансгрессией, которая вызвала поступление питательных компонентов на мелководные шельфы. Предполагалось, что это привело к кардинальному изменению морских экосистем и ускоренной эволюции многоклеточных организмов. Альтернативами указанному сценарию являются представления о геохимических пертурбациях в течение эдиакарского (вендского) времени (Butterfield, 2011; Lenton et al., 2014) и гипотеза “биотической замены” (“biotic replacement”) эдиакарской биоты экосистемами кембрийского типа (Darroch et al., 2015).

В последнее время получены новые детальные данные по смене редкинского, котлинского, ровенского? и лонтоваского комплексов ископаемых организмов как в Балтийской моноклинали (Голубкова и др., 2016), так и в Мезенской синеклизе (Vogob'eva et al., 2009; Голубкова и др., 2015). Это позволит в дальнейшем не только уточнить местную и региональную стратиграфические шкалы, но и выявить основные палеоэкологические тренды эволюции микробиот позднего вен-

да—раннего кембрия в пределах Восточно-Европейской платформы.

Указывая, что конец венда являлся геократической эпохой для ряда древних платформ, в том числе и для Восточно-Европейской платформы, Н.Г. Воробьева и П.Ю. Петров (2014, с. 89, 91) высказали мнение, что “в палеогеографии этого времени существенную роль играли континентальные бассейны от опресненных водоемов сравнительно высоких палеоширот с терригенной седиментацией до низкоширотных бассейнов со смешанным терригенно-карбонатным и эвапоритовым осадконакоплением. Вероятно, крупная перестройка экосистем и связанное с ней резкое сокращение видового биоразнообразия, наблюдаемое с начала котлинского века..., могли быть следствием “континентализации” палеосреды бассейнов этого времени. Такая перестройка в значительной степени затронула тихоходные, главным образом, относительно глубоководные обстановки илистой седиментации, в пределах которых на этом стратиграфическом рубеже появились вакантные экологические ниши. Эти ниши были быстро колонизированы наиболее примитивными фототрофными цианобактериальными сообществами, некромаасса которых служила питательным субстратом для вендомицесов”.

Разрезы верхнего венда—нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали являются весьма удобным объектом для проверки представлений о геохимических пертурбациях в течение эдиакарского (вендского) времени (Butterfield, 2011; Lenton et al., 2014), как причинах котлинского кризиса. Имеющаяся последовательность осадков позволяет оценить особенности изменения процессов формирования отложений как во временных окрестностях котлинского кризиса (василеостровская и воронковская свиты), так и сразу после него. Лучше всего это сделать, сопоставляя литогеохимические параметры глинистых образований, вскрытых скважинами Шоткуса-1 и Коровье-8.

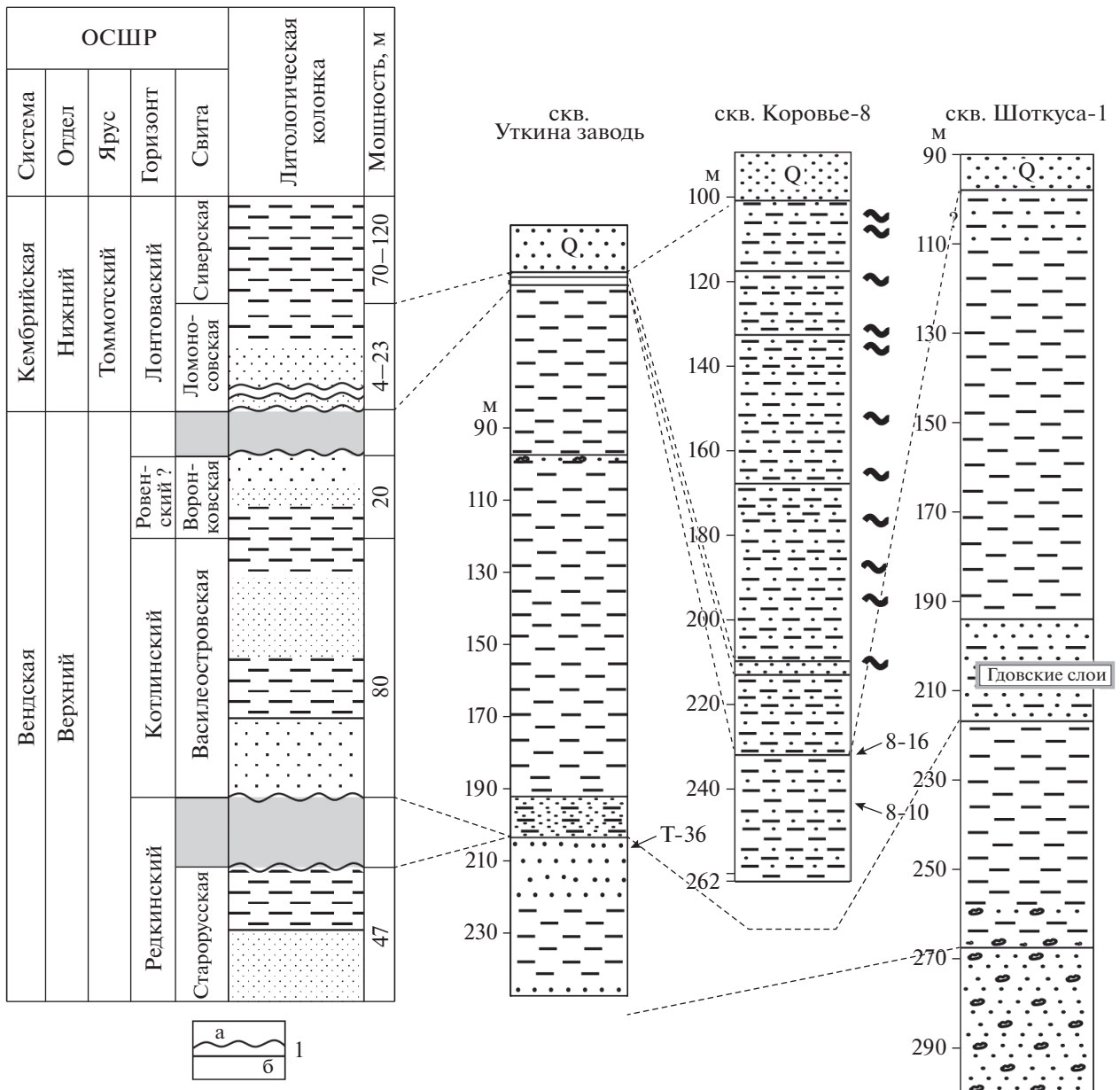


Рис. 10. Схема корреляции изученных разрезов верхнего венда–нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали.
 1 – стратиграфическое несогласие и перерывы (а), согласное залегание (б). Остальные условные обозначения см. рис. 2, 6, 7 и 8. Стрелками показано положение образцов с изученным U-Pb возрастом обломочных цирконов и приведен их номер. Q – четвертичные отложения.

Вариации палеоклиматических индикаторов (изменение значений CIA). Глинистые породы старорусской свиты обнаруживают более или менее выраженные вариации значений данного параметра (от ~68 до 80). Во всем вышележащем разрезе значения CIA находятся в интервале 70–80 (при весьма слабо проявленной тенденции к уменьшению вверх по разрезу), что указывает на примерно однотипные (умеренно гумидные) климатические обстановки во время накопления докотлинских, котлинских и посткотлинских отложений.

По данным (Маслов и др., 2013), для глинистых пород котлинского уровня, вскрытых в Юго-Восточном Беломорье (скв. Тучкино-1000), характерен некоторый рост снизу вверх по разрезу величины CIA. Вариации значений CIA для пород котлинского уровня здесь составляют 67–75, а для докотлинских – 63–72. В Вычегодском прогибе (скв. Кельтма-1) значения химического индекса изменения во всем верхневендском разрезе варьируют в основном от 62 до 72. В сводном разрезе венда западного склона Среднего Урала для

глинистых пород чернокаменной свиты, отвечающей беломорскому и котлинскому горизонтам (Гражданкин, Маслов, 2015), каких-либо принципиальных вариаций величины CIA не наблюдается, что соответствует поведению данного параметра и в разрезах верхнего венда—нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали.

Соотношение литогенных и петрогенных компонентов в составе глинистых пород (вариации K_2O/Al_2O_3). Докотлинские и котлинские глинистые породы характеризуются преобладанием в их составе литогенного материала (среднее значение K_2O/Al_2O_3 не превышает 0.28). В разрезе ломоносовской и сиверской свит визуально проявлена тенденция к слабому росту данного параметра от 0.22 до 0.34, однако его значение здесь примерно такое же, как и для подстилающих образований (0.29), что исключает предположения о каком-либо резком усилении привноса в область седиментации петрогенного материала в самом начале кембрия.

В скв. Тучкино-1000 (Юго-Восточное Беломорье, Беломорско-Кулойское плато) глинистые породы котлинского уровня (ергинская свита) характеризуются вариациями K_2O/Al_2O_3 в интервале 0.24—0.30, тогда как для подстилающих образований присущи значения данного параметра в основном в интервале 0.20—0.26 (Маслов и др., 2013). В скв. Кельтма-1 (Вычегодский прогиб), напротив, какие-либо ясно выраженные тенденции в изменении K_2O/Al_2O_3 во всем разрезе верхнего венда не наблюдаются. Это же свойственно глинистым породам чернокаменной свиты Кваркушко-Каменогорского мегантиклинория (западный склон Среднего Урала). Возраст чернокаменной свиты по результатам U-Pb датирования цирконов из вулканических туфов, присутствующих в ее основании, составляет 557 ± 13 млн лет (Ронкин и др., 2006). Таким образом, и на Среднем Урале, и в Мезенской впадине, и на северо-востоке Балтийской моноклинали принципиальные изменения параметров K_2O/Al_2O_3 и CIA в поздневендско-раннекембрийском временном интервале не проявлены; некоторым исключением в этом отношении является только Юго-Восточное Беломорье.

Состав пород на палеоводосборах (вариации Zr/Cr и данные по U-Pb возрастам обломочного циркона в песчаниках). Практически во всем исследованном нами верхневендско-нижнекембрийском интервале значения Zr/Cr не выходят за пределы 0.5—4.0, что, возможно, указывает на преобладание в областях размыва примерно одного и того же комплекса пород. Распределение же U-Pb изотопных возрастов обломочных цирконов в верхневендских и нижнекембрийских отложениях северо-востока Балтийской моноклинали существенно различается. Для песчаников

верхнего венда характерно преобладание цирконов палеопротерозойского и, в меньшей степени, мезопротерозойского возраста. При этом разные уровни верхнего венда обладают несколько различающимися спектрами распределения возрастов обломочного циркона, что предполагает присутствие на палеоводосборах варьированного набора материнских пород. Свойственные песчаникам верхнего венда возрастны пики циркона достаточно хорошо сопоставимы с возрастными пиками магматических и метаморфических пород фундамента (более 1.5 млрд лет) южной части Балтийского щита (Ранний..., 2005). В нижнекембрийских песчаниках преобладают зерна циркона с мезопротерозойскими возрастными пиками, существенная часть зерен имеет неопротерозойские возрасты, а некоторые зерна — раннекембрийские возрасты. Известно, что заметные проявления неопротерозойского и раннекембрийского магматизма на Балтийском щите отсутствуют (Ранний..., 2005), но достаточно широко представлены в Тимано-Печорском регионе (Kuznetsov et al., 2010 и др.), поэтому вполне вероятно, что именно последний регион был в самом начале кембрия источником подобного рода обломочных цирконов (Ивлева и др., 2016).

Наличие молодых генераций циркона в раннекембрийских осадках согласуется с трендом “омоложения” Nd-модельного возраста лонтоваских (аналога сиверских) глин северо-запада Восточно-Европейской платформы. Возраст размываемого материала по данным Rb-Sr и Sm-Nd систематики детритовых иллитов мог быть позднерифейским 790—720 млн лет (Горохов и др., 2007). Формирование отложений этого возраста могло происходить в ходе выветривания пород как выступов фундамента платформы, так и рифейских осадочно-вулканогенных пород, слагавших ее обрамление (Маслов и др., 2013). Следует отметить, что отсутствие отложений с возрастом 800—660 млн лет, зафиксированное в осадочных бассейнах северо-восточного (Мезенская синеклиза; Голубкова и др., 2015) и восточного (Башкирский мегантиклинорий и Волго-Уральская область; Кузнецов и др., 2003; Зайцева и др., 2008; Маслов, 2012) обрамления Восточно-Европейской платформы, косвенно указывает на вероятность такого размыва. При этом перемещение разрушаемого материала могло происходить в том числе в западном направлении в результате геодинамической эволюции смежного складчатого сооружения (Беккер, 1968; Маслов, Подковыров, 2010).

Дальность переноса кластики (вариации Ti/Zr). Среднее значение Ti/Zr для глинистых пород старорусско-воронковского интервала составляет 20 ± 7 , а для пород ломоносовско-сиверского интервала — 26 ± 12 . Это указывает на отсутствие значимого тренда изменения дальности переноса кластики в

докотлинское, котлинское и посткотлинское время на северо-востоке Балтийской моноклинали.

Окислительно-восстановительные условия бассейнов седиментации. Величины коэффициента стагнации (Mo/Mn) в тонкозернистых обломочных породах верхнего венда—нижнего кембрия рассматриваемой территории, как правило, ниже 0.005; лишь на ряде уровней (верхи старорусской свиты, низы и середина василеостровской свиты) отношение Mo/Mn превышает указанное выше значение. По всей видимости, накопление докотлинских, котлинских и посткотлинских отложений на северо-востоке Балтийской моноклинали проходило в аэрируемых обстановках.

Суммируя все сказанное выше, можно сделать вывод о том, что в верхневендско-нижнекембрийских осадочных последовательностях востока Балтийской моноклинали не фиксируются следы/признаки каких-либо существенных литогеохимических изменений, за исключением некоторых вариаций интенсивности выветривания на палеоводосборах и смены направлений привноса обломочного материала с появлением восточного “молодого” поздневендско-раннекембрийского источника или местного “позднерифейского” рециклированного источника.

Эти факты свидетельствуют о том, что известное своеобразие биоценозов котлинского горизонта (Бурзин, 1996) не связано с литофациальными и литогеохимическими особенностями слагающих его отложений, а определяется, вероятно, более глобальными факторами эволюции биосферы Земли в позднем венде. Такие же представления появляются в последнее время и в работах зарубежных авторов, считающих, что наряду с изменениями палеообстановок “первое массовое вымирание сложных организмов” было в существенной степени обусловлено эволюционными инновациями, перестройкой экосистем и биологическими взаимодействиями (Lafamme et al., 2013; Darroch et al., 2015 и др.).

Благодарности. Авторы выражают признательность руководству ООО ПКГЭ “Роснедра” за возможность отбора кернового материала из скважин Коровье-8 и Шоткуса и предоставленные аналитические данные и персонально А.С. Яновскому и С.Д. Шведову за консультации и обсуждение полученных результатов. Авторы благодарят В.П. Ковача за выполненный анализ изотопного состава Nd глинистых пород и Е.Ю. Голубкову за обсуждение палеонтологической характеристики вендских отложений.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты 14-05-00415, 14-05-00813, 15-05-01512 и 15-35-20591).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов Е.М.* Венд Восточно-Европейской платформы // Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы. Отв. ред. Соколов Б.С., Федонкин М.А. М.: Наука, 1985. С. 3–34.
- Аксенов Е.М., Келлер Б.М., Соколов Б.С. и др.* Общая схема стратиграфии верхнего докембрия Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1978. № 12. С. 17–34.
- Беккер Ю.Р.* Молассы докембрия. Л.: Наука, 1988. 288 с.
- Бурзин М.Б.* Тенденции в эволюции бентосной растительности в позднем докембрии // Альгология. 1996. Т. 6. № 4. С. 407–426.
- Вербицкий В.Р., Вербицкий И.В., Васильева О.В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Центрально-Европейская. Листы О-35 (Псков), (N-35), О-36 (Санкт-Петербург). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 510 с.
- Воробьева Н.Г., Петров П.Ю.* Род *Vendomyces* Burzin: фациально-экологическая специфика старореченской микробиоты позднего венда Анабарского поднятия Сибири и ее стратиграфических аналогов // Палеонтол. журн. 2014. № 6. С. 1–13.
- Гаврилов Ю.О., Щенетова Е.В., Барабошкин Е.Ю., Щербинина Е.А.* Аноксический раннемеловой бассейн Русской плиты: седиментология и геохимия // Литология и полезн. ископаемые. 2002. № 4. С. 359–380.
- Гаген-Торн О.Я.* Особенности строения глин воронковской свиты верхнего венда // Материалы I Российского рабочего совещания “Глины, глинистые минералы и слоистые материалы”. М.: ИГЕМ РАН, 2011. С. 126.
- Гаген-Торн О.Я.* Строение пограничных вендско-кембрийских отложений глинистой области южного берега Финского залива // Палеозой России. Материалы II Всероссийского совещания. СПб.: ВСЕГЕИ, 2012. С. 58–60.
- Гейслер А.Н.* Палеогеография северо-запада Русской платформы в валдайское (вендское) и раннекембрийское время // Материалы по палеогеографии и литологии. Л.: Недра, 1967. С. 7–35.
- Геологический атлас Санкт-Петербурга. СПб.: Камилъфо, 2009. 57 с.
- Гниловская М.Б., Менс К.А., Пашкявичене Л.Т., Пиррус Э.А.* Погоризонтное расчленение верхнего венда в стратипической местности // Стратиграфия верхнего протерозоя СССР (рифей и венд). Отв. ред. Келлер Б.М., Семихатов М.А. Л.: Наука, 1979. С. 117–121.
- Голубкова Е.Ю., Зайцева Т.С., Кузнецов А.Б. и др.* Микрофоссилии и Rb-Sr возраст глауконитов в опорном разрезе верхнего протерозоя северо-востока Русской плиты (скв. Кельтменская-1) // Докл. АН. 2015. Т. 462. № 4. С. 444–448.
- Голубкова Е.Ю., Кушим К.А., Плоткина Ю.В.* Палеонтологическая характеристика пограничных отложений венда—кембрия северо-запада Русской плиты // Материалы LXII Сессии Палеонтологического общества. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2016. С. 55–57.
- Горохов И.М., Мельников Н.Н., Кузнецов А.Б. и др.* Sm-Nd систематика тонкозернистых фракций нижнекембрий-

- ских “синих глин” Северной Эстонии // Литология и полезные ископаемые. 2007. № 5. С. 536–551.
- Гражданкин Д.В., Маслов А.В.* Секвентная стратиграфия верхнего венда Восточно-Европейской платформы // Докл. АН. 2009. Т. 426. № 1. С. 66–70.
- Гражданкин Д.В., Маслов А.В.* Место венда в международной стратиграфической шкале // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 4. С. 703–717.
- Гражданкин Д.В., Марусин В.В., Меерт Дж. и др.* Котлинский горизонт на Южном Урале // Докл. АН. 2011. Т. 440. № 2. С. 201–206.
- Ерофеев В.С., Цеховский Ю.Г.* Парагенетические ассоциации континентальных отложений (Семейство аридных парагенезов. Эволюционная периодичность). М.: Наука, 1983. 192 с.
- Жамойда А.И.* Общая стратиграфическая шкала, принятая в СССР–России. Ее значение, назначение и совершенствование. СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. 24 с.
- Зайцева Т.С., Горохов И.М., Ивановская Т.А. и др.* Мессбауэровские характеристики, минералогия и изотопный возраст (Rb–Sr, K–Ar) верхнерифейских глауконитов укской свиты Южного Урала // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2008. Т. 16. № 3. С. 3–25.
- Ивлева А.С., Подковыров В.Н., Еришова В.Б. и др.* Результаты U–Pb LA–ICP–MS датирования обломочных цирконов из верхневендско-нижнекембрийских отложений востока Балтийской моноклинали // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 4. С. 441–446.
- Интерпретация геохимических данных. Отв. ред. Скляр Е.В. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.
- Кузнецов А.Б., Семихатов М.А., Горохов И.М. и др.* Изотопный состав Sr в карбонатных породах каратавской серии Южного Урала и стандартная кривая вариаций отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в позднерифейском океане // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2003. Т. 11. № 5. С. 3–39.
- Марусин В.В., Гражданкин Д.В., Маслов А.В.* Редкий этап эволюции вендских макрофитов // Докл. АН. 2011. Т. 436. № 5. С. 658–664.
- Маслов А.В.* Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. 289 с.
- Маслов А.В.* Литогеохимия терригенных пород верхнего докембрия Волго-Уральской области. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 248 с.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н.* Мезомасштабные геохимические циклы в разрезах верхнего венда севера, северо-востока и востока Восточно-Европейской платформы и западной мегазоны Урала и их корреляция // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Материалы научных чтений памяти П.Н. Чирвинского. Вып. 13. Пермь: Изд-во Пермского государственного университета, 2010. С. 272–279.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Петров Г.А.* К оценке редокс-обстановок рифейских и вендских бассейнов осадконакопления западного склона Урала // Литосфера. 2003. № 2. С. 75–93.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З.* К оценке палеогеодинамических обстановок формирования осадочных последовательностей нижнего и среднего рифея Учуро-Майского региона и Башкирского мегантиклинория // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31. № 5. С. 55–68.
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н., Крупенин М.Т.* Особенности изменения ряда литогеохимических характеристик тонкозернистых обломочных пород позднего венда Мезенского палеобассейна // Литосфера. 2013. № 3. С. 25–42.
- Менс К.А., Пиррус Э.А.* О стратиграфии пограничных слоев венда и кембрия на северо-западе Русской платформы // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1971. № 11. С. 93–103.
- Менс К., Пиррус Э.* Северо-Прибалтийский фациальный профиль венда и кембрия // Фации и стратиграфия венда и кембрия запада Восточно-Европейской платформы. Отв. ред. Пиррус Э.А. Таллин: Ин-т геологии АН ЭССР, 1986. С. 7–23.
- Менс К., Пиррус Э.* Стратиграфические пробелы в разрезе венда и кембрия Северной Прибалтики // Изв. АН ЭССР. Геол. 1987. Т. 36. № 2. С. 49–57.
- Палеогеография и литология венда и кембрия запада Восточно-Европейской платформы. М.: Наука, 1980. 188 с.
- Подковыров В.Н.* Литологические и геохимические тренды в верхневендских осадочных последовательностях запада Московской синеклизы // Актуальные вопросы литологии. Материалы 8-го Уральского литологического совещания. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2010. С. 246–247.
- Постановления Межведомственного стратиграфического комитета и его постоянных комиссий. Вып. 40. Отв. ред. Жамойда А.И. СПб.: ВСЕГЕИ, 2011. 39 с.
- Ранний докембрий Балтийского шита. Отв. ред. Глебовицкий В.А. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
- Решения Межведомственного совещания по разработке унифицированных стратиграфических схем верхнего докембрия и палеозоя Русской платформы, 1962. Л.: Недра, 1965. 80 с.
- Ронкин Ю.Л., Гражданкин Д.В., Маслов А.В. и др.* U–Pb (SHRIMP–II)-возраст цирконов из пепловых туфов чернокаменной свиты сыльвицкой серии венда (Средний Урал) // Докл. АН. 2006. Т. 411. № 3. С. 354–359.
- Соколов Б.С., Федонкин М.А.* (Ред.). Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы. М.: Наука, 1985. 238 с.
- Стратиграфия верхнедокембрийских и кембрийских отложений запада Восточно-Европейской платформы. М.: Наука, 1979. 236 с.
- Тейлор С.Р., МакЛеннан С.М.* Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
- Холодов В.Н., Недумов Р.И.* О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1991. № 12. С. 74–82.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
- Brasier M.D.* Background to the Cambrian Explosion // J. Geol. Soc. 1992. V. 149. P. 585–587.
- Brasier M.D., Lindsay J.F.* Did supercontinental amalgamation trigger the “Cambrian Explosion”? // The Ecology of the Cambrian Radiation. Eds. Zhuravlev A., Riding R. New York: Columbia University Press, 2001. P. 69–89.

- Butterfield N.J.* Animals and the invention of the Phanerozoic Earth System // Trends in Ecology Evolution. 2011. V. 26. № 2. P. 81–87.
- Condie K.C.* Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
- Condie K.C., Wronkiewicz D.A.* The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. V. 97. P. 256–267.
- Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L.* The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mud-rock chemistry in the south-western United States // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. P. 2919–2940.
- Cullers R.L.* The control on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, USA // Chem. Geol. 1995. V. 123. P. 107–131.
- Darroch S.A.F., Sperling E.A., Boag T.H. et al.* Biotic replacement and mass extinction of the Ediacara biota // Proc. Royal Soc. B: Biological Sciences. 2015. doi 10.1098/rspb.2015.1003
- Dronov A., Tolmacheva T., Raevskaya E., Nestell M.* Cambrian and Ordovician of St. Petersburg region. SPb.: St. Petersburg State Univ., A.P. Karpinsky All Russian Res. Geol. Inst., 2005. 64 p.
- Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M.* Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // Geology. 1995. V. 23 P. 921–924.
- Gorokhov I.M., Clauer N., Turchenco T.L. et al.* Rb-Sr systematics of Vendian–Cambrian claystones from the East European Platform: implications for a multi-stage illite evolution // Chem. Geol. 1994. V. 112. P. 71–89.
- Grazhdankin D.* Patterns of evolution of the Ediacaran soft-bodied biota // J. Paleontol. 2014. V. 88. № 2. P. 269–283.
- Hatch J.R., Leventhal J.S.* Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA // Chem. Geol. 1992. V. 99. P. 65–82.
- Herron M.M.* Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // J. Sed. Petrol. 1988. V. 58. P. 820–829.
- Jensen S., Mens K.* Trace fossils *Didymaulichnus* cf. *Tiransis* and *Monomorphichnus* *Isp.* from the Estonian Lower Cambrian, with the discussion on the early Cambrian ichnocoenoses of Baltica // Proc. Estonian Acad. Sci. Geol. 2001. V. 50. № 2. P. 75–85.
- Jones B., Manning D.A.C.* Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // Chem. Geol. 1994. V. 111. P. 111–129.
- Kuznetsov N.B., Natapov L.M., Belousova E.A. et al.* Geochronological, geochemical and isotopic study of detrital zircon suites from late Neoproterozoic clastic strata along the NE margin of the East European Craton: implications for plate tectonic models // Gondwana Res. 2010. V. 17. P. 583–601.
- Laflamme M., Darroch S.A.F., Tweedt S. et al.* The end of the Ediacara biota: extinction, biotic replacement, or Cheshire Cat? // Gondwana Res. 2013. V. 23. P. 558–573.
- Lenton T., Boyle R.A., Poulton S.W. et al.* Co-evolution of eukaryotes and ocean oxygenation in the Neoproterozoic era // Nature Geosci. 2014. V. 7. № 4. P. 257–265.
- Maynard J.B., Valloni R., Yu H.-Sh.* Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins // Geol. Soc. London. Spec. Publ. 1982. V. 10. P. 551–561.
- McLennan S.M.* Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // Geochemistry and mineralogy of rare earth elements. Eds. Lipin B.R., McKay G.A. Rev. Mineral. 1989. V. 21. P. 169–200.
- McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // Processes controlling the composition of clastic sediments. Eds. Johnsson M.J., Basu A. Geol. Soc. Am. Spec. Paper. 1993. № 284. P. 21–40.
- Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 19. P. 715–717.
- Põldvere A., Isozaki Y., Bauert H. et al.* Provenance of the Lower–Middle Paleozoic of Estonia in central Baltica: a possible link to Avalonia // GFF. 2014. V. 136. P. 214–217.
- Rimmer S.M.* Geochemical paleoredox indicators in Devonian–Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA) // Chem. Geol. 2004. V. 206. P. 373–391.
- Rollinson H.R.* Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex: London Group UK Ltd., 1994. 352 p.
- Roser B.D., Korsch R.J.* Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio // J. Geol. 1986. V. 94. P. 635–650.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. V. 3. Elsevier, 2003. P. 1–64.
- Suttner L.J., Dutta P.K.* Alluvial sandstones composition and paleoclimate, I, framework mineralogy // J. Sed. Petrol. 1986. V. 56. P. 329–345.
- Vorob'eva N.G., Sergeev V.N., Knoll A.N.* Neoproterozoic microfossils from the Northeastern margin of the East European Platform // J. Palaeontology. 2009. V. 83. № 2. P. 161–196.

Рецензенты П.Ю. Петров, М.А. Семихатов