

ИСТОЧНИКИ ТОНКОЙ АЛЮМОСИЛИКОКЛАСТИКИ ДЛЯ ОТЛОЖЕНИЙ ВЕНДА И РАННЕГО КЕМБРИЯ ЗАПАДА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ: НЕКОТОРЫЕ ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ¹

© 2024 г. А. В. Маслов^{1, *}, В. Н. Подковыров^{2, **}, О. В. Граунов²

¹Геологический институт РАН, Москва, Россия

²Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: amas2004@mail.ru

**e-mail: vpodk@mail.ru

Поступила в редакцию 17.04.2023 г.

После доработки 01.05.2023 г.

Принята к публикации 07.06.2023 г.

Проанализированы литогеохимические особенности (содержание и распределение основных породообразующих оксидов, а также ряда редких и рассеянных элементов) глинистых пород волынского, редкинского, котлинского и нижнекембрийского стратиграфических уровней запада Восточно-Европейской платформы (Беларусь и Волынь, восток Балтийской моноклинали, Московская синеклиза). С использованием разнообразных литогеохимических подходов и методов, данных об U–Pb изотопном возрасте популяций обломочного циркона, присутствующих в ассоциирующих с аргиллитами песчаниках, и с учетом геохимических особенностей предполагаемых пород-источников тонкой алюмосиликокластики — магматических ассоциаций разного состава и возраста Сарматии и Фенноскандии — высказаны соображения о возможном вкладе последних в формирование глинистых пород венда и раннего кембрия.

Ключевые слова: запад Восточно-Европейской платформы, реконструкция состава пород-источников тонкой алюмосиликокластики, переходные отложения от докембрия к кембрию

DOI: 10.31857/S0869592X24020015, EDN: DELCFH

ВВЕДЕНИЕ

Отложения венда и нижнего кембрия на западе Восточно-Европейской платформы (ВЕРП), в том числе в пределах Республики Беларусь и Волыни, где известны их наиболее полные в стратиграфическом отношении осадочные последовательности, привлекали повышенное внимание специалистов в области осадочной геологии по меньшей мере дважды. Первый пик работ подобного плана пришелся на 1970–1980-е гг. (Стратиграфия..., 1979; Палеогеография..., 1980; Rozanov, Łydko, 1987) и был во многом связан с совместными польско-советскими исследованиями стратиграфии и палеонтологии верхнедокембрийских и кембрийских отложений. Участники работ “не ставили перед собой задачу всестороннего литологического изучения” (Палеогеография..., 1980, с. 3) отложений, хотя во второй части указанной монографии

рассмотрены вещественный состав нижних свит венда Подольского выступа Украинского щита, литологическая характеристика венда и нижнего кембрия Юго-Восточной Польши, Балтийской синеклизы, петрографические и минералогическо-геохимические особенности пограничных отложений докембрия и кембрия Юго-Восточной Польши, а также распределение в породах венда и кембрия глинистых минералов и их роль в палеогеографических построениях. Главным итогом этих работ явилась серия палеогеографических схем и карт раннего и позднего венда и раннего кембрия.

Второй пик исследований совпал со вторым десятилетием XXI в. Эти работы, в которых принимали также участие специалисты Республики Беларусь и России, проводились и продолжаются в рамках крупного проекта Польской академии наук “Расшифровка эдиакарской обстановки по неизменным терригенным осадочным породам Восточно-Европейского кратона”. Они привели к появлению целой серии интересных публикаций (Shumlyanskyy et al., 2016; Goryl et al., 2018;

¹Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0869592X24020067 для авторизованных пользователей.

Liivamägi et al., 2018, 2021; Paszkowski et al., 2019, 2021; Śröder et al., 2019, 2022, 2023; Wojanowski et al., 2020, 2021; Poprawa et al., 2020; Голубкова и др., 2021, 2022; Derkowski et al., 2021; Jewuła et al., 2022 и др.). В указанных работах проанализированы факторы, контролировавшие формирование минерального и химического состава эдиакарских и кембрийских аргиллитов запада ВЕП. Исследованы широко распространенные здесь педогенные сидериты. Высказана гипотеза о существовании на рассматриваемой территории в эдиакарии обширных неморских обстановок осадконакопления. Показано, что диагенетические процессы в терригенных толщах могли контролироваться миграцией горячих К-содержащих флюидов. Установлено присутствие в отложениях биомаркеров исключительной сохранности. Обоснован вывод о том, что развитые на базальтах Волыни палеопочвы содержат запись процессов выветривания, в минимальной степени измененную диагенетическими трансформациями. Получена важная для реконструкции истории формирования осадочных последовательностей информация об U–Pb и Hf-изотопной систематике обломочного циркона. Датированы основные события в истории становления Волынского вулканического комплекса/крупной магматической провинции на западной периферии ВЕП. Обоснован высокий биостратиграфический потенциал органостенных микрофоссилий, присутствующих в отложениях верхнего венда.

В одной из последних публикаций этой серии приведена характеристика фациального, минерального и химического состава глинистых пород эдиакария и раннего кембрия западных регионов ВЕП (Западная Беларусь и Волынь, Восточная Беларусь, окрестности г. Санкт-Петербурга и Северная Эстония, Юго-Восточная Польша, Подолия и др.) (Jewuła et al., 2022). Показано, что обстановки осадконакопления этого времени варьировали на указанной территории от субаэральных до мелководных. На севере и юге ее реконструированы две крупные эстуарные системы, открывавшиеся на восток и юг. Сформированные под их влиянием осадочные последовательности представлены петрогенными отложениями первого седиментационного цикла; источниками кластики для них выступали палеопочвы и коры выветривания на эффузивах и пирокластических породах Волыньско-Брестской крупной магматической провинции (КМП) и кристаллических породах Фенноскандии, а также, возможно, Сарматии. Латеритовый, каолинит-гематитовый тип выветривания предполагает, по представлениям авторов работы (Jewuła et al., 2022), жаркий и влажный климат и окислительные обстановки на суше, хотя в ряде случаев не исключены также дизоксисные условия. Указанная работа сопровождается обширным дополнительным материалом (<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2022.106850>), среди которого имеется

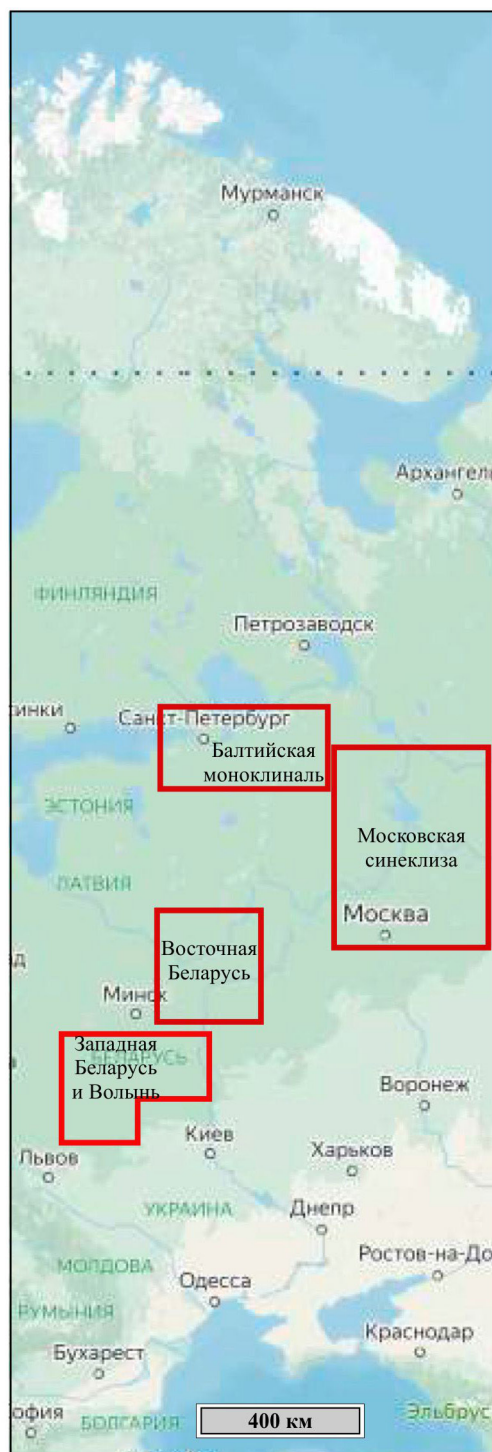


Рис. 1. Схема расположения рассматриваемых в статье регионов. Географическая основа заимствована с сайта <https://yandex.ru/maps/?ll=166.992700%2C21.912809&z=2>

база данных о валовом химическом составе (основные пороодообразующие оксиды, редкие и рассеянные элементы) тонкозернистых обломочных пород (mudstone) для разных стратиграфических

интервалов — доволынского, волынського, редкинського, котлинського і раннекембрійського — більшість регіонів розвитку відкладень венда і нижнього кембрія заходу ВЕП.

Ці матеріали використані нами в нинішньому повідомленні для реконструкції по літогеохімічному складу джерел сносу, що становили тонку алюмосилікокластику в області седиментації, що існували на території Республіки Білорусь і Волині (остання являється стратотипическою місцевістю волинської серії; Палеогеографія..., 1980), і особливостей їх еволюції. Для порівняння привнесені також аналітичні дані авторів нинішньої роботи, що слугували основою для публікацій, присвячених розшифровці закономірностей накоплення відкладень венда і раннього кембрія сходу Балтійської моноклінали і Московської синеклізи (Подковиров и др., 2017, 2022; Маслов и др., 2019; Маслов, Подковиров, 2021, 2023) (рис. 1). Всі перераховані аналітичні матеріали представлені в ДМ² табл. 1.

Особливий інтерес для даної роботи представляє існування в областях розмиву на протязі венда і раннього кембрія контрастних по хімічному складу джерел тонкої алюмосилікокластики: гранітов рапакиви і асоціюючих з ними порід (Коростеньський, Корсунь-Новомиргородський, Салминський, Рижський і інші плутони), траппів Волинсько-Брестської КМП і гранітоїдів, відомих в свекофеннідах, Транскаїнському поясі извержених порід і Данополюнському орогені. Найбільш яскраво вплив перерахованих живильних провінцій, як нам представляється, повинно було сказатися саме на венд-кембрійських осадових послідовностях Білорусі і Волині. В Московському басейні, розташованому кілька далі від більшості з названих джерел, формування осадових товщ повинно було йти в умовах помітного усереднення кластики. Однак так це чи ні, ми побачимо далі.

ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ И ИСТОЧНИКИ АЛЮМОСИЛИКОКЛАСТИКИ ДЛЯ ОСАДОЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ВЕНДА И НИЖНЕГО КЕМБРИЯ

В начале венда на юго-западе ВЕП, по-видимому, на финальной стадии распада Родины сформировалась Волинско-Брестская КМП (Махнач, Веретенников, 2001; Носова и др., 2008; Kuzmenkova et al., 2011; Poprawa et al., 2020). К ней с северо-востока примыкал Кобринско-Могилевский палеогиб, унаследовавший положение рифейского Волино-Оршанского авлакогена

и существенно расширившийся к северо-западу. В нем формировались вулканогенно-осадочные толщи волинской серии. В позднем венде и раннем кембрии накопление терригенных отложений валдайской и балтийской серий на территории современной Беларуси происходило в обширном Кобринско-Полоцком прогибе (Геология..., 2001; Kuzmenkova et al., 2018; Paszkowski et al., 2019; Голубкова и др., 2021 и др.).

Основные черты литостратиграфии венда и нижнего кембрия

В публикации (Jewuła et al., 2022) приведены аналітичні дані тільки для глинистих порід волинської серії, тому традиційно відносима в Білорусі к нижньому венду вільчанська серія (Геологія..., 2001 і др.), складена тиллітами, пісчаниками, глинисто-алевритовими породами і глинами, нами не розглядається. Відкладення волинського етапу на території **Волині і Білорусі** (горбашевська, ратайчичська, ліозненська, гірська, клецька, видиборська і інші світи) (рис. 2) представлені в основанні крупно- і різнозернистими аркозовими пісчаниками і гравелітами, конгломератами і глинистими алевролітами (Геологія..., 2001; Свешников и др., 2010; Paszkowski et al., 2019). Присутнююча в матриці конгломератів горбашевської світи головна популяція обломочного циркону має вік 1422 ± 19 млн років (Shumlyanskyy et al., 2015). Вище залягають вулканічні туфи основного, змішанного і кислого складу, туффіти, туфопісчаники і туфоконгломерати, базальти, андезити, андезидацити, дацити, трахідацити, пісчаники, алевроліти і глини, а в ряду розрізів — несортовані пісчано-глинисті породи з дерев'яно-гравійним матеріалом і дерев'яно-щебенчаті брекчії. Ці утворення відповідають Волинської/Волинсько-Брестської КМП (Kuzmenkova et al., 2011; Shumlyanskyy et al., 2016; Paszkowski et al., 2019). Вверх по розрізу вулканогенні утворення сменяються глинами і глинистими алевролітами з прослоями і лінзами пісчаників, в тому числі крупно- і різнозернистих і мелкогравійних; в них присутнює переотложенний вулканогенний матеріал, і в деяких районах зустрічаються також туфоалевроліти і туфопісчаники (Геологія..., 2001). Закінчують волинський етап вулканоміктові глинисті алевроліти з прослоями і лінзами мелкозернистих пісчаників і аргілітів. Популяції обломочного циркону з порід ратайчичської світи характеризуються вираженим піком на кривій відносної ймовірності з віком ~ 1.50 млрд років і двома невеликими піками 1.80 і ~ 0.59 млрд років і домінуванням кристалів з віком ~ 0.58 млрд років і невеликими піками 1.80 і 1.50 млрд років. В туффітах, аркозових ваках і аркозах ліозненської/гірської світи переважає обломочний циркон з віком ~ 1.50 млрд років,

²ДМ — додаткові матеріали.

Уровень/этап		Республика Беларусь и Волынь	Балтийская моноклиналь	Московская синеклиза
Ранний кембрий		Рытская, рудаминская, страдечская и лонтоваская свиты	Воронковская, ломоносовская и сиверская свиты	Некрасовская, лежская и галичская свиты
Верхний венд	Котлинский	Котлинская свита	Василеостровская свита	Любимская и решминская свиты
	Редкинский	Низовская, селявская и черницкая свиты	Старорусская свита	Гаврилов-ямская, непейцинская и макарьевская свиты
Нижний венд	Волынский	Горбашевская, ратайчитская, гирская, лиозненская, клецкая, видиборская и др. свиты		

Рис. 2. Основные литостратиграфические подразделения волынского, редкинского, котлинского и нижнекембрийского уровней рассматриваемых в настоящей работе регионов. Серый фон — отсутствие отложений.

подчиненную роль играют кристаллы с возрастaми 1.80 и 0.57–0.55 млрд лет (Paszkowski et al., 2019).

Отложения редкинского этапа (низовская, селявская и черницкая свиты) — это аркозовые и полевошпатово-кварцевые крупно- и грубозернистые, иногда с гравием, песчаники, алевролиты и алевритово-глинистые породы/глинистые алевролиты, аргиллиты, аргиллитоподобные глины и глины; иногда встречаются измененные пепловые туфы (Махнач, Веретенников, 2001; Махнач и др., 2005). В породах низовской свиты доминирует обломочный циркон с возрастaми 1.64 и 1.58 млрд лет. Есть также единичные кристаллы с возрастaми 2.84, 2.32, 1.91 и 1.83 млрд лет (Paszkowski et al., 2019). Обломочный циркон в породах селявской свиты имеет в основном возраст 1.84 млрд лет; подчиненную роль играют кристаллы с возрастaми 1.59 и 1.47 млрд лет. Циркон в породах черницкой свиты имеет возраст преимущественно 1.50 и ~1.84 млрд лет. Присутствие кластеров с возрастaми 1.47 и 1.59 млрд лет сближает рассматриваемую популяцию с той, что характерна для селявской свиты. Есть здесь и цирконы с возрастaми 2.18 и 2.32–2.05 млрд лет (Paszkowski et al., 2019).

Отложения котлинского этапа (котлинская свита) включают грубозернистые, местами гравелистые, кварц-полевошпатовые песчаники с линзами и прослоями аргиллитоподобных глин и гравелитов, пачки переслаивания алевритистых глин, алевролитов и разно-, тонко- и мелкозернистых аркозовых песчаников. В породах котлинской свиты доминирует обломочный циркон с возрастaми 1.54–1.50 млрд лет, есть также небольшие кластеры с возрастaми 1.62 и 1.84–1.80 млрд лет. Единичные кристаллы имеют возраст между 2.75 и 1.96 млрд лет и ~3.28 млрд лет (Paszkowski et al., 2019).

К раннекембрийскому этапу на территории Республики Беларусь принадлежат полевошпатово-кварцевые песчаники с глауконитом, алевролиты и глины, сменяющиеся глинами с прослоями кварцевых и полевошпатово-кварцевых алевролитов и песчаников с глауконитом и иногда гравелитов, принадлежащие ровенскому (рытская и рудаминская свиты) и лонтоваскому (страдечская и лонтоваская свиты) горизонтам (Геология..., 2001). В нижнекембрийских песчаниках доминирует обломочный циркон с возрастaми 1.49 млрд лет, хотя в ряде случаев ситуация может быть иной (Paszkowski et al., 2019).

На востоке **Балтийской моноклинали** отложения волынского уровня отсутствуют. К редкинскому уровню принадлежит старорусская свита, представленная песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов, а также песчанистыми аргиллитами с глинистыми пудинговыми песчаниками или без них. Котлинский уровень объединяет внизу алевроаргиллиты и полевошпатово-кварцевые и кварцевые песчаники, а сверху — ламинаритовые, часто с сидеритом, глины с редкими прослоями полевошпатово-кварцевых песчаников василеостровской свиты (Государственная..., 2012; Подковыров и др., 2017). Залегающая выше воронковская свита, представленная иллит-каолинитовыми глинами с линзами кварцевых песчаников, принадлежит ровенскому горизонту венда. Однако в Беларуси ровенский горизонт рассматривается как нижнекембрийское подразделение (Стратиграфические..., 2010). В таком варианте, принимаемом и нами, нижнекембрийские отложения на востоке Балтийской моноклинали объединяют полевошпатово-кварцевые песчаники, аргиллиты, песчанистые алевролиты, глины с лепидокрокитом, каолинитизированные и лимонитизированные кварцевые

песчаники, пачки переслаивающихся кварцевых песчаников, алевролитов и глин, а в верхней части толщу глин с прослоями полевошпатово-кварцевых песчаников и алевролитов (воронковская, ломоносовская и сиверская свиты).

Песчаники редкинского горизонта востока Балтийской моноклинали содержат обломочный циркон, формирующий на кривой относительной вероятности возрастов пики 2069, 1998, 1924, 1896, 1796 и 1576 млн лет. Обломочный циркон из пород котлинского горизонта демонстрирует пики возрастов 1880, 1830, 1650, 1600 млн лет (Ивлева и др., 2016; Ershova et al., 2019). Все они сопоставимы с возрастами магматических пород южной части Балтийского щита (свекофеннские интрузии, Салминский плутон гранитов рапакиви и др.). Предполагается, что источником кластики для отложений верхнего венда данного региона могли являться именно они (Ивлева и др., 2016, 2018; Подковыров и др., 2017). В то же время в песчаниках василеостровской свиты наблюдается большая доля циркона с позднемезопротерозойскими и раннепротерозойскими возрастами (Ивлева и др., 2018). Циркон примерно такого же возраста установлен в вендских и кембрийских породах Тимана. Это дает основание думать, что уже во время накопления василеостровской свиты в исследуемый регион начинал поступать обломочный материал с востока. В нижнекембрийских отложениях преобладают зерна циркона мезопротерозойского возраста, появляется значительное число кристаллов с неопротерозойским и раннекембрийским возрастом. По-видимому, в самом начале кембрия (лонтаваское и доминопольское время) при сохранении сноса с Балтийского щита заметную роль в качестве источника кластики начала играть и тиманская окраина Балтики (Ershova et al., 2019).

В **Московской синеклизе** волынские отложения отсутствуют. Редкинский уровень (гаврилов-ямская, непейцинская и макарьевская свиты) представлен аргиллитами с прослоями и пластами алевролитов и песчаников (Кузьменко и др., 1996; Государственная..., 2016). Котлинский уровень (любимская и решминская свиты) сложен песчаниками, алевролитами, гравелитами и конгломератами, а также аргиллитами и аргиллитоподобными глинами. Отложения нижнего кембрия (в принимаемом нами варианте это некрасовская, лежская и галичская свиты) представлены песчаниками с глауконитом, пачками переслаивания алевролитов и аргиллитов, а также аргиллитоподобными глинами.

Обстановки накопления осадочных последовательностей

Накопление отложений венда и нижнего кембрия во всех рассматриваемых нами в данной работе регионах происходило в аллювиальных конусах

выноса, русловых и пойменных зонах, на приливо-отливных и болотно-лагунных равнинах, а также в прибрежно- и мелководно-морских обстановках (открытые части крупных заливов, верхний шельф и т.п.) (Подковыров и др., 2017; Jewuła et al., 2022; Маслов, Подковыров, 2023). Формирующиеся в перечисленных обстановках осадки в значительной мере наследуют распределение ряда слаборастворимых в воде редких и рассеянных элементов (Th, La, Sc, Co, Cr, Ni, V и др.), существовавшее в породах источников сноса (Taylor, McLennan, 1985; McLennan, 1989; McLennan et al., 1990, 1993; Интерпретация..., 2001; Geochemistry..., 2003; Маслов и др., 2018).

Возможные источники тонкой алюмосиликокластики

По приведенным в работе (Палеогеография..., 1980) данным, в редкинское время для рассматриваемой нами территории ВЕП снос кластики происходил с выступов Белорусско-Мазурского щита. Значительное количество грубообломочного материала в начале этого времени поступало из западных районов Подляско-Брестской впадины и Волыни, где интенсивно размывались волынские траппы. Дополнительными источниками сноса являлись локальные поднятия фундамента на территории современной Эстонии и сопредельных регионов. В начале котлинского этапа размыв затрагивал Балтийский щит и Белорусско-Мазурское поднятие, а также локальные поднятия на границе Эстонии и Латвии и на юго-востоке Литвы (Палеогеография..., 1980). Предполагалось также, что в лонтаваское время источники кластики существовали на территории современных Финляндии и Швеции. На юге поставщиком обломочного материала являлся Украинский щит.

Результаты определения U—Pb изотопных возрастов обломочного циркона в отложениях венда и нижнего кембрия, распространенных на территории Беларуси и Волыни, позволяют считать, что источниками кластики для них выступали в разных соотношениях палеопротерозойские (2.0–1.8 млрд лет) комплексы пород Фенноскандии и Сарматии, изверженные породы Трансскандинавского пояса (ТІВ, 1.81–1.76 млрд лет), граниты рапакиви и ассоциирующие с ними породы (1.65–1.50 млрд лет), магматические образования Данополюнского орогена (1.47–1.44 млрд лет) и траппы Волыньско-Брестской КМП (Paszowski et al., 2019). Временной интервал формирования последних — 620–550 млн лет (Paszowski et al., 2019); по данным (Śröder et al., 2023), первая фаза магматизма (преимущественно излияния основных лав) в указанной провинции имела место 580–567 млн лет назад, вторая (извержения кислой пирокластики) завершилась около 545 млн лет назад.

Изотопный состав Lu и Hf обломочного циркона волынской и валдайской серий на территории Беларуси и Волыни позволяет, кроме того, предполагать, что источниками их выступали магматические породы с модельным возрастом 2.3–2.1 млрд лет. Такие образования широко распространены в пределах Сарматии. В то же время на приведенных в работе (Paszkowski et al., 2019, fig. 6) кривых относительной вероятности возрастов обломочного циркона отсутствуют пики возрастов, сопоставимые с возрастными кульминациями магматических и метаморфических событий на северной, северо-восточной и юго-западной периферии Сарматии (2.10–2.04 млрд лет; Савко и др., 2014, 2017, 2021). Источником циркона с неопротерозойскими возрастными пиками мог являться и террейн Скифия (Paszkowski et al., 2019). Хорошо выраженные возрастные пики, характерные для популяций обломочного циркона, свидетельствуют, по мнению авторов указанной работы, о коротких расстояниях транспортировки их до областей накопления.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Общая характеристика глинистых пород венда и нижнего кембрия

Для волынской-нижнекембрийского интервала Западной Беларуси и Волыни, а также Восточной Беларуси в работе (Jewuła et al., 2022) приведено соответственно 102 и 103 анализа валового химического состава аргиллитов. При этом максимальное содержание SiO_2 для аргиллитов первого из названных регионов составляет 99.3 мас.%, для аргиллитов второго — 91.8 мас.%. Это предполагает,

что в составе выборок кроме собственно глинистых и алевритисто-глинистых пород присутствуют также алевриты и песчаники (рис. 3). Учитывая сказанное, в настоящей работе мы ограничились исследованием аргиллитов с содержанием $\text{SiO}_2 \leq 66$ мас.%. В результате анализируемая далее выборка аргиллитов Западной Беларуси и Волыни включает 96 образцов, а аргиллитов Восточной Беларуси — 93 образца (ДМ_табл. 2).

На основе данных о содержании ряда основных породообразующих оксидов в тонкозернистых обломочных породах венда и нижнего кембрия всех четырех регионов (Подковыров и др., 2017; Jewuła et al., 2022; Маслов, Подковыров, 2023 и др.) построена диаграмма $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (диаграмма НКМ–ФМ; Юдович, Кетрис, 2000), позволяющая судить об их минеральном составе. Точки состава глинистых пород волынской серии Западной Беларуси и Волыни расположены на ней в основном в полях II (преимущественно смектитовые глины с примесью каолинита и иллита) и V (хлорит-смектит-иллитовые глины). Точки таких же по гранулометрическому составу пород редकिनского этапа присутствуют в полях II, III (преимущественно хлоритовые глины с примесью Fe-иллита), IV (хлорит-иллитовые глины), V и VI (иллитовые глины со значительной примесью дисперсных полевых шпатов). Котлинские аргиллиты локализованы преимущественно в поле II и области перекрытия его с полем I (преимущественно каолинистые глины). Наконец, фигуративные точки аргиллитов нижнего кембрия сосредоточены в основном в поле V (рис. 4а). Точки состава глинистых пород волынского этапа Восточной Беларуси расположены на

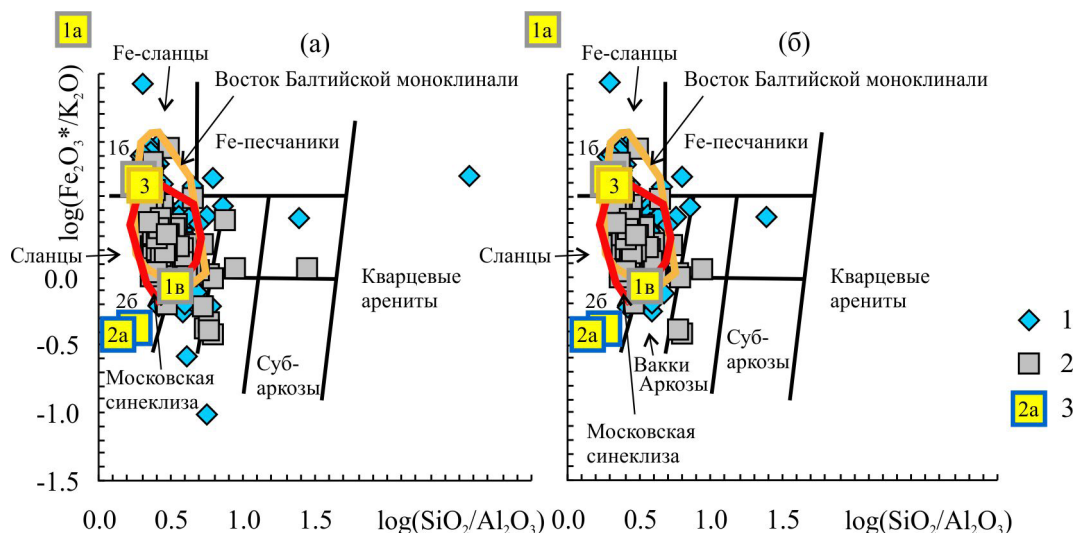


Рис. 3. Положение фигуративных точек состава всех аргиллитов из работы (Jewuła et al., 2022) на диаграмме $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \log(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$ (а) и аргиллитов той же выборки с содержанием $\text{SiO}_2 < 66$ мас.%. 1 — Западная Беларусь и Волынь; 2 — Восточная Беларусь; 3 — референтные точки различных типов глин (Логвиненко, 1967): 1а — глина каолинистая; 16 — глина каолинистая (первичный каолин); 1в — глина каолинистая (вторичный каолин); 2а, 26 — глина иллитовая; 3 — глина смектитовая.

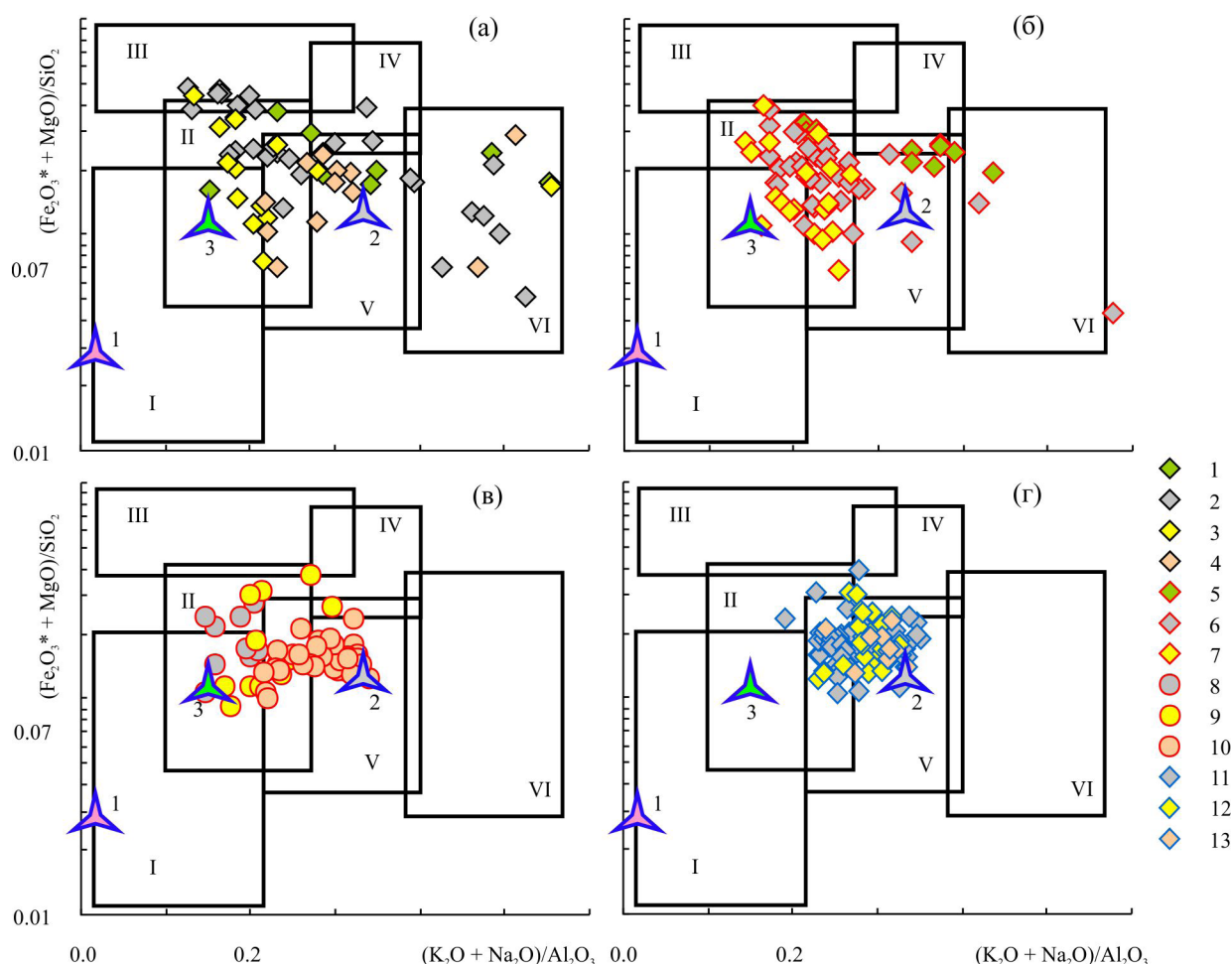


Рис. 4. Положение фигуративных точек аргиллитов волынского (1, 5), редкинского (2, 6, 8, 11), котлинского (3, 7, 9, 12) и нижнекембрийского (4, 10, 13) стратиграфических уровней/этапов Западной Беларуси и Волыни (а), Восточной Беларуси (б), востока Балтийской моноклинали (в) и Московской синеклизы (г) на диаграмме $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$.

Звездочки — референтные составы глинистых минералов (Фролов, 1993): 1 — каолинит, 2 — иллит, 3 — смектит. Поля состава глинистых пород: I — преимущественно каолинитовые, II — преимущественно смектитовые с примесью каолинита и иллита, III — преимущественно хлоритовые с примесью Fe-иллита, IV — хлорит-иллитовые, V — хлорит-смектит-иллитовые, VI — иллитовые со значительной примесью дисперсных полевых шпатов.

указанной диаграмме в области перекрытия полей IV и V, а точки верхневендских аргиллитов сконцентрированы в поле II и области перекрытия его с полем V (рис. 4б). Примерно такое же положение характерно и для фигуративных точек глинистых пород верхнего венда и нижнего кембрия востока Балтийской моноклинали (рис. 4в). Точки состава аргиллитов Московской синеклизы сосредоточены в основном в поле V и области его перекрытия с полем II (рис. 4г).

Сравнение с PAAS

Ярко выраженная особенность состава аргиллитов Западной Беларуси и Волыни — содержание Fe_2O_3^* (суммарное железо в виде Fe_2O_3) > 13 мас.% в более чем 30% образцов, принадлежащих

преимущественно к редкинскому уровню, а также к волынской серии. Для глинистых пород волынского и редкинского уровней соответственно Восточной Беларуси и Западной Беларуси и Волыни характерно также более высокое, чем в среднем постархейском австралийском глинистом сланце (PAAS; Taylor, McLennan, 1985), содержание TiO_2 . Аргиллитам большинства литостратиграфических подразделений свойственно заметно пониженное относительно PAAS содержание CaO и Na_2O . Исключением являются аргиллиты волынского уровня Беларуси и Волыни, а также редкинские и котлинские аргиллиты Московской синеклизы, обладающие сопоставимым с PAAS содержанием Na_2O . Глинистые породы волынского-редкинского интервала Беларуси и Волыни имеют варьирующее

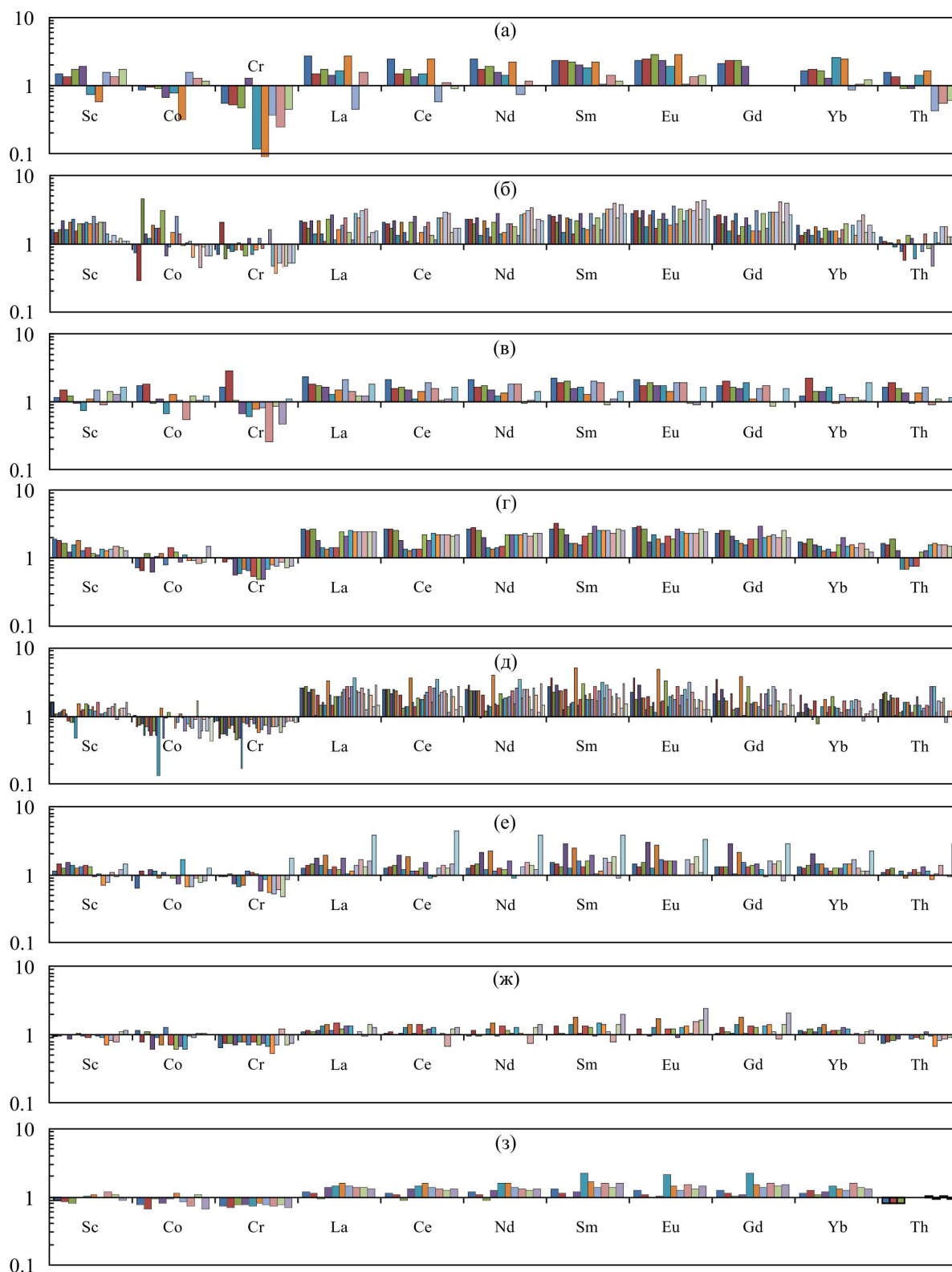


Рис. 5. Нормированное по PAAS содержание ряда редких и рассеянных элементов в аргиллитах венда и нижнего кембрия рассматриваемых в данной работе регионов.

а — волынский стратиграфический уровень Западной Беларуси и Волыни; б — редкинский уровень того же региона; в — котлинский уровень того же региона; г — волынский уровень Восточной Беларуси; д — редкинский уровень Восточной Беларуси; е — котлинский уровень того же региона; ж — редкинский уровень Московской синеклизы; з — котлинский уровень Московской синеклизы.

относительно PAAS содержание P_2O_5 ; для аргиллитов других уровней оно меньше, чем в PAAS.

Сопоставление с PAAS концентраций только тех редких и рассеянных элементов, которые использованы при построении различных диаграмм, показало следующее. Среднее содержание Sc в глинистых породах венда и нижнего кембрия всех четырех рассматриваемых регионов варьирует от 0.94 ± 0.12 PAAS (редкинский уровень, Московская синеклиза) до 1.69 ± 0.43 PAAS (тот же уровень, Западная Беларусь и Волынь). Среднее содержание Со минимально в аргиллитах редкинського уровня Восточной Беларуси (0.76 ± 0.29 PAAS), а максимально в глинистых породах этого же этапа Западной Беларуси и Волыни (1.33 ± 0.95 PAAS). Минимальное значение $Sc_{\text{среднее}}$ составляет 0.45 ± 0.35 PAAS и свойственно глинистым породам волынского уровня Западной Беларуси и Волыни, тогда как максимальная его величина (1.02 ± 0.72 PAAS) характерна для аргиллитов котлинского уровня названного региона. Средние концентрации La, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd и Yb заметно выше, чем в PAAS, в глинистых породах редкинського уровня Западной Беларуси и Волыни, а также волынского и редкинського уровней Восточной Беларуси. В верхневендских аргиллитах Московской синеклизы они, напротив, немногим выше, чем в PAAS (рис. 5).

Прототипы возможных источников тонкой алюмосиликокластики

С учетом всего сказанного выше мы использовали в качестве возможных прототипов/примеров источников обломочного материала для отложений венда и нижнего кембрия Беларуси и Волыни, а также востока Балтийской моноклинали и Московской синеклизы ряд магматических комплексов и ассоциаций, для которых в литературе приведены сведения о возрасте и валовом химическом составе (здесь они не повторяются) пород. Это не означает, что именно названные далее комплексы и ассоциации выступали источниками кластики для рассматриваемых нами осадочных последовательностей; они только позволяют определиться с теми или иными их литогеохимическими ограничениями.

Палеопротерозойские (2.0–1.8 млрд лет) комплексы пород Фенноскандии представлены в нашем банке аналитических данных образованиями вулканических центров Ориярви и Энклинге Юго-Западной Финляндии (породы от габбро до гранитов и вулканические породы с возрастом 1.90–1.88 млрд лет; Kara et al., 2018), продуктами адакитового и ТТГ-подобного магматизма (граниты, диориты, гранодиориты, тоналиты, чарнокиты и трондьемиты) там же (Väisänen et al., 2012) и ортопородами свекокарелид Пояса Саво Западного Приладожья (Котова, Подковыров, 2014). К ним принадлежат также гранитоиды интрузии Бакэби

и риолиты Юго-Восточной Швеции (Mansfeld, 1996). На восточном (в современных координатах) фланге Сарматии 2.20–2.14 млрд лет назад сформировалась островодужная система, а позднее возник Волго-Донской ороген (Щипанский и др., 2007; Терентьев и др., 2014; Savko et al., 2018). Распад его (~2.06 млрд лет) привел к внедрению гранитоидов S-, A- и I-типов, диоритов, габброидов, перидотитов, сиенитов, карбонатитов и бимодальных вулканитов (Савко и др., 2019). Однако обломочный циркон с такими возрастными в породах венда и нижнего кембрия Беларуси, Волыни и востока Балтийской моноклинали практически отсутствует, что указывает, по всей видимости, на невовлеченность перечисленных источников в размыв. Можно предположить, что источником циркона с возрастными ~2.0 млрд лет был Осницко-Микашевичский вулканоплутонический пояс Украинского щита, представлявший ~1.98–2.0 млрд лет назад активную континентальную окраину (Шумлянский, 2014). Сложен он метадиабазами, долеритами и трахидолеритами, габбро-долеритами и габбро, диоритами, гранитами, лейкогранитами и аляскитами, сиенитами, дацитами, трахи- и риодацитами, риолитами (Аксаментова, 1997). Примерно в это же время на востоке Восточно-Воронежской провинции формировались гранитоиды Романовского и Ворошиловского массивов (Савко и др., 2011).

Трансскандинавский пояс изверженных пород (ТІВ), окаймляющий Свекофеннский домен с юго-запада, сформирован в результате орогенеза, временные рамки которого понимаются разными исследователями несколько по-разному — от 1.85–1.81 до 1.76–1.67 млрд лет. Для получения обобщенной геохимической характеристики слагающих его образований мы используем аналитические данные для кислых магматических пород с возрастом ~1.80–1.79 млрд лет, вскрывающихся в тектоническом окне Ромбак в центральной части Норвегии (Korneliussen, Sawyer, 1989). В скандинавских каледонидах к этому поясу относятся кварцевые монциты комплекса покровов Сталон и кварцевые монцодиориты и монциты комплекса покровов Аммарнас (Grimmer et al., 2016). На юго-востоке Швеции к ТІВ принадлежат гранитоиды и сиениты комплекса Вестервик; формирование их происходило 1.87–1.84 и 1.81–1.77 млрд лет назад (Nolte et al., 2011). Имеющие островодужную природу габбро, габбро-нориты, лейкогаббро и кварцевые диориты с возрастом 1.87–1.78 млрд лет в центральной части Швеции также рассматриваются как составная часть ТІВ (Rutanen, Andersson, 2009). Это же можно сказать о гранитоидах южной части о-ва Готланд с возрастом 1845 ± 4 млн лет, кварцевых монцититах (1799 ± 4 млн лет) района Бода Хамн, северный Эланд, таких же породах района Валлеснес, центральный Эланд (1788 ± 5 млн лет), а также гранодиоритах, вскрытых скважинами у побережья

Латвии и Литвы. Последние сопоставляются с ортогнейсами провинции Блекинге на юге Швеции, а также с ортогнейсами Северной Польши (Salin et al., 2019). Еще один пример магматических образований ПВ — пост- и анорогенные гранитоиды комплекса Дала и ассоциирующие с ними кислые вулканы центральной Швеции (1.79, 1.70–1.68 млрд лет; Ahl et al., 1999).

В качестве примеров гранитов рапакиви, выступавших источниками обломочного циркона с возрастами от 1.65 до 1.50 млрд лет, мы рассматриваем Рижский батолит и ряд небольших его штоков на территории Эстонии и Латвии (Kirs et al., 2004), а также Выборгский и Салминский батолиты (анортозиты, габбро-нориты, монцитоны, кварцевые сиениты, биотитовые и Li-F граниты и др.) (Ларин, 2011). По данным (Коньшев и др., 2020; Konyshev, 2023), последний включает: 1) биотит-амфиболовые и фаялитсодержащие граниты и кварцевые сиениты; 2) биотитовые граниты; 3) топазсодержащие граниты. Еще один возможный источник кластики — анортозиты Северной Польши (массивы Сувалки и Сейны, принадлежащие восточной части Мазурского анортозит-мангерит-чарнокит-гранитного (АМСГ) комплекса, сложенного рапакиви-подобными гранитоидами и ассоциирующими с ними породами (Wisniewska et al., 2002)).

Возможно, источниками кластики являлись и граниты рапакиви Сарматии, такие как Корсунь-Новомиргородский и Коростеньский комплексы/массивы, краткая характеристика химического состава которых приведена в (Гранитоиды..., 1993). Первый включает монцитоны, кварцевые монцитоны и сиениты, граниты рапакиви, а также аплитовидные граниты. Второй представлен кварцевыми монцитонами и сиенитами, монцитонами, гранитами рапакиви и рапакиви-подобными гранитами, гранит-порфирами и аплит-пегматоидными гранитами. Формирование основного объема гранитов рапакиви происходило 1770–1765 млн лет назад (Amelin et al., 1994; Ларин, 2011).

Примерами магматических образований Данополюнского орогена в нашей работе являются гранитоиды и ортогнейсы (~1.45 млрд лет) о-ва Борнхольм (Johansson et al., 2016). В Литве к названному орогену относятся плутоны АМСГ-ассоциации — кварцевые монцодиориты Рукай, монцитоны и граниты Гелува (Skridlaite et al., 2007). К нему же принадлежат граниты, вскрытые скв. G 14-1 в Балтийском море северо-восточнее о-ва Рюген (Obst et al., 2004), и интрузия Стенсхувуд Южной Швеции, сложенная кварцевыми монцитонами, тоналитами, монцогранитами и аплитами с возрастом 1458 ± 6 млн лет (Čečarys et al., 2002).

Наконец, Волыньско-Брестская КМП включает как основные, так и кислые магматические

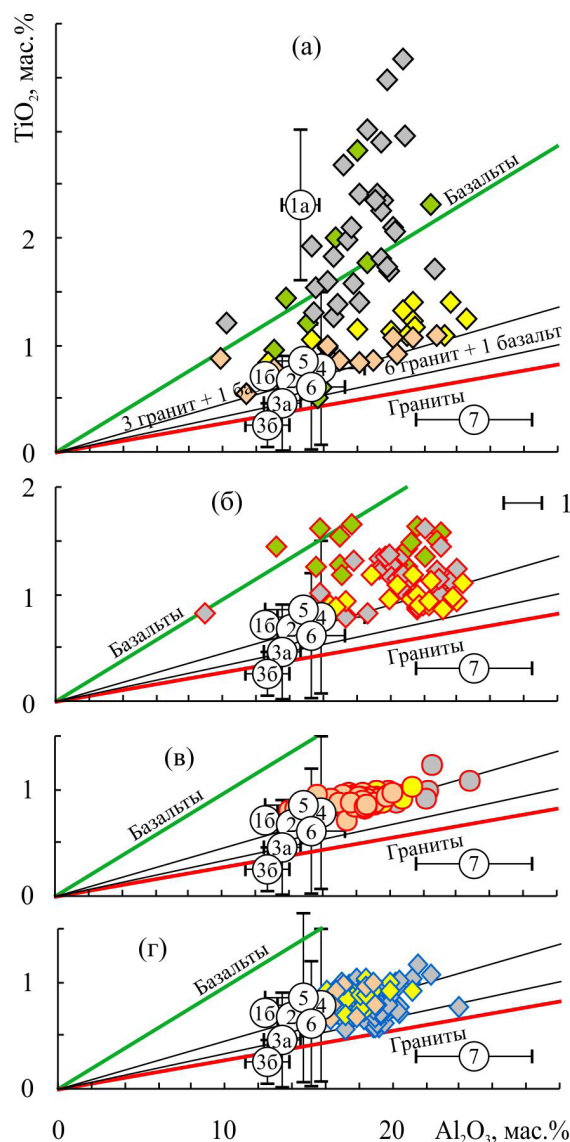


Рис. 6. Положение фигуративных точек аргиллитов волынского, редкинско-котлинского и нижнекембрийского уровней/этапов Западной Беларуси и Волыни (а), Восточной Беларуси (б), востока Балтийской моноклинали (в) и Московской синеклизы (г) на диаграмме Al_2O_3 – TiO_2 .

Цифры в кружках — средние точки состава прототипов источников тонкой алюмосиликокластики: 1а — основные породы Волыньско-Брестской КМП, 16 — кислые породы той же КМП, 2 — Данополюнский ороген, 3а — граниты рапакиви и ассоциирующие с ними породы Украинского щита, 3б — то же северо-запада России и Прибалтики, 4 — Транскандинавский пояс изверженных пород, 5 — комплексы пород Сарматии с возрастом 2.0–1.8 млрд лет, 6 — свекофенниды Скандинавии, 7 — анортозиты Польши. 1 — стандартное отклонение ($\pm 1\sigma$). Остальные условные обозначения см. рис. 4.

породы (Кузьменкова и др., 2010; Kuzmenkova et al., 2011; Шумлянский и др., 2011). Основные породы

представлены субщелочными и толеитовыми базальтами, долеритами и габбро-долеритами. К кислым породам принадлежат андезидациты, дациты, риодациты и трахириодациты. Сведения о валовом химическом составе их представительных образцов заимствованы нами из работы (Носова и др., 2008).

ОБСУЖДЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА И ВЫВОДЫ

Положения точек состава аргиллитов на дискриминантных диаграммах

На диаграмме $Al_2O_3-TiO_2$ (McLennan et al., 1979) распределение точек состава глинистых пород венда и нижнего кембрия Западной Беларуси и Волыни характеризуется хорошо выраженным тяготением к линии “базальт” и средней точке основных пород Волыньско-Брестской КМП

(аргиллиты волынского и редкинского уровней), а фигуративные точки аргиллитов котлинского уровня и нижнего венда, обладая заметно более низким содержанием TiO_2 , сосредоточены у линии “3 гранит + 1 базальт” (рис. 6а), и их состав в определенной степени похож на состав кислых пород Волыньско-Брестской КМП, гранитов рапакви разного возраста, изверженных пород Дано-полонского орогена, а также магматических ассоциаций с возрастами 2.0–1.8 млрд лет Сарматии и Свекофеннид.

Это дает основание считать, что влияние продуктов размыва основных пород Волыньско-Брестской КМП на формирование осадочных последовательностей рассматриваемого региона уже не сказывалось, начиная с котлинского времени. В то же время в тонкозернистых обломочных породах волынского и редкинского уровней здесь достаточно мало продуктов размыва магматических пород

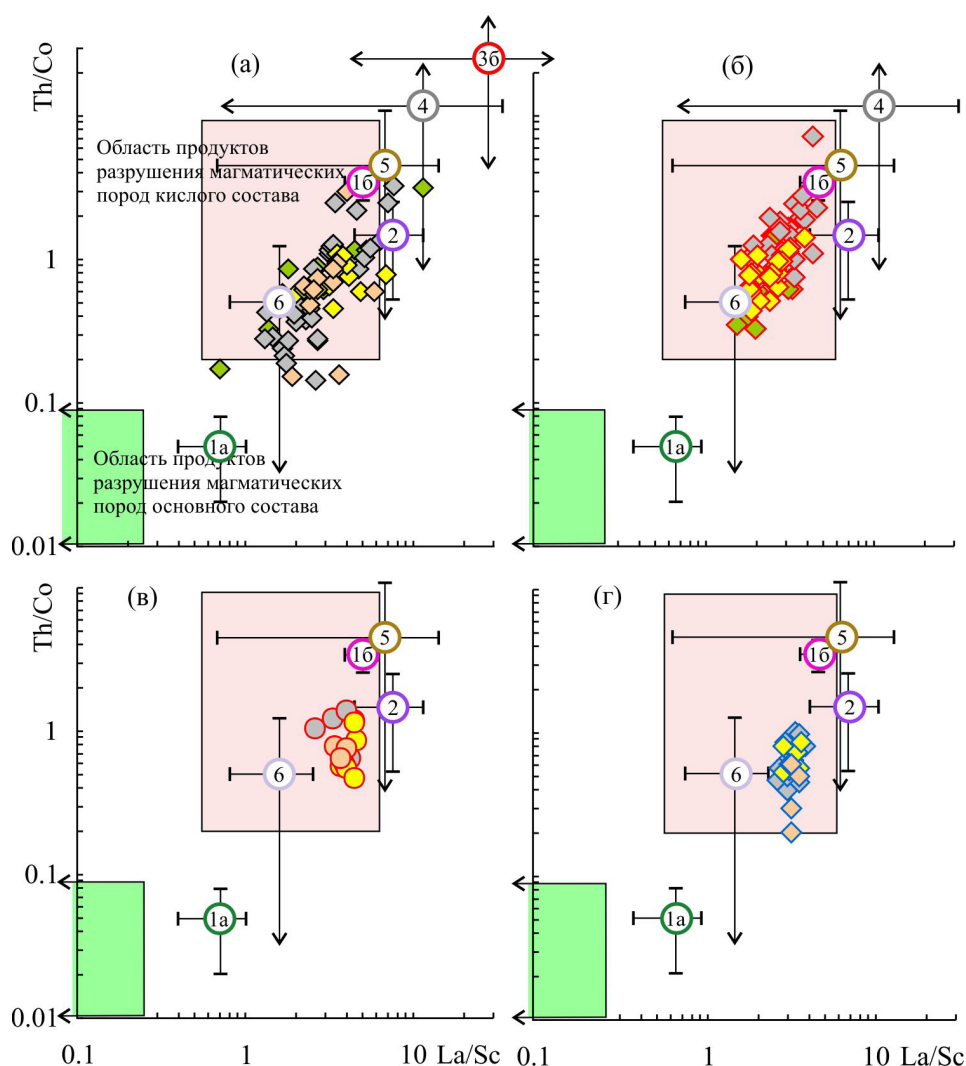


Рис. 7. Положение фигуративных точек аргиллитов волынского, редкинского, котлинского и нижнекембрийского уровней/этапов Западной Беларуси и Волыни (а), Восточной Беларуси (б), востока Балтийской моноклинали (в) и Московской синеклизы (г) на диаграмме $La/Sc-Th/Co$. Условные обозначения см. рис. 4 и 6.

кислого состава. Распределение фигуративных точек аргиллитов этого же стратиграфического интервала Восточной Беларуси немного иное. К линии “базальт” на диаграмме $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ тяготеет, как и можно было ожидать, значительная часть точек состава глинистых пород волинского этапа (рис. 6б). Точки же и редкинских, и котлинских, и нижнекембрийских аргиллитов в основном расположены вблизи линии “3 гранит + 1 базальт”. Таким образом, в указанном регионе влияние продуктов размыва основных пород на состав тонкозернистых обломочных образований существенно не сказывается уже и на редкинском уровне. Редкинско-нижнекембрийские глинистые породы и на востоке Балтийской моноклинали, и в Московской синеклизе сосредоточены на рассматриваемой диаграмме вдоль этой же линии, а в ряде случаев (это особенно характерно для Московской синеклизы) можно предполагать, что в их составе доля продуктов размыва кислых магматических пород является преобладающей (рис. 6в, 6г). Еще один вывод из рассмотрения диаграммы $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$ — материал размыва анортозитов существенной роли в составе исследуемых глинистых пород, по всей видимости, не играет.

Положение фигуративных точек глинистых пород венда и нижнего кембрия всех четырех регионов на диаграмме La/Sc--Th/Co (Cullers, 2002) в достаточной мере сходно с таковым на диаграмме $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2$. Львиная доля точек состава аргиллитов сосредоточена в области продуктов разрушения магматических пород кислого состава (рис. 7). Присутствие некоторой доли продуктов размыва пород основного состава можно предполагать только для глинистых пород волинского и редкинских уровней Западной Беларуси и Волыни. Состав глинистых пород других уровней и регионов по соотношению La/Sc и Th/Co похож на состав кислых магматических образований Волинско-Брестской КМП, Данополюнского и Свекофеннского орогенов. Более компактное расположение точек аргиллитов Балтийской моноклинали и Московской синеклизы, возможно, связано с гомогенизацией тонкой алюмосиликокластики на путях переноса.

Распределение точек состава глинистых пород венда и нижнего кембрия Западной Беларуси и Волыни на графике Cr/Th--Th/Sc (Condie, Wronkiewicz, 1990; Bracciali et al., 2007) показывает существенные вариации соотношения продуктов размыва основных и кислых магматических пород в аргиллитах волинского и редкинских уровней (рис. 8а). Интересно, что вклад основной алюмосиликокластики выше для глинистых пород редкинских уровней (до 35–40%), тогда как в аргиллитах волинской серии такого материала в целом несколько меньше. Состав глинистых пород котлинского этапа и нижнего кембрия более однороден; доля продуктов размыва магматических пород основного состава составляет в них ~10–30%.

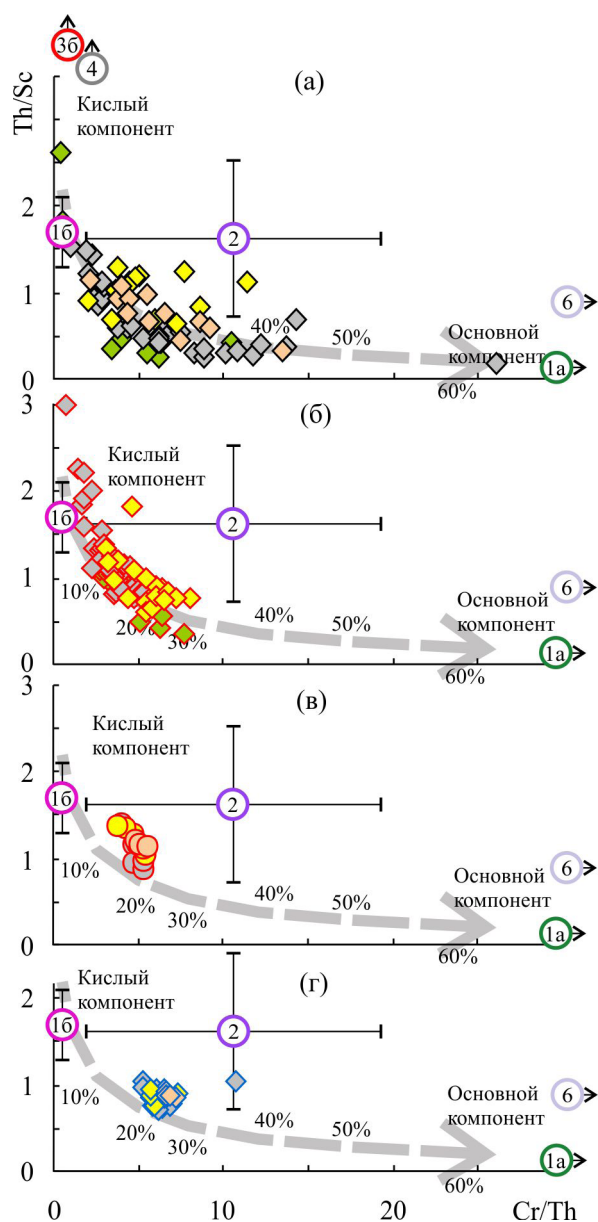


Рис. 8. Положение точек состава аргиллитов волинского, редкинских, котлинских и нижнекембрийских уровней/этапов Западной Беларуси и Волыни (а), Восточной Беларуси (б), востока Балтийской моноклинали (в) и Московской синеклизы (г) на диаграмме Cr/Th--Th/Sc . Условные обозначения см. рис. 4 и 6.

Определенные источники тонкой алюмосиликокластики для рассматриваемых нами осадочных последовательностей с помощью данной диаграммы, по-видимому, не могут быть реконструированы, за исключением кислых магматических пород Волинско-Брестской КМП и Данополюнского орогена. Глинистые породы волинского этапа Восточной Беларуси содержат от 20 до 30% продуктов размыва магматических пород основного состава (рис. 8б), а аргиллиты верхнего венда — от менее

10 до ~20–25%. Примерно столько же тонкой основной алюмосиликокластики присутствует в глинистых породах верхнего венда и нижнего кембрия востока Балтийской моноклинали и Московской синеклизы (рис. 8в, 8г).

РЗЭ систематика прототипов источников алюмосиликокластики и аргиллитов

Описанные выше прототипы пород-источников тонкой алюмосиликокластики, слагающей осадочные последовательности венда и нижнего кембрия Беларуси и Волыни, восточной части Балтийской моноклинали и Московской синеклизы, для которых в нашем банке данных имеются сведения о содержании редкоземельных элементов (РЗЭ), обладают следующими средними характеристиками нормированных на хондрит (Taylor, McLennan, 1985) спектров распределения РЗЭ.

Палеопротерозойские (2.0–1.8 млрд лет) комплексы пород Фенноскандии ($n = 96$; n здесь и далее — количество образцов в той или иной выборке) имеют относительно слабо выраженную отрицательную Eu-аномалию ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.88 \pm 0.43$). Максимальное значение Eu/Eu^* для индивидуального образца достигает 3.51, минимальное равно 0.17. Величина $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{Нсреднее}}$ составляет 2.0 ± 1.3 ; при этом 48% входящих в наш банк данных образцов характеризуется

значениями данного параметра ≤ 2.0 . Для остальных это отношение варьирует между 2.0 и 6.4. Средняя величина $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ составляет 11.5, но для индивидуальных образцов названный параметр варьирует от 1.0 до ~93 (!) (рис. 9а). Таким образом, предполагая в соответствии с представлениями (Taylor, McLennan, 1985; McLennan, 1989; Rollinson, 1994; Cullers, 1995 и др.), что распределение РЗЭ без серьезных изменений наследуется от пород-источников кластики тонкозернистыми осадками областей седиментации, РЗЭ систематика аргиллитов венда и нижнего кембрия всех четырех рассматриваемых нами регионов полностью определяется только этим источником, что, однако, не согласуется с возрастными обломочного циркона в песчаниках.

Представленные в нашем банке данных магматические породы Сарматии ($n = 27$) обладают средним значением $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 14.5 \pm 7.3$ и отрицательной Eu-аномалией (0.70 ± 0.33), сопоставимой с таковой для ПААС (0.65). Разброс значений Eu/Eu^* в индивидуальных образцах отвечает интервалу 0.21–1.16. Средняя величина $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ равна 2.3 ± 0.7 ; при этом в 56% образцов наблюдается деплетирование тяжелых РЗЭ (ТРЗЭ (значения $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ варьируют от 2.1 до 4.3).

Изверженные породы Трансскандинавского пояса ($n = 80$) имеют среднее значение $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} 9.2 \pm 4.9$

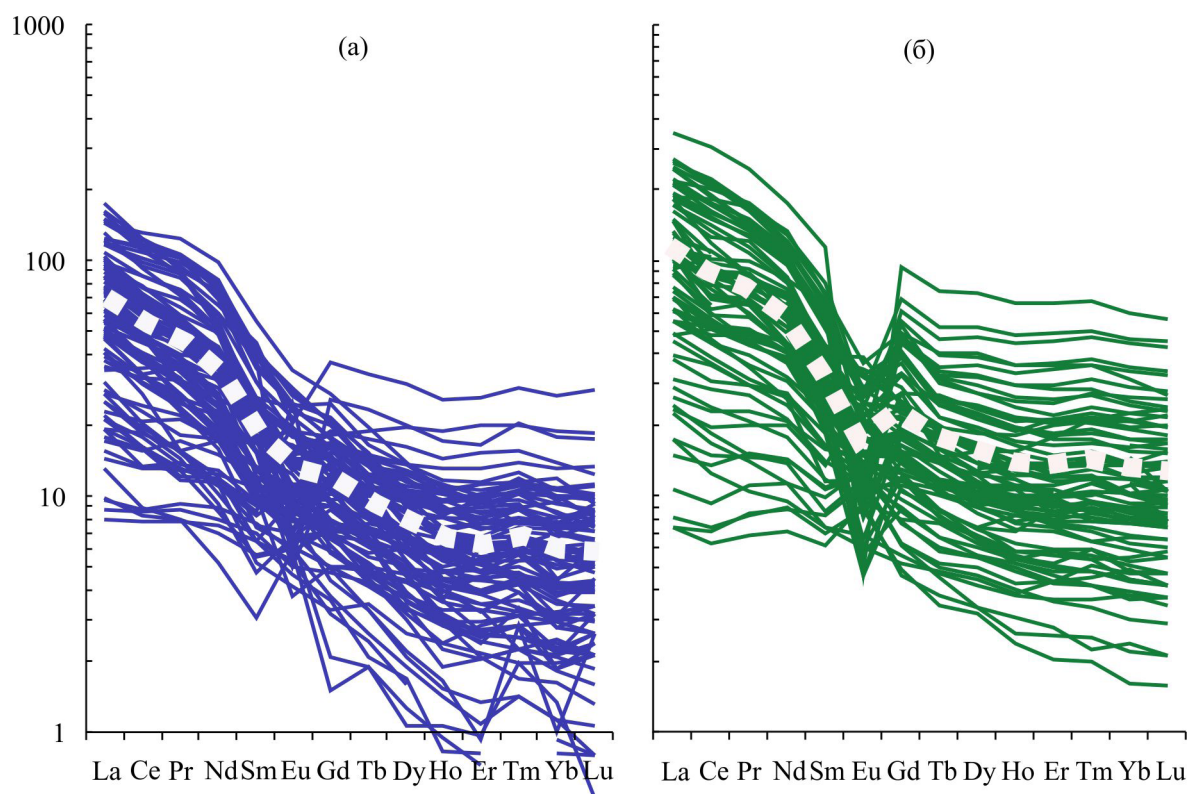


Рис. 9. Нормированные по хондриту спектры распределения лантаноидов в породах Свекофеннского орогена (а) и Трансскандинавского пояса изверженных пород (б). Штрих-пунктир — средние для рассматриваемых объектов спектры РЗЭ.

(минимум 2.5, максимум 32.0) (рис. 96). Параметр $(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}^{\text{среднее}}$ составляет 1.9 ± 0.5 (минимум 0.8, максимум 3.1; деплетирование ТРЗЭ наблюдается примерно в 38% индивидуальных образцов). Среднее значение Eu/Eu^* относительно невелико (0.81 ± 0.40 , минимум 0.05, максимум 2.09).

Граниты рапакиви и ассоциирующие с ними породы, являвшиеся, как предполагают авторы работы (Jewuła et al., 2022), источниками обломочного циркона с возрастaми от 1.65 до 1.50 млрд лет, характеризуются средней величиной параметра $(\text{La/Yb})_{\text{N}} 9.5 \pm 6.7$, тогда как минимальное и максимальное значения его составляют 0.9 и 28.7 соответственно. Среднее значение $(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}$ равно 1.6 ± 0.7 , а максимальное достигает 2.8. Рассматриваемая нами выборка ($n = 29$) обладает выраженной Eu-аномалией ($\text{Eu/Eu}^* = 0.43 \pm 0.39, 0.07-1.52$).

Гранитоиды Корсунь-Новомиргородского и Коростеньского массивов ($n = 21$) характеризуются средней величиной $(\text{La/Yb})_{\text{N}} = 8.3$.

Анортозитам Польши ($n = 9$) свойственна высокая средняя величина $(\text{La/Yb})_{\text{N}} (27.9 \pm 20.6)$, положительная Eu-аномалия (3.80 ± 2.41) и выраженное деплетирование ТРЗЭ ($(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}^{\text{среднее}} = 2.9 \pm 1.6$, максимум 5.9). Значения Eu/Eu^* для них варьируют от 1.74 до 8.93. Очевидно, что вклад алюмосиликокластики с указанными РЗЭ характеристиками в формирование глинистых пород венда и нижнего кембрия рассматриваемых нами регионов был минимальным, если такой материал вообще достигал областей осадконакопления.

Магматические образования Данополюнского орогена ($n = 81$) обладают относительно невысоким средним значением $(\text{La/Yb})_{\text{N}} = 8.2 \pm 2.7$ (минимум 2.0, максимум 20.2). Деплетирование ТРЗЭ для них не характерно ($0.6 < (\text{Gd/Yb})_{\text{N}} < 1.8$). Средняя величина отрицательной Eu-аномалии составляет 0.58 ± 0.13 .

Для основных пород Волынского-Брестской КМП ($n = 21$) параметр $(\text{La/Yb})_{\text{N}}^{\text{среднее}}$ равен 5.4 ± 1.5 (минимум 3.2, максимум 8.4). Значения $(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}$ варьируют от 1.5 до 2.9 (деплетирование ТРЗЭ характерно для 29% индивидуальных образцов). Eu-аномалия отсутствует ($\text{Eu/Eu}^*_{\text{среднее}} = 0.96 \pm 0.12$, максимум 1.26). Кислые породы провинции ($n = 5$) характеризуются средним значением $(\text{La/Yb})_{\text{N}} = 8.0 \pm 0.6$. Деплетирование ТРЗЭ им не свойственно, а величина $\text{Eu/Eu}^*_{\text{среднее}}$ составляет 0.59 ± 0.02 . Нормированные на хондрит средние спектры распределения РЗЭ для предполагаемых источников тонкой алюмосиликокластики показаны на рис. 10а, 10б.

Среднее содержание РЗЭ в глинистых породах волынского, редкинського, котлинського и нижнекембрийского уровней Западной Беларуси и Волыни составляет соответственно 289.2 ± 111.6 , 349.7 ± 97.5 , 278.3 ± 68.8 и 252.0 ± 58.0 мкг/г. Это значительно выше, чем среднее содержание

лантаноидов в РААС (184.7 мкг/г). Для аргиллитов волынской серии ($n = 9$) параметр $(\text{La/Yb})_{\text{N}}^{\text{среднее}}$ равен 9.4 ± 3.5 , а максимальное его значение составляет 15.6. Это предполагает отсутствие в составе глинистых пород существенной доли продуктов размыва основных магматических образований, хотя двум из девяти образцов свойственны значения данного параметра 4.9 и 5.8. Величина $\text{Eu/Eu}^*_{\text{среднее}}$ равна 0.75 ± 0.06 . Деплетирование ТРЗЭ не наблюдается. Аргиллиты редкинського уровня ($n = 28$) характеризуются сопоставимыми с волыньскими аргиллитами средними величинами $(\text{La/Yb})_{\text{N}} = 10.7 \pm 2.5$ и $\text{Eu/Eu}^* = 0.75 \pm 0.06$. Ни в одном образце исследованной нами выборки величина $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ не опускается ниже 6.0; по-видимому, доля продуктов размыва магматических пород основного состава в редкинських аргиллитах относительно невелика. Для 7 образцов аргиллитов параметр $(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}$ составляет более 2.0, что указывает на деплетирование ТРЗЭ. Для глинистых пород котлинського уровня ($n = 12$) разброс значений $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ в индивидуальных образцах составляет 7.1–18.1 (среднее 11.9 ± 3.6). Средняя величина отрицательной Eu-аномалии составляет 0.68 ± 0.06 (минимум 0.78, максимум 0.56). Деплетирование ТРЗЭ в аргиллитах этого уровня разреза отсутствует. Глинистые породы нижнего кембрия Западной Беларуси и Волыни ($n = 13$) имеют среднюю величину $(\text{La/Yb})_{\text{N}} = 9.9 \pm 2.9$ (разброс значений 6.4–16.4), что, так же как и для рассмотренных выше уровней, предполагает преобладание на палеоводосборах кислых магматических пород. Для 5 из 13 образцов характерно деплетирование ТРЗЭ ($(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}^{\text{среднее}} = 1.9 \pm 0.8$). Вариации Eu/Eu^* в индивидуальных образцах отвечают интервалу 0.58–0.79 (среднее 0.67 ± 0.06) (рис. 10в).

Глинистые породы венда и нижнего кембрия Восточной Беларуси также характеризуются весьма высоким суммарным содержанием РЗЭ. Так, для аргиллитов волынской серии средняя сумма РЗЭ равна 378.9 ± 77.2 мкг/г. Аргиллиты редкинського уровня характеризуются значением $\Sigma\text{РЗЭ}_{\text{среднее}} 382.6 \pm 118.0$ мкг/г, а котлинського — 280.6 ± 118.6 мкг/г. Среднее значение $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$ для глинистых пород волынской серии ($n = 17$) составляет здесь 13.1 ± 2.9 (минимум 8.5, максимум 18.3). Это предполагает, что источниками тонкой алюмосиликокластики для них выступали преимущественно породы кислого состава. Значения $(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}$ в индивидуальных образцах волыньских тонкозернистых обломочных пород изменяются от 1.5 до 2.5; деплетирование ТРЗЭ характерно примерно для 40% из них. Параметр $\text{Eu/Eu}^*_{\text{среднее}}$ равен 0.67 ± 0.07 . Аргиллиты редкинського уровня Восточной Беларуси ($n = 36$) обладают более высоким значением $(\text{La/Yb})_{\text{N}}$, чем глинистые породы волынского уровня (14.9 ± 3.7). Величина $(\text{Gd/Yb})_{\text{N}}$ в индивидуальных образцах варьирует от 1.1 до 2.9 (среднее 1.9 ± 0.4). Среднее

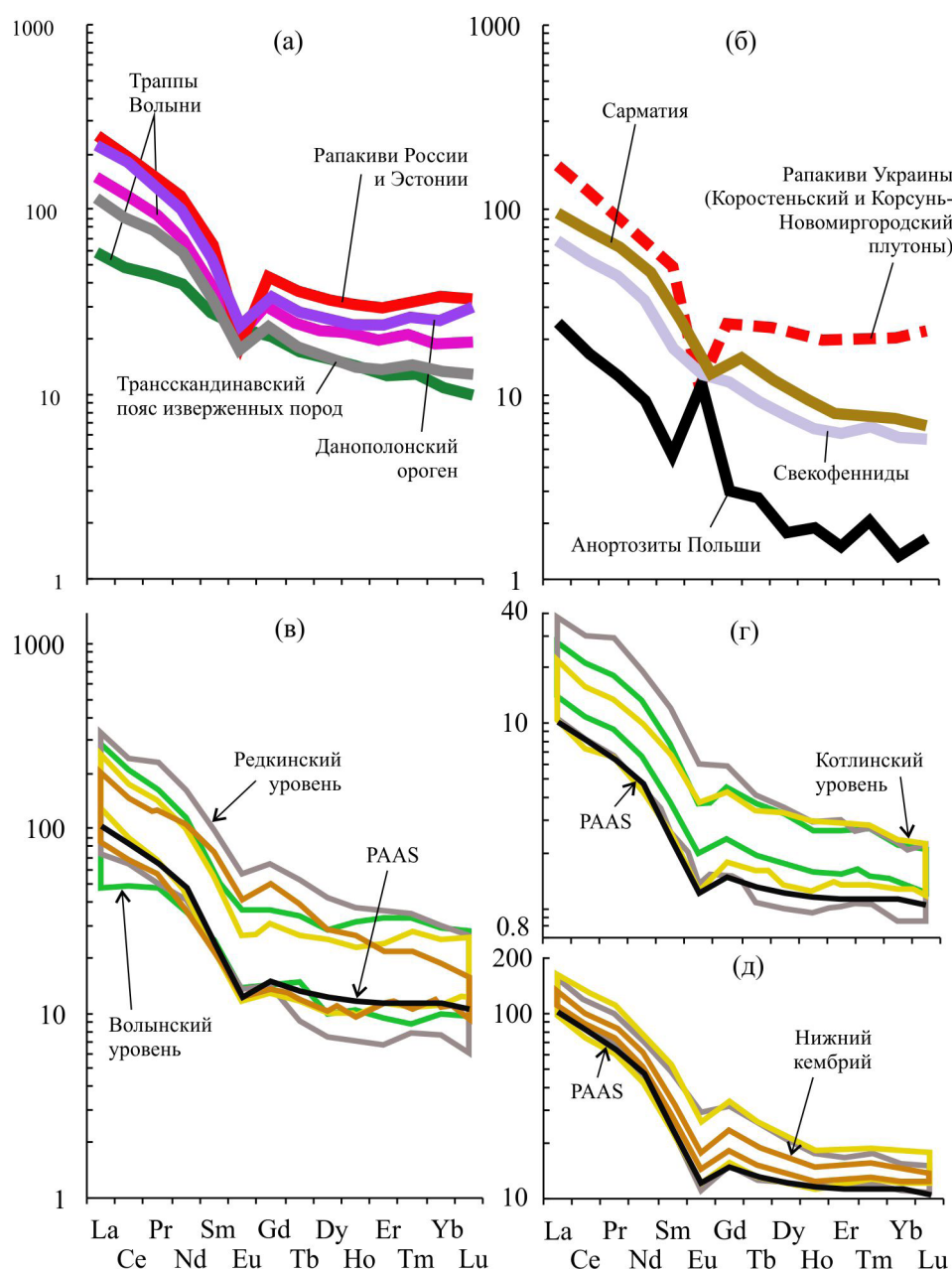


Рис. 10. Средние спектры нормированных к хондриту лантаноидов в прототипах источников тонкой алюмосиликокластики (а, б) для глинистых пород венда и нижнего кембрия Западной Беларуси и Волыни (в), Восточной Беларуси (г) и Московской синеклизы (д).

значение Eu -аномалии практически сопоставимо с ее значением в PAAS. Глинистые породы котлинского уровня ($n = 14$) по сравнению с подстилающими образованиями характеризуются заметным снижением средней величины $(La/Yb)_N$ (9.7 ± 1.9), что, возможно, связано с появлением в областях питания, во время накопления исходных для них осадков, магматических пород основного состава. Деплетирование ТРЗЭ в аргиллитах отсутствует, а значение Eu/Eu^* в индивидуальных

образцах варьирует от 0.58 до 0.80 (среднее 0.69 ± 0.06) (рис. 10г).

Для глинистых пород венда и нижнего кембрия востока Балтийской моноклинали в нашем распоряжении имеются только данные о содержании La , Ce и Yb . Расчет по ним величин $(La/Yb)_N$ в индивидуальных образцах ($n = 42$) и средних для редкин-ского, котлинского и нижнекембрийского уровней показывает, что тонкозернистые обломочные породы нижнего кембрия характеризуются заметно

более низким средним значением этого параметра (4.7 ± 2.4), чем аргиллиты верхнего венда (соответственно 9.0 ± 1.1 и 8.4 ± 1.5). Если эти аналитические данные корректны, то в начале кембрия в восточную часть Балтийской синеклизы поступало, по-видимому, существенное количество продуктов размыва магматических пород основного состава. Однако данные по другим элементам не согласуются с этим предположением.

Глинистые породы венда и нижнего кембрия Московской синеклизы обладают $\Sigma \text{РЗЭ}$ среднее от 215.7 ± 32.4 (редкинский уровень) до 239.5 ± 36.2 мкг/г (котлинский уровень). Средние значения $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ и Eu/Eu^* в аргиллитах редкинских ($n = 15$), котлинских ($n = 10$) и нижнекембрийских ($n = 4$) уровней сопоставимы (9.8 ± 0.9 , 9.3 ± 1.1 и 9.2 ± 0.6 ; 1.5 ± 0.4 , 1.5 ± 0.3 и 1.5 ± 0.1 ; 0.63 ± 0.05 , 0.61 ± 0.01 и 0.62 ± 0.01 соответственно). Для РААС эти параметры составляют соответственно 9.2, 1.3 и 0.65 (рис. 10д). Достаточно небольшие средние значения $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ на всем протяжении времени формирования осадочных последовательностей верхнего венда–нижнего кембрия рассматриваемого региона предполагают вовлечение в размыв существенно большей доли магматических пород основного состава, чем это характерно, например, для редкинских уровней Восточной Беларуси. В то же время минимальные величины $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ в Московской синеклизе ни в одном индивидуальном образце не опускаются ниже 7.7, что указывает, на наш взгляд, на отсутствие доминирования основных магматических пород на палеоводосборах.

С использованием данных о содержании РЗЭ в ортопородах — предполагаемых источниках тонкой алюмосиликокластики (соответствующих данных для метаморфических пород-источников в нашем распоряжении, к сожалению, нет), нами на основе процедуры линейного программирования, позволяющей рассчитать вклад тех или иных источников в состав глинистых пород (Граунов и др., 2023), проведена их верификация. Для анализа использованы средние содержания РЗЭ в гранитах рапакиви Выборгского и Салминского плутонов, а также Свеконорвежского пояса, монцонитах, сиенитах и гранитах Трансскандинавского пояса и гранитоидах Сарматии. Расчеты показали, что наилучшее соответствие данных в системе “источник–осадок” наблюдается для аргиллитов Западной Беларуси и Волыни, сложенных материалом, накапливавшимся в наибольшей близости к источникам и минимально затронутым процессами смешения и рециклирования.

Вклад в формирование аргиллитов волынского и редкинских уровней Западной Беларуси и Волыни гранитов рапакиви Салминского и Выборгского плутонов на основе проведенных расчетов можно оценить соответственно в 12–30 и 6–18%. Вклад

гранитоидов и монцонитов Трансскандинавского пояса составлял 6–75 и 4–70% соответственно. Вклад гранитоидов Сарматии и Свеконорвежского орогена в волыньских аргиллитах Западной Беларуси и Волыни не установлен. Аргиллиты редкинских уровней сложены, вероятно, тонкой алюмосиликокластикой — продуктами разрушения как гранитов рапакиви типа Салминского и Выборгского плутонов (5–80%), так и монцонитов Трансскандинавского пояса (5–83%). В ряде случаев они могут быть представлены также тонкой алюмосиликокластикой с РЗЭ характеристиками, сопоставимыми с систематикой лантаноидов в гранитоидах Сарматии (0–64%) и Свеконорвежского пояса (0–60%). Аргиллиты котлинского уровня и нижнего кембрия Западной Беларуси и Волыни демонстрируют в части случаев несоответствие результатов вычислений необходимым критериям модели. Там же, где такое соответствие есть, можно видеть сдвиг состава источников кластики в сторону гранитов рапакиви Салминского плутона (4–50%) и гранитов Сарматии (37–50%).

Для большинства аргиллитов волынского уровня Восточной Беларуси источниками кластики по результатам расчетов могли являться граниты рапакиви (Выборгский, 18–65%, или Салминский, 19–41%, плутоны) и/или граниты Трансскандинавского пояса. В ряде образцов предполагается участие продуктов размыва гранитоидов Сарматии (29–70%) или Свеконорвежского орогена (14–65%). Редкинские аргиллиты также в существенной мере сложены тонкой алюмосиликокластикой — продуктами разрушения гранитов рапакиви типа Салминского и Выборгского плутонов. Для менее трети из них основными источниками материала могли являться свеконорвежские гранитоиды (27–90%). В аргиллитах котлинского уровня практически нет материала размыва гранитоидов Сарматии; преобладает тонкая алюмосиликокластика, образованная при эрозии салминских гранитов рапакиви и гранитоидов Трансскандинавского пояса. Для ряда образцов основным источником могли быть свеконорвежские А-граниты (76–79%).

Девять из 16 образцов редкинских аргиллитов Московской синеклизы не соответствуют по сумме критериев требованиям используемой нами модели. Для остальных расчеты показывают присутствие среди источников алюмосиликокластики гранитов (5–68%) и сиенитов (14–48%) Трансскандинавского пояса, а также гранитов рапакиви и топазовых лейкогранитов салминского типа. Четыре образца могут содержать материал свеконорвежских гранитоидов (10–30%). Более половины котлинских аргиллитов также не соответствуют модели, остальные сложены материалом размыва сиенитов Трансскандинавского пояса (12–50%), салминских гранитов рапакиви и топазовых гранитов (соответственно 11–25 и 10–27%). Для некоторых из них

можно предполагать участие продуктов размыва свеко норвежских А-гранитов и гранитоидов Сарматии (1–26%).

Сопоставляя результаты, полученные при использовании разных подходов, мы видим некоторые тенденции изменения соотношений как основных пороодообразующих оксидов, так индикаторных отношений редких и рассеянных элементов и спектров распределения нормированного к хондриту содержания РЗЭ в глинистых породах венда и нижнего кембрия от Западной Беларуси и Волыни к Московской синеклизе. Как и широко используемые в последние годы данные о U–Pb изотопном возрасте обломочного циркона, они допускают разные интерпретации, но, тем не менее, позволяют наметить некоторые ограничения, которые могут быть полезны при создании тех или иных палеогеографических моделей.

Так, соотношение в волынских аргиллитах Al_2O_3 и TiO_2 указывает на существенную роль в их составе (как в Волыни, так и в Западной и Восточной Беларуси) продуктов размыва магматических пород основного состава, вероятно принадлежавших Волыньско-Брестской КМП. Присутствие в песчаниках данного уровня значительной доли зерен обломочного циркона с возрастом 0.59–0.55 млрд лет (Paszkowski et al., 2019) подтверждает этот вывод. Вместе с тем песчаники волынского уровня содержат и циркон с максимумами на кривой относительной вероятности возрастов 1.8 и 1.5 млрд лет. Источниками их могли являться породы Свекофеннского орогена или Трансскандинавского пояса, а также граниты рапакиви северо-запада России и Прибалтики, в том числе Мазурский АМСГ-комплекс.

Аргиллиты редкинского уровня в Западной Беларуси и Волыни также содержат, по всей видимости, значительную долю продуктов разрушения пород основного состава. Однако в Восточной Беларуси и на востоке Балтийской моноклинали состав их определяется уже как результат размыва кислых и основных магматических пород в соотношении 3 : 1, а в Московской синеклизе доля кислых источников тонкой алюмосиликокластики, по всей видимости, еще выше. На сокращение вклада продуктов размыва основных магматических пород на этом уровне указывает и заметное уменьшение в обломочных породах содержания Са-плагиоклазов, пироксена, а также триоктаэдрических глинистых минералов и цеолитов (Paszkowski et al., 2019). Песчаники редкинского уровня в Западной Беларуси и Волыни содержат обломочный циркон с максимумами на кривой относительной вероятности возрастов 1.91–1.83, 1.7–1.47 млрд лет (Paszkowski et al., 2019). Источниками такого циркона могли выступать и породы Свекофеннского орогена, и Трансскандинавский пояс изверженных пород, и граниты рапакиви (Салминский,

Рижский массивы и др.), и Данополюнский ороген. На востоке Балтийской моноклинали источниками кластики для редкинских аргиллитов являлись, по всей видимости, архейские гранито-гнейсовые купола Балтийского щита, породы Свекофеннского орогена и Трансскандинавского пояса, граниты рапакиви и ассоциирующие с ними породы (Ивлева и др., 2016, 2018; Ershova et al., 2019).

В котлинское время доля основных источников сноса начинает снижаться и в Западной Беларуси и Волыни. Источниками кислой алюмосиликокластики для обломочных пород этого уровня, с учетом приведенных в публикации (Paszkowski et al., 2019) данных, могли являться Свекофеннский ороген, Трансскандинавский пояс, а также граниты рапакиви и ассоциирующие с ними породы (Рижский, Салминский батолиты и др.). На восток Балтийской моноклинали обломочный материал поступал примерно из этих же источников. Предполагается также, что к концу котлинского времени в область осадконакопления начинала поступать кластика и из Тимано-Печорского региона (Ивлева и др., 2016; Ershova et al., 2019), хотя с таким выводом согласны далеко не все (Francovschi et al., 2023).

В раннем кембрии, исходя из соотношения Al_2O_3 и TiO_2 в глинистых породах всех четырех регионов, вклад продуктов размыва основных магматических пород в их состав был минимальным. При этом источниками кислой алюмосиликокластики, если исходить только из литохимических характеристик, могли являться как породы Сарматии и Фенноскандии с возрастом 2.0–1.8 млрд лет, так и Трансскандинавский пояс изверженных пород, граниты рапакиви и ассоциирующие с ними породы разного возраста, гранитоиды Данополюнского орогена и кислые породы Волыньско-Брестской КМП. Однако столь широкий перечень источников кластики резко сужается, если учесть доминирование в песчаниках данного уровня обломочного циркона с возрастом ~1.49 млрд лет (Paszkowski et al., 2019). Циркон с таким возрастом мог попадать в осадки при размыве пород АМСГ-ассоциаций (?) и гранитоидов Данополюнского орогена.

Соотношение La, Sc, Th и Co в глинистых породах венда–раннего кембрия не столь контрастно. На диаграмме La/Sc–Th/Co подавляющее большинство фигуративных точек аргиллитов сосредоточено в области составов, образованных за счет размыва магматических пород кислого состава. Наиболее близки к аргиллитам по распределению указанных редких и рассеянных элементов породы Данополюнского орогена, а также палеопротерозойские (2.0–1.8 млрд лет) образования Сарматии и Фенноскандии. Могли участвовать в формировании аргиллитов и продукты размыва других метаморфических и магматических

пород фундамента ВЕП, но данные по распределению в них РЗЭ отсутствуют.

Характерное для глинистых пород венда—раннего кембрия всех рассматриваемых регионов соотношение Sr , Sc и Th показывает, что доля продуктов размыва магматических пород основного состава в аргиллитах волынского уровня Беларуси и Волыни составляет порядка 30–35%. В редкинских аргиллитах она максимальна в Западной Беларуси и Волыни (до 40–45%), снижаясь до 20–25% в Московской синеклизе. Котлинские аргиллиты в Западной Беларуси и Волыни содержат около 30–35% продуктов размыва основных магматических пород, а на востоке Балтийской моноклинали и в Московской синеклизе доля такой тонкой алюмосиликокластики несколько ниже (~20 и 20–25%). Несколько выше вклад основной алюмосиликокластики в состав нижнекембрийских аргиллитов также в Западной Беларуси и Волыни (до 40–45%), тогда как в глинистых породах востока Балтийской моноклинали и Московской синеклизы он остается примерно таким же, как и в позднем венде (20–25%).

Исходя из средних параметров спектров распределения нормированных на хондрит РЗЭ в аргиллитах Западной Беларуси и Волыни, Восточной Беларуси и Московской синеклизы, можно сделать вывод, что наибольший вклад продуктов размыва кислых магматических пород имел место при формировании осадочных последовательностей волынского и редкинского этапов Восточной Беларуси, для которых средние значения $(\text{La}/\text{Yb})_N$ составляют соответственно 13.1 ± 2.9 и 14.9 ± 3.7 , а параметры $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ равны 1.9 ± 0.3 и 1.9 ± 0.4 . Это позволяет думать, что источниками тонкой алюмосиликокластики для них являлись породы Сарматии и Фенноскандии, характеризующиеся высокими средними величинами $(\text{La}/\text{Yb})_N$ (14.5 ± 7.3 и 17.8 ± 16.8 соответственно) и выраженным деплетированием ТРЗЭ ($(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 2.3 \pm 0.7$ и 2.5 ± 1.3 соответственно). Тонкозернистые обломочные породы венда и нижнего кембрия Западной Беларуси и Волыни, котлинского региона Восточной Беларуси и редкинско-нижнекембрийского интервала Московской синеклизы обладают средними величинами $(\text{La}/\text{Yb})_N$ от 9.2 ± 0.6 до 11.9 ± 3.6 при отсутствии в большинстве случаев деплетирования ТРЗЭ. Это предполагает, что их формирование происходило либо при смешении кислой и основной алюмосиликокластики при преобладании первой, либо то, что источником основной массы кластики для них выступал Трансскандинавский пояс, усредненная (без учета объемных соотношений разных типов пород) РЗЭ систематика пород которого описывается, по имеющейся в нашем банке данных информации, следующими параметрами: $(\text{La}/\text{Yb})_N = 9.2 \pm 4.9$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.9 \pm 0.5$ и $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.81 \pm 0.40$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все сказанное выше ведет к довольно парадоксальному, но хорошо известному и ранее выводу: чем большим числом критериев мы оперируем, тем менее определенными становятся получаемые выводы. Так, если исследовать осадочные последовательности, не имеющие независимых указаний на природу и положение источников слагающего их обломочного материала, то с помощью литогеохимических подходов и методов можно более или менее определенно судить о том, какими породами (кислыми или основными) были сложены палеоводосборы. Добавление к этой информации сведений о возрастах популяций обломочного циркона, как это хорошо видно на примере рассматриваемых нами в настоящей работе толщ, существенно усложняет ситуацию, так как на тот или иной период времени источников циркона может быть несколько (например, гранитоиды Сарматии и Фенноскандии) и т.п. Разграничить такие источники на основе только литогеохимической информации или только данных о возрасте обломочного циркона очень сложно или практически невозможно. Это же можно сказать и о результатах, получаемых при расчетах вклада различных источников обломочного материала на основе процедуры линейного программирования. Тем не менее по всем обозначенным направлениям необходимо двигаться вперед, так как получаемые в итоге палеогеографические модели все больше похожи на те, что создаются на основе комплексного многоаспектного подхода для более молодых эпох, и это главный результат.

Благодарности. Авторы искренне признательны за помощь в подборе литературы К.А. Савко, А.В. Колесникову и Å. Johansson. Существенная техническая помощь была оказана авторам О.Ю. Мельничуком. Советы и замечания рецензентов А.А. Сорокина и А.Б. Котова во многом способствовали улучшению стиля представления материалов и выводов работы.

Источники финансирования. Исследования проведены в рамках госзадания ГИН РАН (тема FMMG-2023–0004, анализ фактического и литературного материала, сравнение с авторскими данными по Московской синеклизе и Балтийской моноклинали) и ИГГД РАН (тема FMUW-2021–0003, идея, подбор и анализ фактического материала, сопоставление с результатами других исследователей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аксаментова Н.А. Формации и палеогеодинамика раннепротерозойского Осницко-Микашевичского вулканоплутонического пояса // Літасфера. 1997. № 7. С. 59–72.

- Геология Беларуси. Отв. ред. Махнач А.С., Гарецкий Р.Г., Матвеев А.В. Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси, 2001. 815 с.
- Голубкова Е.Ю., Кузьменкова О.Ф., Кушим Е.А., Лапцевич А.Г., Манкевич С.С., Плоткина Ю.В. Распространение микрофоссилий в отложениях венда Оршанской впадины Восточно-Европейской платформы, Беларусь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2021. Т. 29. № 6. С. 24–38.
- Голубкова Е.Ю., Кузьменкова О.Ф., Лапцевич А.Г., Кушим Е.А., Воскобойникова Т.В., Силиванов М.О. Палеонтологическая характеристика верхневендских–нижнекембрийских отложений в разрезе скважины Северо-Полоцкая Восточно-Европейской платформы, Беларусь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2022. Т. 30. № 6. С. 3–20.
- 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.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000000 (третье поколение). Лист О-37 (Ярославль). Объяснительная записка. СПб.: МПР РФ, ФГУП “ВСЕГЕИ”, 2016. 356 с.
- Гранитоиды Украинского щита. Петрохимия, геохимия, рудоносность. Справочник. Отв. ред. Щербак Н.П. Киев: Наукова думка, 1993. 230 с.
- Граунов О.В., Подковыров В.Н., Ковач В.П., Котов А.Б., Великославинский С.Д., Сквитина Т.М., Адамская Е.В., Горовой В.А. Идентификация источников терригенных осадочных пород на основе геохимических данных с использованием модели линейного программирования // Докл. РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 509. № 2. С. 230–236.
- Ивлева А.С., Подковыров В.Н., Ершова В.Б., Анфинсон О., Худолей А.К., Федоров П.В., Маслов А.В., Здобин Д.Ю. Результаты U–Pb (LA ICP MS)-датирования обломочных цирконов из верхневендско-нижнекембрийских отложений востока Балтийской моноклизы // Докл. АН. 2016. Т. 468. № 4. С. 441–446.
- Ивлева А.С., Подковыров В.Н., Ершова В.Б., Хубанов В.Б., Худолей А.К., Сычев С.Н., Вдовина Н.И., Маслов А.В. U–Pb LA-ICP-MS-возраст обломочных цирконов из отложений нижнего рифея и верхнего венда Лужско-Ладожской моноклинали // Докл. АН. 2018. Т. 480. № 4. С. 439–443.
- Интерпретация геохимических данных. Отв. ред. Скляр Е.В. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.
- Коньшев А.А., Чевычелов В.Ю., Шаповалов Ю.Б. Два типа высокодифференцированных топазосодержащих гранитов Салминского батолита, Южная Карелия // Геохимия. 2020. Т. 65. № 1. С. 14–30.
- Котова Л.Н., Подковыров В.Н. Раннепротерозойские ортопороды в свежикарелидах пояса Саво, Западное Приладожье: геохимические возможности // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2014. Т. 22. № 5. С. 3–21.
- Кузьменко Ю.Т., Бурзин М.Б., Аксенов Е.М. Верхневендский осадочный бассейн Русской платформы: стратиграфия, история развития и районирование // Палеогеография венда–раннего палеозоя (ПВРП-96). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1996. С. 83–85.
- Кузьменкова О.Ф., Носова А.А., Шумлянский Л.В. Сравнение неопротерозойской Волыньско-Брестской магматической провинции с крупными провинциями континентальных платобазальтов мира, природа низко- и высокотитанистого базитового магматизма // Литасфера. 2010. Т. 33. № 2. С. 3–16.
- Ларин А.М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 2011. 402 с.
- Логвиненко Н.В. Петрография осадочных пород (с основами методики исследования). М.: Высшая школа, 1967. 416 с.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н. Категории водосборов-источников тонкой алюмосиликокластики для осадочных последовательностей венда северной и восточной частей Восточно-Европейской платформы // Литология и полезн. ископаемые. 2021. № 1. С. 3–27.
- Маслов А.В., Школьник С.И., Летникова Е.Ф., Вишневская И.А., Иванов А.В., Страховенко В.Д., Черкашина Т.Ю. Ограничения и возможности литогеохимических и изотопных методов при изучении осадочных толщ. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 2018. 383 с.
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н. Поздневендский котлинский кризис на Восточно-Европейской платформе: литогеохимические индикаторы среды осадконакопления // Литология и полезн. ископаемые. 2019. № 1. С. 2–30.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н. Геохимия глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия центральной части Московской синеклизы (некоторые традиционные и современные подходы) // Литология и полезн. ископаемые. 2023. № 4. С. 365–386.
- Махнач А.С., Веретенников Н.В. Венд Беларуси — один из приоритетных стратотипов вендской системы Восточно-Европейской платформы // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45. № 2. С. 123–126.
- Махнач А.С., Веретенников Н.В., Шкуратов В.И., Лапцевич А.Г., Пискун Л.В. Стратиграфическая схема вендских отложений Беларуси // Литасфера. 2005. № 1 (22). С. 36–43.
- Носова А.А., Кузьменкова О.Ф., Веретенников Н.В., Петрова Л.Г., Левский Л.К. Неопротерозойская Волыньско-Брестская магматическая провинция на западе Восточно-Европейского кратона: особенности внутриплитного магматизма в области древней шовной зоны // Петрология. 2008. Т. 16. № 2. С. 115–147.
- Палеогеография и литология венда и кембрия запада Восточно-Европейской платформы. Отв. ред. Келлер Б.М., Розанов А.Ю. М.: Наука, 1980. 118 с.

- Подковыров В.Н., Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Ершова В.Б. Литостратиграфия и геохимия отложений верхнего венда—нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2017. Т. 25. № 1. С. 3–23.
- Подковыров В.Н., Маслов А.В., Котова Л.Н. Литохимия глинистых пород верхнего венда—нижнего кембрия центральной части Московской синеклизы: общие особенности формирования // Геохимия. 2022. Т. 67. № 1. С. 19–36.
- Савко К.А., Самсонов А.В., Базиков Н.С., Ларионова Ю.О., Хиллер В.В., Вотяков С.Л., Скрябин В.Ю., Козлова Е.Н. Гранитоиды востока Воронежского кристаллического массива. Геохимия, Th—U—Pb возраст и петрогенезис // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2011. № 2. С. 98–115.
- Савко К.А., Самсонов А.В., Базиков Н.С., Козлова Е.Н. Палеопротерозойские гранитоиды Тим-Ястребовской структуры Воронежского кристаллического массива: геохимия, геохронология и источники расплавов // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2014. № 2. С. 56–78.
- Савко К.А., Самсонов А.В., Холин В.М., Базиков Н.С. Мегаблок Сарматия как осколок суперкратона Ваалбара: корреляция геологических событий на границе архея и палеопротерозоя // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2017. Т. 25. № 2. С. 3–26.
- Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н., Кориш Е.Х., Червяковская М.В., Базиков Н.С. Эпизоды роста континентальной коры в раннем докембрии Сарматии // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы LI Тектонического совещания. Т. 2. М.: ГЕОС, 2019. С. 270–273.
- Савко К.А., Кориш Е.Х., Базиков Н.С., Цыбуляев С.В., Червяковский В.С., Холина Н.В., Хуссейн И. Палеопротерозойские гранодиориты I-типа Луневского массива в Курском блоке Сарматии: U—Pb возраст, изотопная систематика и источники расплавов // Вестник ВГУ. Сер. Геология. 2021. № 4. С. 4–23.
- Свешников К.И., Деревская Е.И., Приходько В.Л., Косовский Я.А. Петрохимическая структура толщи ранневендских базальтоидов юго-запада Восточно-Европейской платформы // Вестник РУДН. Сер. Инженерные исследования. 2010. № 1. С. 77–84.
- Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси. Объяснительная записка. Минск: ГП “БелНИГРИ”, 2010. 282 с.
- Стратиграфия верхнедокембрийских и кембрийских отложений запада Восточно-Европейской платформы. Отв. ред. Келлер Б.М., Розанов А.Ю. М.: Наука, 1979. 236 с.
- Терентьев Р.А., Савко К.А., Самсонов А.В., Ларионов А.Н. Геохронология и геохимия кислых метавулканитов лосевской серии Воронежского кристаллического массива // Докл. АН. 2014. Т. 454. № 5. С. 575–578.
- Фролов В.Т. Литология. Кн. 2. М.: Изд-во МГУ, 1993. 432 с.
- Шумлянский Л.В. Геохимия пород Осницко-Микашевичского вулканоплутонического пояса Украинского щита // Геохимия. 2014. № 11. С. 972–985.
- Шумлянский Л.В., Кузьменкова О.Ф., Цымбал С.Н., Мельничук В.Г., Тараско И.В. Геохимия и изотопный состав Sr и Nd в интрузивных телах высокотитанистых долеритов Волыни // Мінералогічний журнал. 2011. Т. 33. № 2 (168). С. 72–82.
- Щипанский А.А., Самсонов А.В., Петрова А.Ю., Ларионова Ю.О. Геодинамика восточной окраины Сарматии в палеопротерозое // Геотектоника. 2007. № 1. С. 43–70.
- Юдович Я.Э., Кемприс М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
- Ahl M., Sundblad K., Schöberg H. Geology, geochemistry, age and geotectonic evolution of the Dala granitoids, central Sweden // Precambrian Res. 1999. V. 95. P. 147–166.
- Amelin Yu.V., Heaman L.M., Verchoglyad V.M., Skobelev V.M. Geochronological constraints on the emplacement history of the anorthosite—rapakivi granite suite: U—Pb zircon and baddeleyite study of the Korosten complex, Ukraine // Contrib. Mineral. Petrol. 1994. V. 116. P. 411–419.
- Bojanowski M.J., Goryl M., Kremer B., Marciniak-Maliszewska B., Marynowski L., Śröder J. Pedogenic siderites fossilizing Ediacaran soil microorganisms on the Baltica paleocontinent // Geology. 2020. V. 48. P. 62–66.
- Bojanowski M.J., Marciniak-Maliszewska B., Śröder J., Liivamägi S. Extensive non-marine depositional setting evidenced by carbonate minerals in the Ediacaran clastic series of the western East European Craton // Precambrian Res. 2021. V. 365. 106379.
- Braccialli L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins // Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry. Eds. Arribas J., Critelli S., Johnsson M.J. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 2007. V. 420. P. 73–93.
- Čečarys A., Bogdanova S., Janson C., Bibikova E., Kornfält K.-A. The Stenshuvud and Tåghusa granitoids: new representatives of Mesoproterozoic magmatism in southern Sweden // GFF. 2002. V. 124. № 3. P. 149–162.
- 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.
- 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, U.S.A. // Chem. Geol. 1995. V. 123. P. 107–131.
- Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies

- of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chem. Geol.* 2002. V. 191. P. 305–327.
- Derkowski A., Środoń J., Goryl M., Marynowski L., Szczërba M., Mazur S.* Long-distance fluid migration defines the diagenetic history of unique Ediacaran sediments in the East European Craton // *Basin Res.* 2021. V. 33. P. 570–593.
- Ershova V.B., Ivleva A.S., Podkovyrov V.N., Khudoley A.K., Fedorov P.V., Stockli D., Anfindon O., Maslov A.V., Khabanov V.* Detrital zircon record of the Mesoproterozoic to Lower Cambrian sequences of NW Russia: implications for the paleogeography of the Baltic interior // *GFF.* 2019. V. 141. № 3. P. 279–288.
- Francovschi I., Shumlyanskyy L., Soesoo A., Tarasko I., Melnychuk V., Hoffmann A., Kovalick A., Love G., Bekker A.* U–Pb geochronology of detrital zircon from the Ediacaran and Cambrian sedimentary successions of NE Estonia and Volyn region of Ukraine: implications for the provenance and comparison with other areas within Baltica // *Precambrian Res.* 2023. V. 392. 107087.
- Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments.* Ed. Lentz D.R. Geol. Ass. Canada. 2003. GeoText 4. 184 p.
- Goryl M., Marynowski L., Brocks J.J., Bobrovskiy I., Derkowski A.* Exceptional preservation of hopanoid and steroid biomarkers in Ediacaran sedimentary rocks of the East European Craton // *Precambrian Res.* 2018. V. 316. P. 38–47.
- Grimmer J.C., Hellström F.A., Greiling R.O.* Traces of the Transscandinavian Igneous Belt in the central Scandinavian Caledonides: U–Pb zircon dating and geochemistry of crystalline basement rocks in the Middle Allochthon // *GFF.* 2016. V. 138. P. 320–335.
- Jewuła K., Środoń J., Kędzior A., Paszkowski M., Liivamägi S., Goryl M.* Sedimentary, climatic, and provenance controls of mineral and chemical composition of the Ediacaran and Cambrian mudstones from the East European Craton // *Precambrian Res.* 2022. V. 381. 106850.
- Johansson Å., Waight T., Andersen T., Simonsen S.L.* Geochemistry and petrogenesis of Mesoproterozoic A-type granitoids from the Danish island of Bornholm, southern Fennoscandia // *Lithos.* 2016. V. 244. P. 94–108.
- Kara J., Väisänen M., Johansson Å., Lahaye Y., O'Brien H., Eklund O.* 1.90–1.88 Ga arc magmatism of central Fennoscandia: geochemistry, U–Pb geochronology, Sm–Nd and Lu–Hf isotope systematics of plutonic-volcanic rocks from southern Finland // *Geologica Acta.* 2018. V. 16. P. 1–23.
- Kirs J., Haapala I., Rämö O.T.* Anorogenic magmatic rocks in the Estonian crystalline basement // *Proc. Estonian Acad. Sci. Geol.* 2004. V. 53. P. 210–225.
- Konyshov A.* Natural experiment on the extraction and quenching of rapakivi-like magmas: traces of interaction with the mafic melts and their derivatives, Salmi Batholith (Karelia, Russia) // *Minerals.* 2023. V. 13. 527. <https://doi.org/10.3390/min13040527>
- Korneliussen A., Sawyer E.W.* The geochemistry of Lower Proterozoic mafic to felsic igneous rocks, Rombak Window, North Norway // *Nor. Geol. Unders. Bull.* 1989. V. 415. P. 7–21.
- Kuzmenkova O.F., Shumlyanskyy L.V., Nosova A.A., Voskoboinikova T.V., Grakovich I.Y.* Petrology and correlation of trap formations of the Vendian in the adjacent areas of Belarus and Ukraine // *Літацфера.* 2011. Т. 35. № 2. С. 3–11.
- Kuzmenkova O.F., Laptsevich A.G., Streltsova G.D., Minenkova T.M.* Riphean and Vendian of the conjugation zone of the Orsha depression and Zhlobin saddle (Bykhov parametric borehole) // *Проблемы геологии Беларуси и смежных территорий.* Минск: Строймедиапроект, 2018. С. 101–104.
- Liivamägi S., Środoń J., Bojanowski M.J., Gerdes A., Stanek J.J., Williams L., Szczërba M.* Paleosols on the Ediacaran basalts of the East European Craton: a unique record of paleoweathering with minimum diagenetic overprint // *Precambrian Res.* 2018. V. 316. P. 66–82.
- Liivamägi S., Środoń J., Bojanowski M.J., Stanek J.J., Roberts N.M.W.* Precambrian paleosols on the Great Unconformity of the East European Craton: an 800 million year record of Baltica's climatic conditions // *Precambrian Res.* 2021. V. 363. 106327
- Mansfeld J.* Geological, geochemical and geochronological evidence for a new Palaeoproterozoic terrane in southeastern Sweden // *Precambrian Res.* 1996. V. 77. P. 91–103.
- 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. Geochem. 1989. V. 21. № 1. P. 169–200.
- McLennan S.M., Fryer B.J., Young G.M.* The geochemistry of the carbonate-rich Espanola Formation (Huronian) with emphasis on the rare earth elements // *Can. J. Earth Sci.* 1979. V. 16. P. 230–239.
- McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B.* Geochemical and Nd–Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1990. V. 54. P. 2015–2050.
- McLennan S.M., Hemming S.R., 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. Pap. 1993. № 284. P. 21–40.
- Nolte N., Kleinhanns I.C., Baero W., Hansen B.T.* Petrography and whole-rock geochemical characteristics of Västervik granitoids to syenitoids, southeast Sweden: constraints on petrogenesis and tectonic setting at the southern margin of the Svecofennian domain // *GFF.* 2011. V. 133. P. 173–194.
- Obst K., Hammer J., Katzung G., Korich D.* The Mesoproterozoic basement in the southern Baltic Sea: insights from the G 14–1 off-shore borehole // *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.).* 2004. V. 93. P. 1–12.

- Paszkowski M., Budzyn B., Mazur S., Slama J., Shumlyanskyy L., Środoń J., Dhuime B., Kędzior A., Liivamägi S., Piszczowska A.* Detrital zircon U–Pb and Hf constraints on provenance and timing of deposition of the Mesoproterozoic to Cambrian sedimentary cover of the East European Craton, Belarus // *Precambrian Res.* 2019. V. 331. 105352.
- Paszkowski M., Budzyn B., Mazur S., Slama J., Środoń J., Millar I.L., Shumlyanskyy L., Kędzior A., Liivamägi S.* Detrital zircon U–Pb and Hf constraints on provenance and timing of deposition of the Mesoproterozoic to Cambrian sedimentary cover of the East European Craton, part II: Ukraine // *Precambrian Res.* 2021. V. 362. 106282.
- Poprawa P., Krzeminska E., Paczesna J., Armstrong R.* Geochronology of the Volyn volcanic complex at the western slope of the East European Craton — relevance to the Neoproterozoic rifting and the break-up of Rodinia/Pannotia // *Precambrian Res.* 2020. V. 346. 105817.
- Rollinson H.R.* Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex: London Group UK Ltd., 1994. 352 p.
- Rozanov A.Y., Łydka K.* (Eds.). Palaeogeography and Lithology of the Vendian and Cambrian of the Western East-European Platform. Warsaw: Wydawnictwa Geologiczne, 1987. 114 p.
- Rutanen H., Andersson U.B.* Mafic plutonic rocks in a continental-arc setting: geochemistry of 1.87–1.78 Ga rocks from south-central Sweden and models of their palaeotectonic setting // *Geol. J.* 2009. V. 44. P. 241–279.
- Salin E., Sundblad K., Woodard J., O'Brien H.* The extension of the Transscandinavian Igneous Belt into the Baltic Sea Region // *Precambrian Res.* 2019. V. 328. P. 287–308.
- Savko K.A., Samsonov A.V., Kotov A.B., Salnikova E.B., Korish E.H., Larionov A.N., Anisimova I.V., Bazikov N.S.* The Early Precambrian metamorphic events in Eastern Sarmatia // *Precambrian Res.* 2018. V. 311. P. 1–23.
- Shumlyanskyy L., Hawkesworth C., Dhuime B., Billström K., Claesson S., Storey C.* ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb ages and Hf isotope composition of zircons from sedimentary rocks of the Ukrainian shield: crustal growth of the south-western part of East European craton from Archaean to Neoproterozoic // *Precambrian Res.* 2015. V. 260. P. 39–54.
- Shumlyanskyy L.V., Nosova A., Billström K., Soderlund U., Andreasson P.G., Kuzmenkova O.* The U–Pb zircon and baddeleyite ages of the Neoproterozoic Volyn Large Igneous Province: implication for the age of the magmatism and the nature of a crustal contaminant // *GFF.* 2016. V. 138. P. 17–30.
- Skrídlaitė G., Whitehouse M., Rimsa A.* Evidence for a pulse of 1.45 Ga anorthosite–mangerite–charnockite–granite (AMCG) plutonism in Lithuania: implications for the Mesoproterozoic evolution of the East European Craton // *Terra Nova.* 2007. V. 19. P. 294–301.
- Środoń J., Kuzmenkova O.F., Stanek J.J., Petit S., Beaufort D., Albert Gilg H., Liivamägi S., Goryl M., Marynowski L., Szczepa M.* Hydrothermal alteration of the Ediacaran Volyn-Brest volcanics on the western margin of the East European Craton // *Precambrian Res.* 2019. V. 325. P. 217–235.
- Środoń J., Gerdes A., Kramers J., Bojanowski M.* Age constraints of the Sturtian glaciation on western Baltica based on U–Pb and Ar–Ar dating of the Lapichi Svita // *Precambrian Res.* 2022. V. 371. 106595.
- Środoń J., Condon D.J., Golubkova E., Millar I.L., Kuzmenkova O., Paszkowski M., Mazur S., Kędzior A., Drygant D., Ciobotaru V., Liivamägi S.* Ages of the Ediacaran Volyn-Brest trap volcanism, glaciations, paleosols, Podillya Ediacaran soft-bodied organisms, and the Redkino-Kotlin boundary (East European Craton) constrained by zircon single grain U–Pb dating // *Precambrian Res.* 2023. V. 386. 106962.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.
- Väisänen M., Johansson Å., Andersson U.B., Eklund O., Hölttä P.* Palaeoproterozoic adakite- and TTG-like magmatism in the Svecofennian orogen, SW Finland // *Geologica Acta.* 2012. V. 10. P. 351–371.
- Wiszniewska J., Claesson S., Stein H., Vander Auwera J., Duchesne J.-C.* The north-eastern Polish anorthosite massifs: petrological, geochemical and isotopic evidence for a crustal derivation // *Terra Nova.* 2002. V. 14. P. 451–460.

Рецензенты

А. Б. Котов, А. А. Сорокин

Sources of Fine-Grained Aluminosiliciclastics for the Vendian and Early Cambrian Deposits of the Western Part of the East European Platform: Some Lithogeochemical Constraints

A. V. Maslov^{a, #}, V. N. Podkovyrov^{b, ##}, and **O. V. Graunov**^b

^a *Geological Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b *Institute of Precambrian Geology and Geochronology of Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: amas2004@mail.ru*

^{##}*e-mail: vpodk@mail.ru*

The article analyzes the lithogeochemical features (content and distribution of the main rock-forming oxides, as well as a number of the trace elements) of clay rocks of the Volyn, Redkino, Kotlin and Lower Cambrian stratigraphic levels of the west part of the East European Platform (Belarus and Volyn, east part of the Baltic monocline, Moscow syncline). Usage (1) various lithogeochemical approaches and methods; (2) data on the U–Pb isotopic age of detrital zircon populations present in mudstone-associated sandstones; (3) the geochemical features of the supposed source rocks of fine-grained aluminosiliciclastics (magmatic associations of different composition and age in Sarmatia and Fennoscandia) made it possible to express considerations about their possible contribution to the formation of the Vendian and the Early Cambrian clay rocks.

Keywords: western part of the East European Platform, reconstruction of the composition of source rocks of fine-grained aluminosiliciclastics, transitional deposits from Precambrian to Cambrian