

УДК 551

ЛИТОГЕОХИМИЯ ВЕРХНЕДОКЕМБРИЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ БЕЛАРУСИ. СООБЩЕНИЕ 1. ВАЛОВЫЙ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ, ОБЩИЕ ЧЕРТЫ И АНОМАЛИИ

© 2024 г. А. В. Маслов^{а, *}, О. Ю. Мельничук^б, А. Б. Кузнецов^с, В. Н. Подковыров^с

^аГеологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^бИнститут геологии и геохимии УрО РАН,
ул. Акад. Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620110 Россия

^сИнститут геологии и геохронологии докембрия РАН,
наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: amas2004@mail.ru

Поступила в редакцию 09.01.2024 г.

После доработки 07.02.2024 г.

Принята к публикации 15.02.2024 г.

Первая из двух публикаций посвящена исследованию литогеохимических характеристик пилотной коллекции образцов песчаников и алевролитов верхнего докембрия Беларуси, отобранных из четырех скважин: Богушевская 1, Быховская, Лепель 1 и Кормянская. В этой статье проанализированы общие особенности их химического состава, а также показаны возможности и ограничения для дальнейших реконструкций. Установлено, что входящие в пилотную коллекцию рифейские и вендские породы, визуально определенные как песчаники, являются собственно кварцевыми, полевошпатово-кварцевыми и аркозовыми разновидностями с различными типами цемента. Вендские “алевролиты” по своим геохимическим характеристикам отвечают крупно- и мелкозернистым алевролитам и в большей степени аргиллитам с преобладанием иллита, а также различной примесью бертьерина, каолинита и смектита. При сравнении величин обогащения (EF) этих пород редкими и рассеянными элементами, выявлен ряд отличий, обусловленных как вариациями в составе пород питающих областей, так и изменениями обстановок осадконакопления. Положение фигуративных точек изученных образцов на диаграмме Zr/Sc–Th/Sc позволяет считать, что в составе всех рифейских и вендских пород преобладает материал первого седиментационного цикла. Это предполагает, что литогеохимические характеристики пород пилотной коллекции достаточно корректно отражают аналогичные особенности комплексов пород питающих провинций и могут быть использованы для реконструкции палеогеодинамических и палеоклиматических факторов, контролировавших накопление осадочных последовательностей рифея и венда Беларуси.

Ключевые слова: рифей, венд, песчаники, алевролиты, глинистые породы, литогеохимические характеристики, Восточно-Европейская платформа, Беларусь

DOI: 10.31857/S0024497X24040011, EDN: ZOXPWS

Широко распространенные на западе Восточно-Европейской платформы (ВЕП) в пределах Республики Беларусь верхнедокембрийские осадочные последовательности принадлежат и рифею, и венду [Махнач, 1966; Махнач и др., 1975 и др.; Геология ..., 2001; Стратиграфические ..., 2010; Kuzmenkova et al., 2018; Кузьменкова и др., 2019а, 2019б; Лапцевич и др., 2023; Стрельцова и др., 2023]. Рифей Беларуси, как и в стратотипическом разрезе на Южном Урале, разделен на три

эратемы – нижне-, средне- и верхнерифейскую. Его породы несогласно, с крупным стратиграфическим перерывом залегают на кристаллическом фундаменте ВЕП. Также несогласно они перекрыты покровно-ледниковой формацией вильчанской серии, а в случае отсутствия последней – вулканогенными и вулканогенно-осадочными образованиями волынской серии венда.

К нижнему рифею здесь отнесена бобруйская серия, предположительно среднерифейский

возраст имеет шеровичская серия, а белорусская серия рассматривается как средне-верхнерифейский стратон [Стратиграфические ..., 2010]. Накопление указанных стратонов, как и осадочных серий венда, происходило в ряде последовательно сменявших друг друга крупных палеоструктур [Махнач и др., 1976; Геология ..., 2001; Kuzmenkova et al., 2018; Кузьменкова и др., 2019а, 2019б; Стрельцова и др., 2023] – Воыно-Оршанском палеопрогрбе/палеоавлакогене (шеровичская, белорусская и вильчанская серии), Воыноско-Брестской крупной магматической провинции (КМП) и Кобринско-Могилевском (воыноская серия), а также Кобринско-Полюцком палеопрогрбе (валдайская серия).

При оценке представляемого нами материала и сделанных на основе его анализа выводов следует иметь в виду, что геохимические исследования осадочных, в том числе верхнедокембрийских, образований Беларуси имеют богатую и многолетнюю историю [Бордон, 1977 и др.; Махнач и др., 1982 и др.; Юдович, 2007; Kuzmenkova et al., 2018 и ссылки там]. Не останавливаясь на ней подробно, отметим только, что по данным, приведенным в монографии [Бордон, 1977], песчано-алевритовые, глинистые и тиллитоподобные породы глусской свиты нижнего венда обладают низким фоновым содержанием (ниже кларка) редких и рассеянных элементов. Распределение последних имеет пестрый характер, что указывает на преобладание в областях питания физического выветривания. Области сноса глусского времени были сложены породами кислого и, возможно, среднего состава. Песчано-алевритовые породы котлинской свиты верхнего венда обладают более высоким, чем кларк, содержанием Ti, Ga, Y и Ba. Распределение микроэлементов соответствует переходному подтипу пестрого типа Н.М. Страхова и, следовательно, в областях питания имело место не только физическое, но и химическое выветривание.

Настоящая и следующая за ней публикация в какой-то мере дополняют и расширяют сделанные ранее белорусскими коллегами выводы. Эти работы посвящены результатам исследований литогеохимических характеристик пилотной коллекции образцов песчаников и тонкозернистых обломочных пород (мелкозернистых глинистых алевритов и глинистых пород), отобранных из разрезов белорусской, вильчанской, воыноской и валдайской серий верхнего докембрия Беларуси. В них детализированы и в существенной степени расширены выводы о составе

и эволюции пород источников тонкой алюмосиликокластики, полученные нами [Maslov et al., 2024] при анализе базы аналитических данных для терригенных пород (аргиллитов) воыноского, редкинского и котлинского регионов, а также нижнего кембрия Беларуси и Воыны, приведенной в публикации [Jewula et al., 2022]. Дополнительно в этих работах рассмотрены палеогеодинамические, палеоклиматические и палеогеографические обстановки формирования ряда осадочных толщ рифея и венда.

ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ И СОСТАВ ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ РИФЕЯ И ВЕНДА

В данном разделе описаны в основном только те литостратиграфические подразделения белорусской, вильчанской, воыноской и валдайской серий, представленные на территории Беларуси, из которых были отобраны образцы песчаников и алевритов (рис. 1). Белорусская серия объединяет рогачевскую, руднянскую и стратиграфический аналог последней – пинскую, а также оршанскую свиты. Возраст всех перечисленных литостратиграфических единиц считается среднерифейским [Стратиграфические ..., 2010; Кузьменкова и др., 2019а, 2019б; Стрельцова и др., 2023]. В соответствии с недавней публикацией о возрасте обломочного циркона, накопление оршанской и пинской свит происходило 1.32–1.00 млрд лет назад [Paszowski et al., 2019]. Завершающая разрез данной серии лапичская свита принадлежит верхнему рифею. Возраст ее, по данным Я. Шродона с соавторами [Srodon et al., 2022], составляет ~710 млн лет.

Рогачевская свита (мощность 40 м) сложена аркозовыми мелко-, средне- и разнозернистыми песчаниками. Она залегает на породах кристаллического фундамента, а местами на песчаниках бортниковской свиты шеровичской серии среднего? рифея [Геология ..., 2001; Стратиграфические ..., 2010; Кузьменкова и др., 2019а; Стрельцова и др., 2023]. Руднянская свита (300 м) представлена в основном олигомиктовыми, а в верхней части – почти чисто кварцевыми красноцветными песчаниками; среди них наблюдаются редкие прослои и частые “катуны” алевритов и глин. В нижней части свиты (на протяжении 10–25 м от подошвы) можно видеть интервалы переслаивания варьирующих по гранулометрическому составу полевошпатово-кварцевых песчаников, в том числе грубозернистых с гравием и галькой, а непосредственно у подошвы наблюдается базальный конгломерат или глинистая брекчия [Геология ..., 2001].

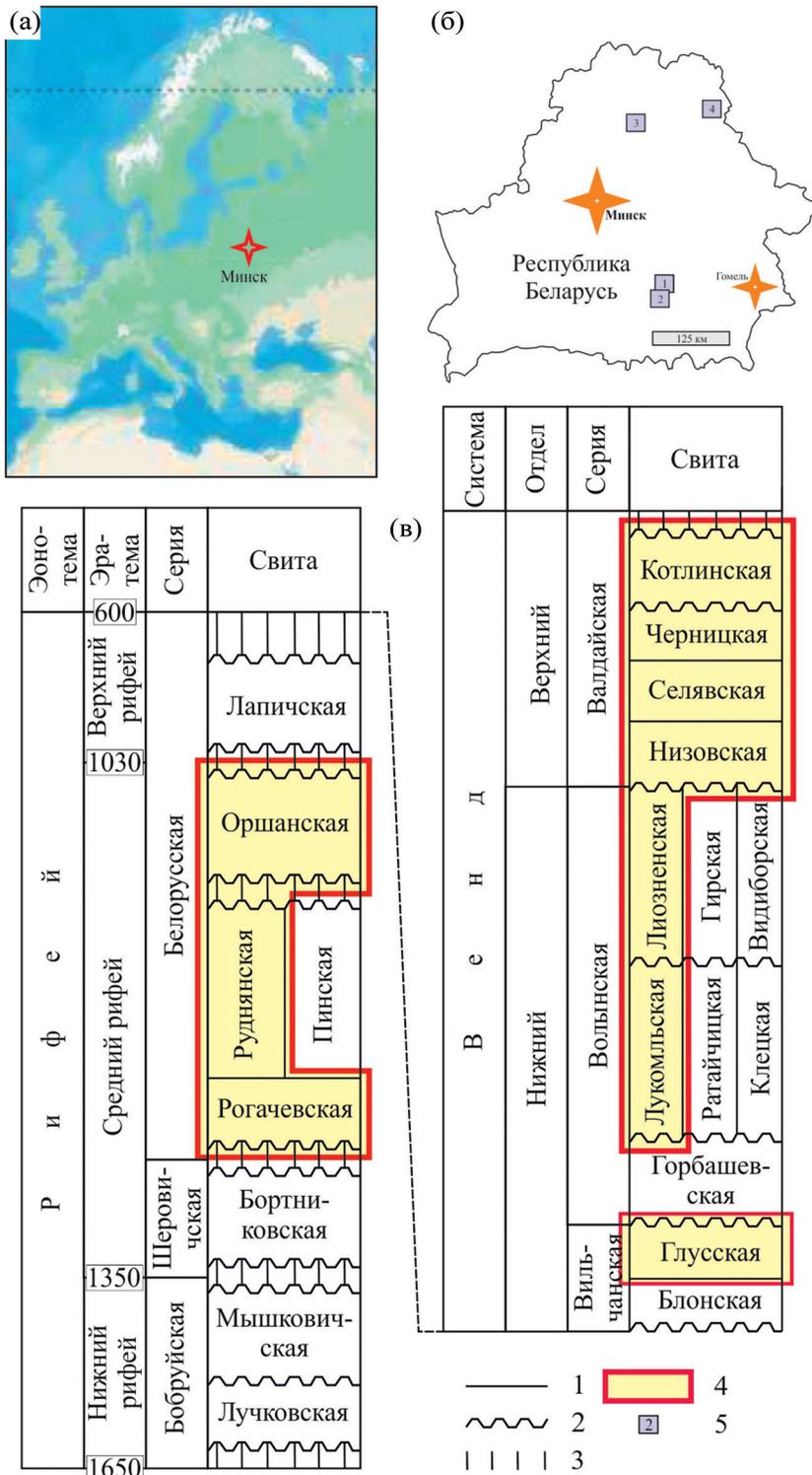


Рис. 1. Схема расположения исследованных скважин (а) и сводная стратиграфическая колонка верхнего докембрия Беларуси (б), по [Стратиграфические ..., 2010] с упрощениями. Географическая основа заимствована с сайта <https://yandex.ru/maps/?ll=166.992700%2C21.912809&z=2>.

1–3 – соотношения между стратонами (1 – согласные, 2 – несогласные, 3 – доказанные стратиграфические перерывы); 4 – опробованные интервалы разреза; 5 – скважины (1 – Быховская, 2 – Кормянская, 3 – Лепель 1, 4 – Богушевская 1). Возраст границ крупных стратиграфических подразделений (в млн лет) показан в соответствии с публикацией [Стратиграфические ..., 2010].

Пинская свита (мощность до 460 м) объединяет красноцветные олигомиктовые и мезомиктовые алевритистые песчаники и песчанистые алевролиты. По всему разрезу свиты присутствуют тонкие прослои аргиллитов и несколько маломощных (от первых метров до 5–10 м) пачек переслаивания тонкослоистых алевритово-глинистых пород и песчаников. В прослоях глинистых разностей здесь можно видеть трещины усыхания. Оршанская свита (до 620 м) практически полностью сложена красноцветными мелко- и среднезернистыми олигомиктовыми и кварцевыми песчаниками. В основании свиты (на протяжении 7–10 м от подошвы) на породах подстилающей руднянской свиты залегает гравийно-галечный конгломерат [Геология ..., 2001]. По периферии одноименной впадины оршанская свита залегает на коре выветривания по породам кристаллического фундамента. Лапичская свита (до 82 м) несогласно залегает на красноцветных песчаниках и аргиллитах пинской или, реже, оршанской свит и с размывом перекрыта вильчанской серией. Свита объединяет строматолитовые и катаграфиевые доломиты с примесью песчано-алевритового и железисто-глинистого материала, песчаники с глинисто-доломитовым цементом, глинистые и песчанистые алевролиты, а также полимиктовые конгломераты, конглобрекции и доломитовые брекчии [Геология ..., 2001; Srodon et al., 2022; Стрельцова и др., 2023]. Опубликованный недавно U–Th–Pb возраст детритового циркона из песчаников бортниковской и руднянской свит в Волыно-Оршанском прогибе показал, что накопление их произошло не позднее 1 млрд лет назад [Зайцева и др., 2023]. Таким образом, возраст шеровичской и белорусской серий, который ранее считался среднерифейским, в настоящее время определяется как позднерифейский.

Новые сведения о петрографии и геохимии литостратиграфических единиц рифея и венда Беларуси получены при изучении образцов руднянской, оршанской и глусской свит, вскрытых в 2017 г. параметрической скважиной Быховская в зоне сочленения Оршанской впадины и Жлобинской седловины [Kuzmenkova et al., 2018]. В руднянской свите в скважине Быховская преобладают полимиктовые песчаники с плохо сортированным и плохо окатанными обломками кварца, полевого шпата, кварцита, гранита с гидрослюдой, монтмориллонитом, гематитом и реже каолинитом, а в верхней части появляются олигомиктовые песчаники. При этом гидролизатный модуль (ГМ) в полимиктовых песчаниках руднянской свиты составляет 0.32–0.13,

а в олигомиктовых он равен 0.06 [Kuzmenkova et al., 2018]. Оршанская свита сложена почти мономинеральными кварцевыми песчаниками с ГМ = 0.07. Разрез глусской свиты венда в скважине Быховская представлен моренными отложениями красных тиллитов преимущественно песчаной размерности, с включениями гальки и валунов кварцитов (ГМ = 0.11), флювиогляциальными отложениями с олигомиктовыми кварцевыми песками и песчаниками разной степени сортировки (ГМ = 0.04–0.19), и озерно-ледниковыми отложениями ленточных каолинит-гидрослюдистых глин сургучно-коричневого цвета (ГМ = 0.58). Сходный минеральный и химический состав песчаников и тиллитов глусской свиты и нижележащих песчаников руднянской и оршанской свит свидетельствует о значительной степени ассимиляции рифейских отложений вендским ледником [Kuzmenkova et al., 2018].

Вильчанская серия венда расчленяется на блонскую и глусскую свиты. Блонская свита (мощность 245 м) представлена в основном мелкозернистыми полевошпатово-кварцевыми песчаниками с небольшим количеством обломков гранитоидов, песчаников и песчано-доломитовых пород. Встречаются в ее разрезах также прослои глинистых пород и валунно-галечные конгломераты [Геология..., 2001]. Глусская свита (483 м) сложена тиллитами, олигомиктовыми песчаниками, алевролитами, алеврито-глинистыми и глинистыми породами. Последние иногда характеризуются ленточной слоистостью и содержат мегакласты (гальки, гравий, песчано-гравийные скопления).

Волинская серия включает горбашевскую, ратайчицкую, клецкую, лукомльскую, гирскую, викиборскую и лиозненскую свиты. Горбашевская свита (30 м) – это крупнозернистые и разномзернистые аркозовые песчаники с прослоями алевролитов. Ратайчицкая свита (340 м) сложена базальтами, долеритобазальтами, их лавобрекчиями и туфами; в ее разрезах есть также андезидациты, дациты и трахириодациты [Махнач и др., 1976; Геология ..., 2001 и др.]. Клецкая свита (177 м) представлена туфами (псаммитовыми, алевритовыми и глинисто-алевритовыми), туффитами, туфопесчаниками и туфоалевролитами. Лукомльская свита (80 м) объединяет туфогенные и туфогенно-осадочные породы – туффиты, туфогенные и/или вулканомиктово-аркозовые песчаники и алевролиты, а также гравелиты. Ратайчицкая, клецкая и лукомльская свиты рассматриваются как разнофациальные стратиграфические аналоги [Стратиграфические ..., 2010]. Гирская

свита (110 м) сложена красноцветными крупно- и разнозернистыми аркозовыми и вулканомиктовыми песчаниками, гравелитами, гравийно-галечниковыми конгломератами, песчанистыми и глинистыми алевролитами. Видиборская свита (до 70 м) объединяет вулканомиктовые и полимиктовые песчаники, глинистые алевролиты и глины [Махнач и др., 1976; Геология ..., 2001]. Лиозненская свита (50 м) представлена вулканомиктовыми и аркозовыми разнозернистыми, преимущественно крупнозернистыми песчаниками с прослоями алевролитов. Породы содержат глауконит. Лиозненская, гирская и видиборская свиты считаются стратиграфическими аналогами [Стратиграфические ..., 2010].

Валдайская серия объединяет низовскую, селявскую, черницкую и котлинскую свиты. Первые три свиты принадлежат редкинскому, а последняя отвечает котлинскому региоярусам венда. Низовская свита (47 м) представлена в основном крупно- и среднезернистыми вулканомиктовыми песчаниками и алевролитами [Геология ..., 2001; Стратиграфические ..., 2010; Лапцевич и др., 2023]. Селявская свита (57 м) сложена слюдистыми алевролитами и алевритистыми аргиллитами. В нижней ее части, по данным авторов работы [Голубкова и др., 2022], присутствуют прослойки мелкозернистых слюдистых аркозовых песчаников. Черницкая свита (64 м) представлена преимущественно глинами и слюдистыми алевролитами, среди которых в нижней части можно видеть алевролиты и разнозернистые аркозовые песчаники. Для пород данного стратиграфического уровня довольно характерен пирит [Голубкова и др., 2022]. Котлинская свита (до 220 м) объединяет в различных сочетаниях аркозовые (а в верхней части свиты – кварцевые и полевошпатово-кварцевые) разнозернистые песчаники, аргиллиты и их алевритистые разновидности, слюдистые алевролиты, сидериты и аргиллиты с глауконитом.

По приведенным в публикации [Jewula et al., 2022] данным, тонкозернистые обломочные породы волынского уровня западной части Беларуси, где расположены скважины Кормянская и Быховская, и Волыни характеризуются средним содержанием кварца $\sim 14.0 \pm 8.0$ мас. %. Вверх по разрезу эта величина растет и в аргиллитах котлинской свиты составляет ~ 30.0 мас. % (здесь и далее приведены результаты определения количественного минерального состава глинистых пород с использованием рентгенограмм валовых образцов). Количество калиевого полевого шпата (КПШ) примерно постоянно

(волынский уровень – 11.0 ± 7.0 , редкинский – 17.0 ± 7.0 , котлинский – 14.0 ± 9.0 мас. %). Среднее содержание плагиоклаза вверх по разрезу снижается от ~ 6.0 (волынский уровень) до 0.2 мас. % (котлинский стратиграфический уровень). Среднее содержание иллита $1M_d$ в тонкозернистых обломочных породах волынского стратиграфического уровня составляет 15.0 ± 9.0 , редкинского – 19.0 ± 10.0 и котлинского – 13.0 ± 9.0 мас. %. Среднее содержание различных разновидностей смектита максимально в глинистых породах волынского уровня (20.0 ± 18.0 мас. %), а в таких же по гранулометрическому составу породах котлинского региояруса составляет 6.0 ± 7.0 мас. %. Количество каолинита не испытывает снизу вверх по разрезу каких-либо существенных вариаций. В породах волынского уровня его среднее количество равно 10.0 мас. %, в породах редкинского региояруса составляет около 18.0, а котлинского ~ 15.0 мас. %. Следует подчеркнуть, что каолинит, иллит и смектиты от образца к образцу могут как отсутствовать, так и преобладать среди глинистых минералов, имея содержания до 35.0–40.0 мас. % (иллит и каолинит), реже – 65.0 мас. % (смектиты). В породах также может присутствовать хлорит – в среднем от 1.0 ± 2.0 (котлинский уровень) до 3.0 ± 3.7 мас. % (волынский уровень). Его максимальное количество в образце не превышает 10.0 мас. %. Еще одна интересная особенность рассматриваемых тонкозернистых пород – присутствие в них аутигенного бертьерина (редкинский и котлинский региоярус), формирование которого связано с преобразованием каолинита. Среднее содержание бертьерина составляет (3.0 ± 4.0) – (4.0 ± 6) мас. %, при этом в некоторых образцах количество его может достигать 25.0 мас. %. Общее количество глинистых компонентов в тонкозернистых обломочных породах названного региона варьирует от 37.0 (котлин) до 44.0 мас. % (редкино).

Для Восточной Беларуси (здесь расположены скважины Лепель 1 и Богушевская) ситуация несколько иная. Содержание иллита $1M_d$ в тонкозернистых обломочных породах и волынского-котлинского интервала составляет в среднем 12.0–13.0 мас. %. Количество смектита разных типов в породах волынского уровня составляет в среднем немногим более 13.0 мас. %, а выше по разрезу – 9.0 (редкино) и 11.0 (котлин) мас. %. С учетом погрешностей можно считать, что это статистически сопоставимые величины. Напротив, среднее содержание каолинита в глинистых породах волынского уровня всего 10.0 ± 7.0 мас. %.

В породах редкинского региояруса оно возрастает до 18.0 ± 5.0 мас. %; примерно столько же каолинита и в породах котлина — 17.0 ± 7.0 мас. % [Jewula et al., 2022]. Наибольшее среднее содержание глинистых компонентов характерно для тонкозернистых обломочных пород соответственно редкинского и котлинского уровней (46.0 ± 15.0 и 45.0 ± 16.0 мас. %). В породах волинской серии количество их несколько ниже (39.0 ± 16.0 мас. %). При этом особенности распределения иллита, каолинита, хлорита и смектита от образца к образцу схожи с таковым для глинистых пород Западной Беларуси и Волыни. Бертьерин в глинистых породах венда этого региона встречается на всех рассматриваемых нами стратиграфических уровнях, его в среднем несколько больше, чем в аналогичных образованиях западной части Беларуси и Волыни ($5.0-6.4 \pm 5.0-7.0$ мас. %), максимальные содержания также незначительно выше (до 28.0 мас. % в аргиллитах котлинского уровня). Помимо перечисленных минералов в тонкозернистых обломочных породах волинской и валдайской серий венда Беларуси и Волыни встречаются гетит, гематит, пирит и сульфаты, сидерит, апатит и карбонатные минералы.

ОБСТАНОВКИ НАКОПЛЕНИЯ ОСАДОЧНЫХ ТОЛЩ РИФЕЯ И ВЕНДА

Рогачевская и руднянская свиты представлены, по данным [Kuzmenkova et al., 2018; Кузьменкова и др., 2019а, 2019б и ссылки там], отложениями мелководного эпиконтинентального в той или иной мере опресненного бассейна. Оршанская свита отражает этап накопления осадков в обстановках замкнутого мелководного внутриконтинентального с невысокой соленостью водоема. Основываясь на данных, приведенных в работах [Палеогеография ..., 1980; Голубкова и др., 2022; Jewula et al., 2022], можно сделать вывод, что формирование отложений венда на рассматриваемой территории происходило в основном в аллювиальных конусах, русловых и пойменных зонах, а также в прибрежных, в том числе лагунных, и мелководно-морских обстановках [Kuzmenkova et al., 2018; Лапцевич и др., 2023]. Осадки перечисленных обстановок в большинстве случаев могут в той или иной мере наследовать т.н. “провенанс-сигнал” — распределение ряда слаборастворимых в воде редких и рассеянных элементов (Th, La, Sc, Co, Cr, V и др.), а также их отношений, существовавшие в породах источников сноса [Taylor, McLennan, 1985; McLennan, 1989; McLennan et al., 1990,

1993; Интерпретация ..., 2001; Geochemistry ..., 2003; и др.]. Наиболее свойственно это тонкозернистым обломочным образованиям, содержащим значительную долю глинистого компонента.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Для исследования литогеохимии песчаников и алевролитов рифея (рогачевская, руднянская и оршанская свиты) и венда (глусская, лукомльская, лиозненская, низовская, селявская, черницкая и котлинская свиты) использована коллекция из 54 образцов, отобранных в ходе совместных работ ИГГД РАН с “НПЦ по геологии” (г. Минск) в скважинах Богушевская 1, Быховская, Лепель 1 и Кормянская. Первая из указанных скважин расположена на юге Витебской области в 30–40 км к югу от г. Витебска вблизи одноименного поселка. Скважина Быховская пробурена на границе Гомельской и Могилевской областей примерно в 100 км к северу от г. Гомеля. Скважина Лепель 1 находится на западе Витебской области в 90–100 км к западу от г. Витебска. Скважина Кормянская расположена на севере Гомельской области в 70–80 км к северу от г. Гомеля вблизи пос. Корма. Подробное литологическое описание и палеонтологическую характеристику свит венда, представленных в ряде указанных скважин, можно найти в работах [Kuzmenkova et al., 2018; Голубкова и др., 2021; Лапцевич и др., 2023; Стрельцова и др., 2023]. Собранная коллекция охватывает все стратиграфические уровни и основные литотипы в отложениях рифея и венда, вскрытых названными скважинами. Однако общее количество образцов в нашей коллекции, с учетом нескольких индивидуальных литостратиграфических подразделений (свит), пока не выглядит статистически представительным. Тем не менее, мы считаем приводимые далее выводы, полученные по результатам пилотного проекта, достаточно корректными.

Определение содержания в песчаниках и алевролитах основных порообразующих оксидов выполнено рентгеноспектральным флуоресцентным методом с помощью рентгеновского спектрометра ARL 9800 (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). Нижние пределы определения при этом составили для SiO_2 — 0.02, для TiO_2 — 0.01, Al_2O_3 — 0.05, Fe_2O_3^* (= $\text{FeO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) — 0.01, MnO — 0.01, MgO и CaO — 0.1 и 0.01, Na_2O и K_2O — 0.1 и 0.01 мас. %.

Содержание редких и рассеянных элементов установлено с использованием квадрупольного

Таблица 1. Содержание основных породообразующих оксидов (мас. %), значения литохимических модулей в представительных образцах песчаников (П) и алевролитов (А) верхнего докембрия Беларуси

Компоненты	Скважина																				
	Кормянская							Быховская													
	Рогачевская							Руднянская													
	Оршанская							Глусская													
	Порода							Порода													
	Префикс							Префикс													
	П	П	П	А	П	А	П	П	П	А	П	А	П	П	П	А	П	А			
	Км-							Вh-							Вh-						
	№ образца							№ образца							№ образца						
SiO ₂	648	662	350	716	735	758	893	1489	1547	706	383	460	611	691	760	772					
	96.90	98.50	92.60	79.50	81.10	84.00	98.30	93.90	87.80	82.40	60.90	88.70	63.30	96.80	55.30	56.70					
TiO ₂	0.01	0.01	0.28	0.04	0.09	0.01	0.01	0.19	0.38	0.11	0.96	0.26	0.86	0.01	1.59	1.71					
Al ₂ O ₃	1.13	0.33	2.50	10.70	11.00	8.35	0.13	2.50	4.00	9.98	14.50	5.09	13.70	1.16	15.20	16.70					
Fe ₂ O ₃ *	0.38	0.26	0.83	0.76	0.59	0.33	0.29	0.98	2.39	0.73	8.90	0.79	9.29	0.20	11.50	10.00					
MnO	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.98	0.01	0.05	0.01	0.10	0.03					
MgO	0.10	0.10	0.10	0.10	0.43	0.10	0.10	0.10	0.35	0.10	2.15	0.39	1.74	0.10	3.46	2.54					
CaO	0.19	0.17	0.16	0.12	0.14	0.15	0.18	0.11	0.28	0.10	0.47	0.26	0.40	0.13	1.25	0.64					
Na ₂ O	0.09	0.09	0.09	0.08	0.10	0.10	0.10	0.09	0.09	0.09	0.26	0.09	0.20	0.10	1.03	1.00					
K ₂ O	0.64	0.42	2.30	5.39	4.07	5.31	0.01	0.06	2.45	4.29	5.71	2.59	5.82	0.82	4.33	5.06					
P ₂ O ₅	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.15	<0.05	0.14	<0.05	0.32	0.11					
ППП	0.35	0.36	0.70	2.72	2.33	1.67	0.38	1.47	1.39	2.65	4.75	1.78	3.96	0.59	5.42	5.26					
Сумма	99.70	100.00	99.40	99.20	99.80	99.80	99.30	99.20	99.10	100.00	99.80	100.00	99.50	99.70	99.50	99.80					
Na ₂ O + K ₂ O	0.73	0.51	2.39	5.47	4.17	5.41	0.11	0.15	2.54	4.38	5.97	2.68	6.02	0.92	5.36	6.06					
ГМ	0.016	0.006	0.039	0.14	0.14	0.10	0.004	0.04	0.08	0.131	0.42	0.07	0.38	0.014	0.51	0.50					
ФМ	0.005	0.004	0.01	0.011	0.013	0.005	0.004	0.012	0.031	0.010	0.20	0.013	0.18	0.003	0.27	0.22					
ТМ	0.008	0.028	0.112	0.004	0.008	0.001	0.067	0.076	0.095	0.011	0.066	0.051	0.063	0.008	0.11	0.10					
ЖМ	0.34	0.80	0.30	0.07	0.05	0.04	2.16	0.37	0.55	0.07	0.64	0.15	0.64	0.18	0.69	0.54					
НКМ	0.65	1.54	0.96	0.51	0.38	0.65	0.81	0.06	0.64	0.44	0.41	0.53	0.44	0.79	0.35	0.36					
ЩМ	0.14	0.21	0.04	0.02	0.02	0.02	9.50	1.41	0.04	0.02	0.05	0.03	0.03	0.12	0.24	0.20					

Таблица 1. Окончание

Компоненты	Скважина																	
	Кормянская						Быховская						Богушевская I					
	Рогачевская			Руднянская			Оршанская			Глусская			Лукомльская					
	Порода																	
	П		П		А		П		А		П		А		П		А	
	Префикс																	
Км-			Вл-			Во-			Вл-			Во-						
№ образца																		
SiO ₂	648	662	350	716	735	758	893	1489	1547	706	383	460	611	691	760	772		
	61.10	52.20	49.20	76.70	60.90	58.60	57.00	82.40	61.20	56.20	65.10	58.40	61.00	68.50	56.00	81.70		
TiO ₂	1.85	1.30	1.60	0.37	0.90	1.45	1.48	0.29	0.96	1.29	0.06	1.24	1.01	1.03	1.06	0.21		
Al ₂ O ₃	16.70	18.90	22.30	4.88	8.14	18.20	19.50	9.06	15.90	18.60	7.06	19.10	15.60	15.20	23.60	4.15		
Fe ₂ O ₃ *	7.88	10.30	10.50	1.86	2.80	6.84	7.78	0.62	6.89	7.27	3.05	6.36	6.07	3.59	5.96	1.01		
MnO	0.05	0.06	0.06	0.38	0.69	0.03	0.03	0.01	0.31	0.21	0.50	0.18	0.22	0.03	0.02	0.03		
MgO	1.47	4.41	2.04	2.00	3.82	1.72	1.84	0.13	1.48	2.34	2.98	1.47	1.23	0.92	1.64	0.12		
CaO	0.64	0.66	0.40	4.51	7.23	0.46	0.34	0.27	0.82	1.30	6.86	0.30	2.17	0.28	0.21	6.22		
Na ₂ O	1.23	1.19	0.73	0.22	0.39	1.05	0.95	0.53	0.50	0.48	0.22	0.75	0.33	0.63	0.09	0.09		
K ₂ O	4.43	4.34	4.14	2.02	2.82	4.14	4.26	4.84	4.71	4.42	3.39	3.98	4.22	3.92	3.51	2.21		
P ₂ O ₅	<0.05	0.13	0.13	<0.05	<0.05	<0.05	0.06	<0.05	0.06	0.82	<0.05	<0.05	<0.05	0.07	0.08	0.08		
ППП	4.70	6.61	8.57	6.71	12.00	7.27	6.62	1.83	6.75	7.02	10.50	7.56	8.08	5.02	8.28	3.91		
Сумма	100.00	100.00	99.70	99.70	99.70	99.80	99.90	100.00	99.50	100.00	99.70	99.40	99.90	99.30	100.00	99.60		
Na ₂ O + K ₂ O	5.66	5.53	4.87	2.24	3.21	5.19	5.21	5.37	5.21	4.90	3.61	4.73	4.55	4.55	3.60	2.30		
ГМ	0.43	0.59	0.70	0.10	0.21	0.45	0.51	0.121	0.39	0.49	0.164	0.46	0.38	0.28	0.29	0.066		
ФМ	0.15	0.28	0.26	0.06	0.12	0.15	0.17	0.009	0.14	0.18	0.10	0.14	0.12	0.066	0.066	0.014		
ТМ	0.111	0.069	0.072	0.076	0.111	0.080	0.076	0.032	0.060	0.069	0.009	0.065	0.065	0.070	0.068	0.051		
ЖМ	0.43	0.51	0.44	0.43	0.39	0.35	0.37	0.07	0.43	0.38	0.50	0.32	0.38	0.23	0.22	0.24		
НКМ	0.34	0.29	0.22	0.46	0.39	0.29	0.27	0.59	0.33	0.26	0.51	0.25	0.29	0.30	0.30	0.56		
ЩМ	0.28	0.27	0.18	0.11	0.14	0.25	0.22	0.11	0.11	0.11	0.06	0.19	0.08	0.26	0.16	0.04		

Таблица 2. Содержание редких и рассеянных элементов (мкг/г) в представительных образцах песчаников (П) и алевролитов (А) верхнего докембрия Беларуси

Компоненты	Скважина																													
	Быховская										Богушевская I																			
	Свита																													
	Руднянская					Оршанская					Глусская					Лукомльская														
	Порода																													
	П					А					П					А					П					А				
	Префикс																													
	Км-					Вн-					Во-					Вн-					Во-									
	№ образца																													
	Sc	648	662	350	716	735	758	893	1489	1547	706	383	460	611	691	760	772													
	1.34	1.08	3.49	1.66	2.09	1.38	1.24	4.48	7.21	2.55	11.70	3.61	10.70	1.34	18.80	20.20														
V	<2.50	2.81	17.80	3.21	5.36	<2.50	5.01	3.33	10.10	11.20	49.50	18.20	46.10	<2.50	172.00	197.00														
Cr	6.91	10.70	12.50	8.61	7.55	5.66	4.87	8.04	11.00	6.99	46.10	13.60	41.20	6.51	53.50	60.10														
Co	333.00	312.00	258.00	66.00	177.00	122.00	218.00	103.00	145.00	122.00	27.60	280.00	32.10	305.00	41.00	26.20														
Ni	4.72	6.78	5.52	2.88	2.96	2.87	3.01	4.52	12.50	4.15	32.40	11.40	26.40	4.76	35.80	29.40														
Zn	1.47	<1.00	16.20	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	24.40	2.71	110.00	30.30	79.80	<1.00	76.70	76.40														
Ga	1.16	1.03	3.77	8.31	6.52	6.39	0.77	2.95	6.57	7.78	20.70	6.73	18.00	1.85	20.10	20.50														
Rb	14.60	9.79	49.10	113.00	79.40	113.00	<2.00	2.17	71.30	102.00	164.00	71.20	151.00	17.70	117.00	144.00														
Sr	12.60	16.70	75.80	67.40	53.50	63.80	12.90	27.20	75.10	64.70	107.00	46.30	138.00	39.90	84.70	88.30														
Y	4.24	3.45	11.80	4.79	5.86	3.56	3.94	14.00	34.50	7.81	27.80	10.30	26.20	4.20	35.00	32.80														
Zr	28.40	21.40	219.00	37.00	59.20	29.20	32.20	253.00	287.00	98.20	230.00	107.00	268.00	19.90	187.00	159.00														
Nb	0.57	<0.50	5.20	2.08	3.13	1.19	0.54	3.89	6.46	3.91	36.00	7.02	37.30	0.69	20.60	19.20														
Cs	0.28	0.26	0.58	1.03	0.79	0.97	<1.00	<1.00	2.20	1.04	5.94	1.46	5.43	0.24	3.20	3.68														
Ba	93.40	58.00	930.00	909.00	629.00	930.00	28.20	16.80	322.00	788.00	519.00	389.00	576.00	279.00	458.00	459.00														
La	6.36	9.13	18.10	10.50	9.87	7.10	5.00	11.20	15.60	12.60	47.70	16.00	69.10	9.04	51.40	47.80														
Ce	8.13	8.71	34.60	18.20	25.10	15.40	8.49	22.30	32.90	23.80	111.00	33.40	128.00	16.20	103.00	98.20														
Pr	1.33	1.85	4.08	2.62	2.36	1.51	1.32	2.92	3.81	3.10	10.70	3.95	13.40	2.23	12.70	11.80														
Nd	4.87	6.40	15.00	9.67	8.68	5.58	5.14	11.30	14.70	11.80	36.00	14.10	39.70	8.28	49.60	44.90														
Sm	0.90	1.04	2.63	1.52	1.62	0.90	0.94	2.42	3.47	2.01	6.30	2.61	5.57	1.38	9.65	8.50														
Eu	0.19	0.17	0.56	0.49	0.47	0.39	0.18	0.50	0.92	0.58	1.33	0.54	1.12	0.31	2.03	1.96														

Таблица 2. Продолжение

Компоненты	Скважина																							
	Кормянская						Быховская						Богушевская 1											
	Рогачевская						Руднянская						Глусская						Лукомльская					
	Свита																							
	Порода																							
Префикс																								
Км-			Вн-			Во-			Вн-			Во-												
№ образца																								
Gd	648	662	350	716	735	758	893	1489	1547	706	383	460	611	691	760	772								
Tb	0.73	0.72	2.22	1.06	1.28	0.77	0.79	2.34	4.37	1.58	6.19	2.13	5.53	1.08	8.51	7.51								
Dy	0.12	0.11	0.32	0.15	0.19	0.11	0.12	0.38	0.83	0.23	0.94	0.31	0.83	0.15	1.22	1.11								
Ho	0.75	0.58	1.91	0.81	1.04	0.63	0.66	2.25	5.50	1.35	5.17	1.77	4.74	0.77	6.95	6.51								
Er	0.15	0.12	0.39	0.17	0.21	0.12	0.13	0.45	1.18	0.28	1.02	0.37	0.95	0.15	1.33	1.25								
Tm	0.45	0.36	1.17	0.50	0.62	0.37	0.36	1.34	3.50	0.81	2.87	1.04	2.75	0.42	3.70	3.64								
Yb	0.07	0.06	0.19	0.08	0.09	0.06	0.05	0.20	0.54	0.12	0.44	0.16	0.41	0.06	0.50	0.53								
Lu	0.45	0.38	1.21	0.51	0.63	0.38	0.37	1.37	3.62	0.84	2.84	1.06	2.86	0.41	3.28	3.45								
Hf	0.07	0.06	0.20	0.08	0.10	0.06	0.06	0.21	0.56	0.12	0.42	0.16	0.43	0.06	0.49	0.50								
Pb	0.89	0.69	6.26	1.16	1.89	0.94	0.94	7.37	8.01	2.93	6.73	3.12	7.56	0.65	5.69	4.76								
Th	1.30	1.19	5.48	3.16	2.19	2.75	1.90	2.23	3.89	3.22	12.90	3.09	10.20	1.41	7.55	5.80								
U	0.99	0.92	6.04	1.79	2.15	1.32	0.76	3.12	7.45	2.84	13.90	3.60	12.60	1.17	10.00	8.72								
Sc	0.30	1.24	0.84	0.42	0.55	0.29	0.31	1.11	2.78	0.65	2.47	4.53	2.26	0.36	1.56	2.10								
V	18.70	18.40	19.20	4.92	15.60	14.30	14.50	3.11	10.80	17.60	3.72	14.40	10.40	11.20	14.60	2.40								
Cr	72.00	82.00	182.00	11.20	29.70	93.40	102.00	13.90	69.60	101.00	12.60	85.50	52.80	66.20	102.00	13.20								
Co	41.50	84.80	87.40	14.50	28.30	60.20	65.30	18.10	46.30	64.70	9.31	65.30	42.60	47.30	72.30	14.60								
Ni	29.60	55.10	23.50	66.70	46.50	25.80	23.20	179.00	38.50	37.60	50.90	51.50	29.40	28.30	30.40	72.30								
Zn	23.10	59.20	35.30	6.95	8.02	23.40	24.70	3.15	21.70	26.70	3.49	34.50	17.40	25.60	41.50	4.65								
Ga	52.30	116.00	86.50	3.16	7.52	148.00	62.70	1.22	40.00	76.20	<1.0	213.00	65.60	72.50	86.80	1.74								
Rb	20.00	24.80	27.80	5.00	10.10	21.40	24.50	6.17	18.70	26.20	6.24	21.40	17.00	18.40	25.00	5.03								
	124.00	142.00	150.00	45.10	65.20	138.00	144.00	106.00	144.00	201.00	92.00	156.00	155.00	121.00	175.00	52.70								

Таблица 2. Продолжение

Компоненты	Скважина																																								
	Кормянская							Быховская							Богушевская 1																										
	Рогачевская							Руднянская							Глусская							Лукомльская																			
	Свита																																								
	Порода																																								
Префикс																																									
Км-														Вн-														Во-													
№ образца																																									
	648	662	350	716	735	758	893	1489	1547	706	383	460	611	691	760	772																									
Sr	164.00	130.00	138.00	117.00	77.30	144.00	155.00	109.00	104.00	309.00	153.00	85.40	105.00	304.00	239.00	739.00																									
Y	39.70	52.10	37.60	22.20	38.20	28.90	24.70	8.04	29.20	69.80	15.80	34.40	32.00	30.30	28.10	6.57																									
Zr	615.00	355.00	207.00	221.00	756.00	290.00	243.00	145.00	287.00	321.00	61.50	213.00	274.00	319.00	113.00	60.90																									
Nb	24.80	18.10	25.20	5.51	13.30	21.40	22.40	4.51	15.10	21.60	1.56	21.50	17.40	16.30	17.70	3.25																									
Cs	2.35	3.25	4.83	0.24	0.47	3.04	3.43	0.59	2.40	4.29	0.46	4.22	2.85	3.09	4.38	0.35																									
Ba	767.0	602.0	572.0	1850.0	654.0	839.0	831.0	1000.0	869.0	896.0	992.0	626.0	1020.0	672.0	615.0	408.0																									
La	67.50	77.80	89.00	25.40	56.80	65.50	69.20	22.10	53.70	93.20	20.20	54.80	47.60	71.00	63.30	12.30																									
Ce	142.00	154.00	175.00	57.40	120.00	128.00	138.00	46.70	109.00	197.00	42.20	107.00	95.50	159.00	124.00	23.30																									
Pr	15.60	19.50	20.90	7.23	14.70	15.00	16.40	4.77	12.80	23.90	4.86	12.80	11.00	18.50	12.90	2.98																									
Nd	56.90	75.50	76.50	29.60	57.60	54.50	59.60	16.60	47.90	91.80	20.50	47.00	41.00	67.40	44.50	11.10																									
Sm	10.20	14.40	13.30	6.06	11.50	8.77	9.61	2.68	8.52	16.80	4.55	8.43	7.46	10.10	7.19	2.13																									
Eu	1.78	2.37	2.44	1.54	1.80	1.68	1.92	0.99	1.76	3.96	1.54	1.61	1.48	1.72	1.50	0.62																									
Gd	8.73	12.00	10.70	5.43	9.59	7.25	7.37	2.07	7.22	16.70	3.88	7.10	6.31	6.51	6.50	1.73																									
Tb	1.28	1.68	1.54	0.82	1.33	1.04	1.00	0.28	1.02	2.45	0.56	1.08	0.96	0.87	0.98	0.25																									
Dy	7.68	9.24	8.22	4.49	6.92	5.82	5.32	1.61	5.48	13.20	3.12	6.06	5.59	5.05	5.69	1.35																									
Ho	1.56	1.81	1.55	0.78	1.26	1.11	1.01	0.31	1.05	2.40	0.58	1.22	1.09	1.07	1.12	0.25																									
Er	4.50	4.95	4.33	1.92	3.50	3.18	2.91	0.92	2.97	5.96	1.46	3.62	3.28	3.34	3.06	0.68																									
Tm	0.67	0.68	0.62	0.24	0.50	0.47	0.42	0.14	0.41	0.73	0.19	0.53	0.49	0.53	0.43	0.10																									
Yb	4.53	4.23	4.05	1.48	3.45	3.13	2.75	0.95	2.74	4.16	1.07	3.51	3.01	3.68	2.68	0.67																									
Lu	0.69	0.65	0.60	0.23	0.56	0.45	0.42	0.16	0.41	0.62	0.15	0.52	0.46	0.56	0.41	0.10																									

Таблица 2. Окончание

Компоненты	Скважина															
	Кормянская					Быховская					Богушевская 1					
	Свита															
	Рогачевская		Руднянская			Оршанская			Глусская		Лукомльская					
	Порода															
	П	П	П	А	А	П	А	А	П	А	П	А	П	А	А	
	Префикс															
	Км-		Вн-			Во-			Вн-		Во-					
	№ образца															
		648	662	350	716	735	758	893	1489	1547	706	383	460	611	691	760
Hf	17.80	10.20	6.50	6.24	22.30	8.76	7.44	4.13	8.50	8.90	1.82	6.66	8.27	9.69	3.65	1.89
Pb	8.06	6.96	10.30	4.55	6.51	8.55	8.29	9.44	8.37	5.95	5.93	7.57	5.91	4.45	5.34	1.76
Th	28.60	24.50	21.80	7.93	26.00	18.00	17.10	4.34	19.40	20.60	2.41	14.90	15.90	12.40	10.60	3.65
U	2.88	2.35	2.35	0.89	3.19	1.76	1.62	0.61	2.32	2.99	0.22	4.36	2.52	2.98	2.97	0.60

масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Agilent 7700x (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург). Нижние пределы определения концентраций элементов имели следующие значения: для Ba – 3, V – 2.5, Rb – 2, Cr, Ni, Sr, Pb и Zn – 1, Co, Zr и Nb – 0.5, Sc – 0.2, Ga, Y, Cs, Th и U – 0.1, La, Ce, Pr, Nd, Gd, Dy, Er, Yb и Hf – 0.01, Sm, Eu, Tb, Ho, Tm и Lu – 0.005 мкг/г. Особенности распределения названных элементов относительно различных референтных геохимических объектов рассмотрены ниже.

Валовый химический состав изученных образцов песчаников и алевролитов приведен в табл. 1 и 2. Далее в тесте содержание всех породообразующих оксидов указано в мас. %.

В рамках пилотных исследований нами изучен химический состав песчаников и алевролитов как для уточнения литотипа, выделенного визуально при отборе образцов, так и для получения дополнительных сведений о механизмах и процессах их образования, в том числе о петрофонде и палеоклимате. С этой целью нами использована химическая классификация пород, предложенная Я.Э. Юдовичем и М.П. Кетрис [2000], а также ряд других диаграмм, способствующих решению названных задач. Химическая аттестация пород проведена с использованием различных соотношений (модулей), рассчитанных по величинам содержания основных породообразующих оксидов в мас. %. В их число входят: ГМ – гидролизатный модуль $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3^* + MnO)/SiO_2$, ФМ – фемический модуль $(Fe_2O_3^* + MnO + MgO)/SiO_2$, ТМ – титановый модуль TiO_2/Al_2O_3 , ЖМ – железный модуль $(Fe_2O_3^* + MnO)/(Al_2O_3 + TiO_2)$, НКМ – модуль нормированной щелочности $HM + KM = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$, ЩМ – щелочной модуль Na_2O/K_2O .

ХИМИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ПОРОД И НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ ОКСИДОВ

Песчаники

Первое, что обращает на себя внимание при химической классификации песчаников – это их достаточно четкое разделение на три кластера на базовых, или главных (по [Юдович, Кетрис, 2000]), диаграммах – $(Na_2O + K_2O)$ –ГМ и $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ – $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3^* + MnO)/SiO_2$ (рис. 2а, 2б). К первому кластеру относятся песчаные породы позднерифейской рогачевской (обр.

Км-648, 662), оршанской (Во-893, 1518) и нижневендской глусской (Вн-634, 691) свит с наиболее высокими в выборке концентрациями кремнезема (96.8–98.5%) и наименьшими – щелочей (сумма Na_2O и K_2O менее 0.92%). Они относятся к гиперсилитам со значениями ГМ < 0.016 и НКМ 0.10–1.54, в среднем 0.79. Для образцов этого кластера характерны минимальные среди выборки содержание TiO_2 , как правило, менее 0.01%, за исключением обр. Во-1518 ($\sim 0.04\%$), а также пониженные концентрации Fe_2O_3^* (0.2–0.4%). Тем не менее, эти породы в целом характеризуются более высокими значениями железного модуля и более низкими значениями ТМ по сравнению с породами кластера 2 (см. рис. 2в). Подобные низкие значения ГМ в совокупности с высокими величинами ТМ при низком содержании TiO_2 наиболее характерны для кварцевых разновидностей песчаников [Юдович, Кетрис, 2000]. С этим согласуется и распределение фигуративных точек песчаных пород первого кластера на диаграммах $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ [Pettijohn et al., 1976] и $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$ [Herron, 1988]: на обеих диаграммах они попадают в поле кварцевых аренифов (рис. 3а, 3б).

Ко второму кластеру относятся гипер- и суперсилиты руднянской (обр. Км-350, 438, 518), глусской и единичные образцы низовской (Во-681) и котлинской (Лр-378) свит, характеризующиеся значениями ГМ 0.036–0.098 и НКМ от 0.46 до 1.01. Содержание кремнезема в этих породах 88.7–93.6%, редко меньше (76.7–81.7%). Последний случай, вероятно, связан с развитием карбонатного цемента и коррозией зерен кварца в породах низовской и котлинской свит (CaO 4.5–6.2%, потери при прокаливании (ППП) – 3.9–6.7%), так как суммарное содержание щелочей в этих образцах практически такое же, как и в других песчаных породах этого кластера. Следует подчеркнуть, что в целом сумма щелочей в песчаниках кластера 2 заметно выше, чем в породах кластера 1, и составляет 1.9–3.4%. Породы кластера 2 более высокотитанистые, а значения ЖМ в них ниже, чем в песчаниках кластера 1 (см. табл. 1, рис. 2в). По величинам ГМ и распределению фигуративных точек пород кластера 2 на диаграммах $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ и $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$ (см. рис. 3а, 3б), можно предполагать, что они относятся не только к кварцевым, но и к олигомиктовым, скорее всего полевошпатово-кварцевым разновидностям песчаников.

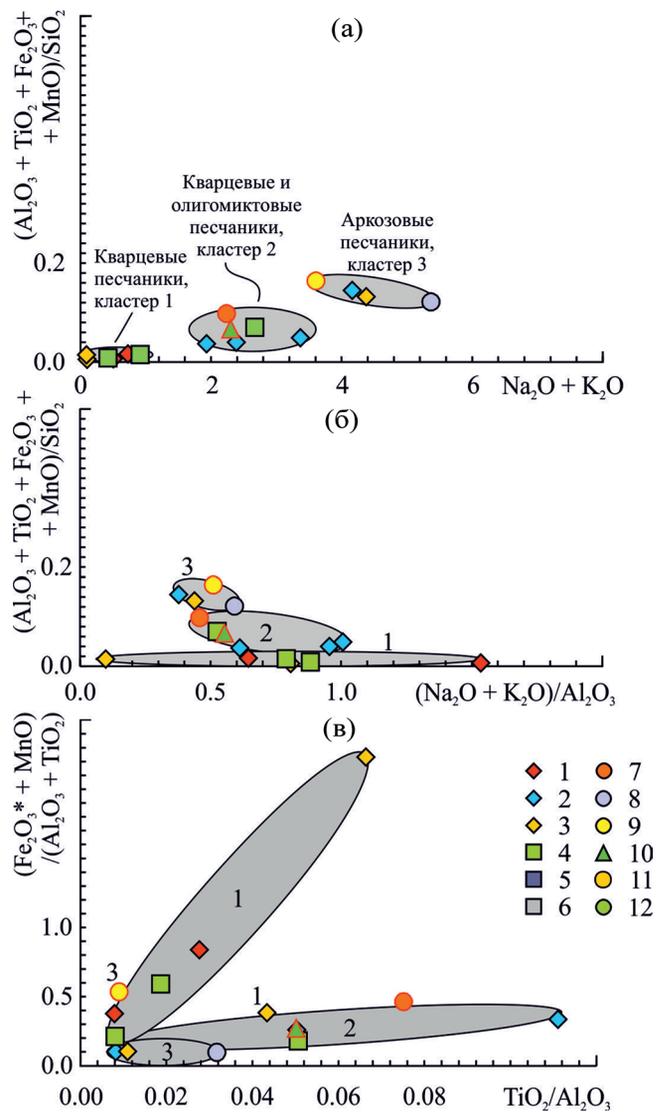


Рис. 2. Положение фигуративных точек песчаников различных свит на модульных диаграммах $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/\text{SiO}_2$ (а) и $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/\text{SiO}_2$ (б) и $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$ (в). 1–10 – свиты (1 – рогачевская, 2 – руднянская, 3 – оршанская, 4 – глусская, 5 – лукомльская, 6 – лиозненская, 7 – низовская, 8 – селявская, 9 – черницкая, 10 – котлинская); 11 – все исследованные песчаники; 12 – то же, алевролиты и глинистые породы. Условные знаки с красным контуром – карбонатизированные разновидности пород.

В третий кластер выделяются образцы, отобранные из руднянской (Вн-735), оршанской (Вн-706), селявской (Лр-477) и черницкой (Во-622) свит. Они отличаются наименьшим среди исследованных песчаников содержанием кремнезема (65.1–81.1...82.4%), для них характерны также и более высокие значения суммы щелочей $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ (см. рис. 2б, табл. 1). В песчаниках третьего кластера

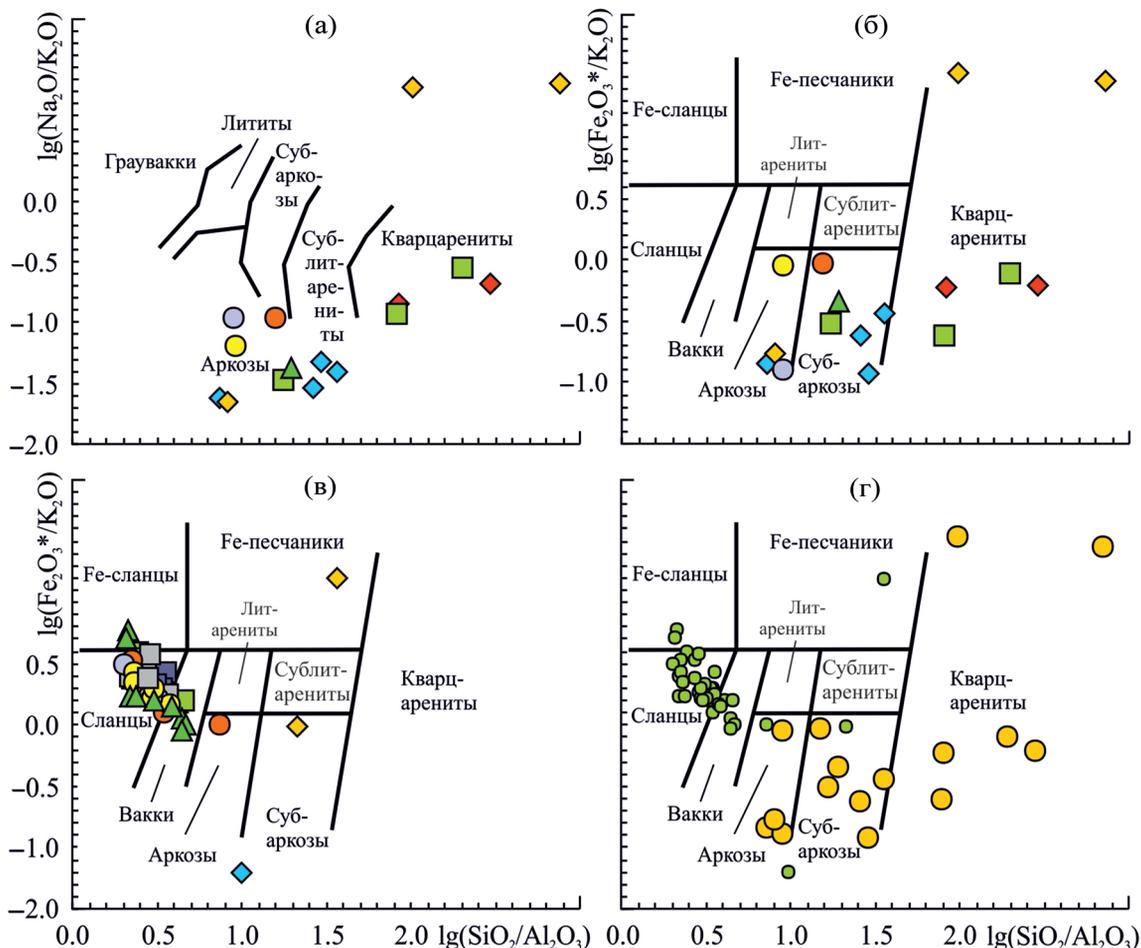


Рис. 3. Положение фигуративных точек песчаников (а, б), алевролитов и глинистых пород (в) различных свит, а также в целом их выборков (г) на классификационных диаграммах $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ [Pettijohn et al., 1976] (а) и $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$ [Herron, 1988] (б–г). Условные обозначения см. рис. 2.

установлены наименьшие величины ТМ и ЖМ (см. рис. 2в), а величины НКМ и ГМ в них самые высокие (см. рис. 2б). В соответствии с литохимической классификацией [Юдович, Кетрис, 2000], песчаники этого кластера являются нормосилитами. К ним могут быть отнесены аркозовые, полевошпатово-кварцевые песчаники и кислые граувакки. В нашем случае, судя по положению фигуративных точек на диаграммах $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ и $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$, это, скорее всего, аркозы (см. рис. 3а, 3б). В одном из образцов этого кластера, Во-622, вероятно содержится доломит и/или кальцит в составе цемента ($\text{MgO} \sim 3.0\%$ и $\text{CaO} \sim 6.9\%$, ППП – 10.5%).

Таким образом, песчаные породы пилотной коллекции по химическому составу вполне соответствуют песчаникам, а распределение в них основных породообразующих оксидов и геохимическая аттестация с использованием

модулей позволяют отнести их к существенно кварцевым и олигомиктовым (вероятно, полевошпатово-кварцевым) разновидностям, а также к аркозам. Некоторые образцы содержат карбонатный цемент, и в дальнейших литогеохимических исследованиях их следует использовать с осторожностью.

Результаты сопоставления литохимических параметров рифейских и вендских песчаников со средним составом верхней континентальной коры (UCC [Rudnick, Gao, 2003]) не позволяют выявить какие-либо определенные закономерности эволюции их состава во времени на имеющемся у нас материале (рис. 4). Очевидно, что установленные геохимические различия или черты сходства в составе песчаников связаны в основном с их принадлежностью к какому-либо из трех литотипов. В то же время можно отметить сходство валового химического состава некоторых образцов песчаников руднянской и оршанской свит рифея

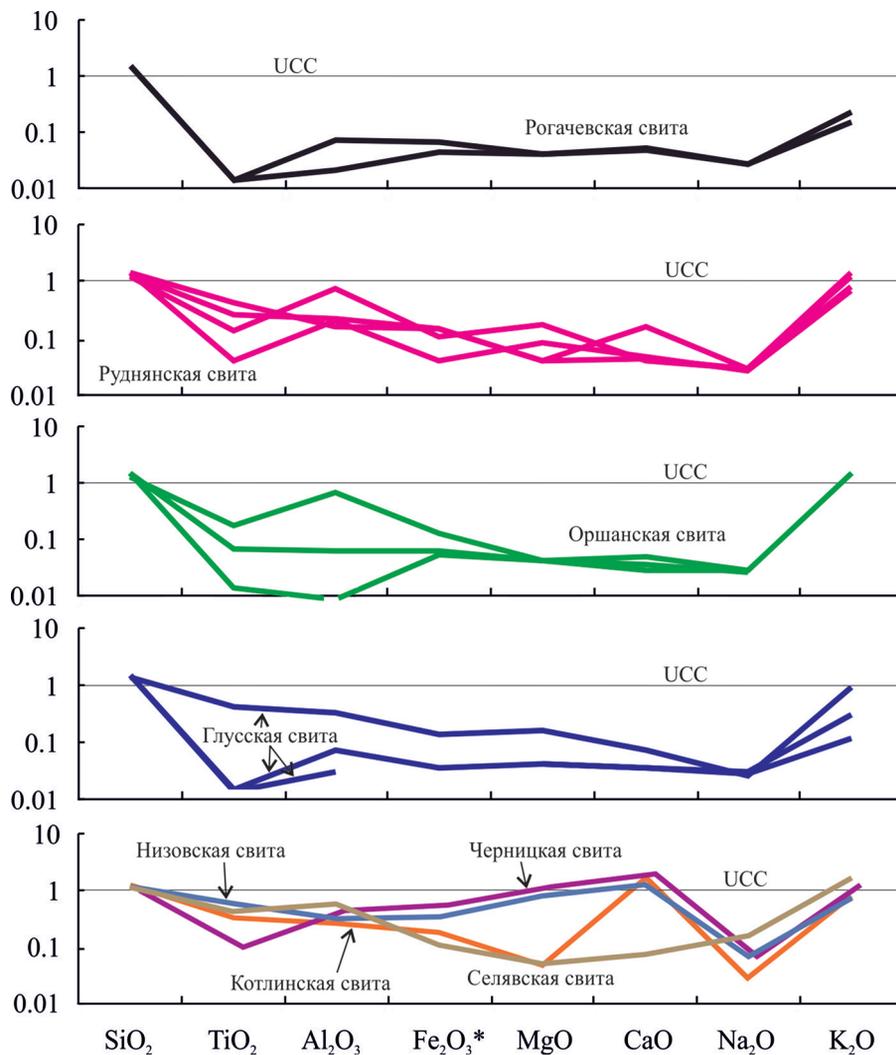


Рис. 4. Нормированное к УСС распределение основных породообразующих оксидов в песчаниках рифея и венда.

с отдельными образцами песчаников глусской свиты нижнего венда, а также песчаников низовской и черницкой свит.

Все перечисленные литологические типы (или петротипы) песчаников, выявленные нами в результате интерпретации особенностей их химического состава не противоречат данным, следующим из общей литологической характеристики свит и приведенным в разделе “Литостратиграфия и состав...”, что указывает на корректность выполненных геохимических исследований и дает перспективу для их дальнейшего применения.

Алевролиты

Геохимическая аттестация алевролитов позволяет выдвинуть весьма интересные предположения относительно того к какому литотипу их следует отнести. Те немногочисленные алевролиты оршанской и руднянской свит, которые

есть в нашей пилотной коллекции, по всей видимости, действительно являются алевролитами либо близкими к ним по размерности кластики тонкозернистыми песчаниками, вероятно существенно кварцевыми. На графиках $(Na_2O + K_2O) - (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3^* + MnO) / SiO_2$ и $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3 - (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3^* + MnO) / SiO_2$ их фигуративные точки попадают в поля кварцевых, полевошпатово-кварцевых и аркозовых песчаников (рис. 5а, 5б). При этом они отличаются от вендских алевролитов повышенным содержанием SiO_2 (79.5...87.8%, максимум 93.9%, обр. Во-1489), пониженными – TiO_2 (0.01–0.19%), Al_2O_3 (4.0–10.7%, обр. Во-1489 – 2.5%) и $Fe_2O_3^*$ (0.76–2.4%) и сопоставимыми по сумме щелочей (2.5–5.5%, исключение – обр. Во-1489 – 0.15%). Все сказанное позволяет аттестовать их в качестве нормо-, супер- и гиперсилитов ($ГМ = 0.04–0.14$),

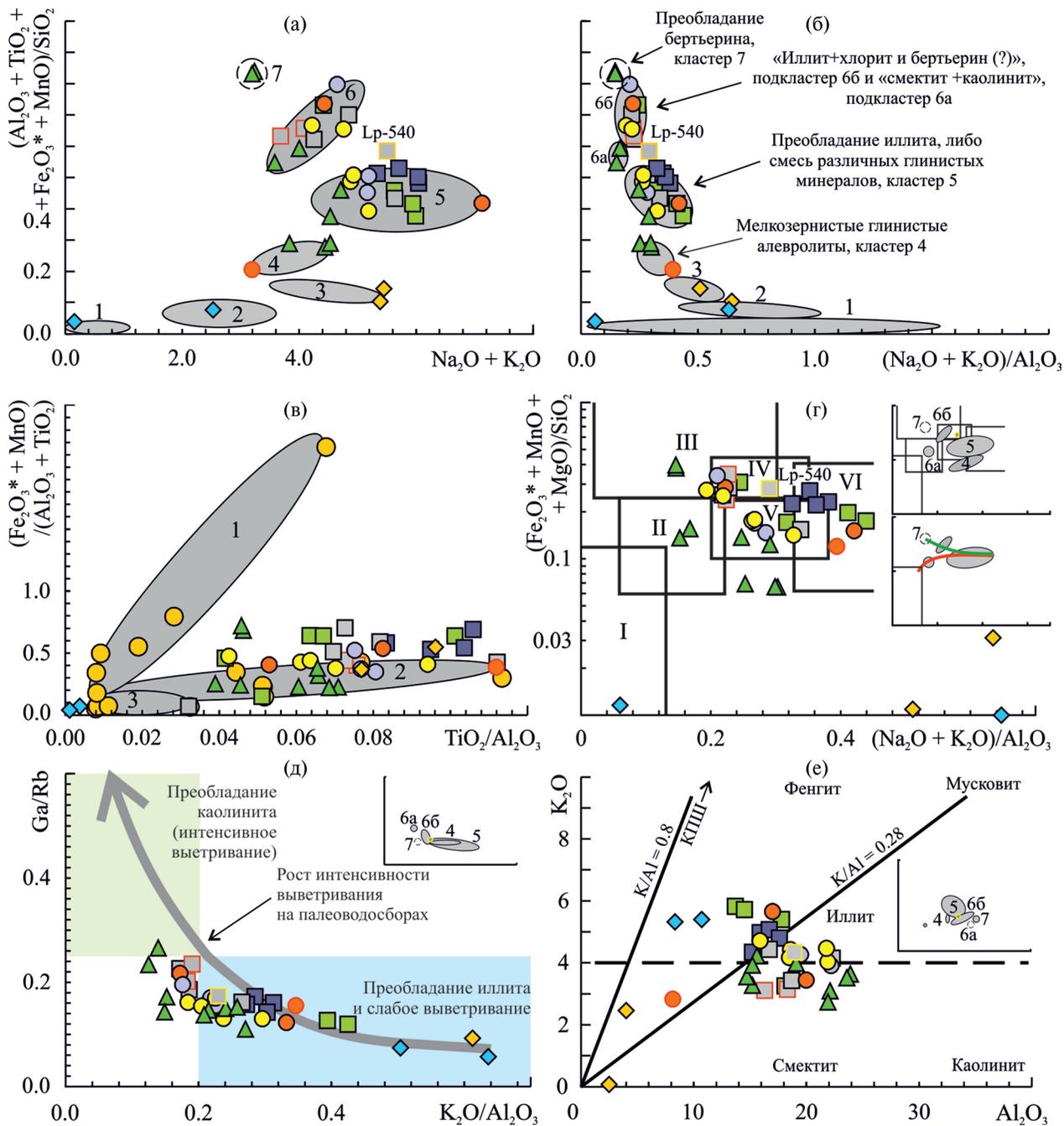


Рис. 5. Положение фигуративных точек глинистых пород и алевролитов на диаграммах $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/\text{SiO}_2$ (а), $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/\text{SiO}_2$ (б), $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$ (в), $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (г) [Юдович, Кетрис, 2000], $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ga}/\text{Rb}$ (д) [Roy, Roser, 2013] и $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ (е) [van de Kamp, 2016].
Условные обозначения см. рис. 2.

На врезках к частям (г, д, е) показаны кластеры алевролитов и глинистых пород венда (см. текст).
(г) – поля глинистых пород: I – с преобладанием каолинита; II – с преобладанием смектита при подчиненном количестве каолинита и иллита; III – доминирует хлорит, в виде примеси может присутствовать Fe-иллит; IV – преимущественно иллитовых; V – стандартная трехкомпонентная система “хлорит + смектит + иллит”; VI – иллитовые глины с той или иной примесью тонкорастертого КПШ. Зеленая линия на врезке – предполагаемый тренд к увеличению в породах смектита, хлорита, гидроксидов железа и бертьерина, красная линия – тренд к увеличению в породах смектита, смешанослойных образований и каолинита.

в том числе щелочных. Алевролиты оршанской и руднянской свит демонстрируют значения ГМ и ЖМ, схожие с таковыми полевошпатово-кварцевых песчаников кластера 2 (см. рис. 5в).

Обращает на себя внимание свойственное алевролитам рифея существенное преобладание K_2O над Na_2O и, соответственно, низкие значения ЩМ (0.02–0.04). Однако в этом случае, как и применительно к концентрациям кремнезема, глинозема и щелочей, мы наблюдаем, что обр. Во-1489 несколько отличается от остальных алевролитов – величина ЩМ для него составляет 1.4. Подобные значения в большей степени характерны для песчаников, тогда как для глинистых пород величина ЩМ “стабильна и не превышает 1 ± 0.1 ” согласно [Юдович, Кетрис, 2000, с. 139]. Все это позволяет думать, что обр. Во-1489 является не алевролитом, а тонкозернистым песчаником. В дополнение к сказанному отметим, что на диаграмме $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Fe_2O_3^*/K_2O)$ точка обр. Во-1489 расположена в поле Fe-песчаников; точки остальных алевролитов рифея локализованы в поле субаркозов (см. рис. 2в).

На графике $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3 - (Fe_2O_3^* + MnO + MgO)/SiO_2$ [Юдович, Кетрис, 2000] фигуративные точки верхнерифейских алевролитов и точка обр. Во-1489 расположены в поле I (песчаник) либо не попадают в какое-либо из полей (см. рис. 5г), так как при низкой фемичности (ФМ 0.01–0.03) обладают высокими значениями общей нормированной щелочности. Это может быть обусловлено не только наличием в их составе КПШ, но и иллитового цемента и/или заметного количества мусковита. Например, на диаграмме $K_2O/Al_2O_3 - Ga/Rb$ [Roy, Roser, 2013] они попадают в поле, характерное для глинистых пород с преобладаем иллита (см. рис. 5д), но несколько отстоят от вендских алевролитов, а на диаграмме $K_2O - Al_2O_3$ [van de Kamp, 2016] их фигуративные точки отклоняются от линии КПШ в сторону линии иллита и мусковита (см. рис. 5е).

Использование главных модульных диаграмм применительно к вендским алевролитам позволяет нам выделить четыре дополнительных (к уже существующим) кластера, однако в отличие от кластеров песчаников, они не выражены при рассмотрении железистости и титанистости пород (см. рис. 5в). По этим характеристикам вендские алевролиты в значительной степени похожи или являются более железистыми в сравнении с одновозрастными олигомиктовыми и аркозовыми песчаниками, что

в целом весьма типично для глинистых пород (!), а не алевролитов.

Породы кластера 4 (число образцов в кластере, $n = 4$) аттестуются в качестве миосилитов (котлинская свита) и псевдомиосилитов (алевролит низовской свиты с карбонатным цементом, Во-685) со значениями ГМ 0.21–0.29 и НКМ 0.25–0.39, содержанием $(Na_2O + K_2O)$ 3.2–4.6% и SiO_2 – от 60.9% в карбонатизированном алевролите до 68.5–69.6%. Согласно представлениям авторов монографии [Юдович, Кетрис, 2000], подтипу миосилитов среди кластолитов, как правило, отвечают породы, переходные между песчаниками и аргиллитами, или, иными словами, алевролиты, нередко глинистые мелкозернистые разности. Для последних типична ассоциация с глинистыми породами [Систематика ..., 1998]. Следует подчеркнуть, что, как и рифейские алевролиты, составы глинистых алевролитов котлинской свиты на диаграмме $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3 - (Fe_2O_3^* + MnO + MgO)/SiO_2$ не попадают ни в одно из классификационных полей (см. рис. 5г), хотя и находятся вблизи полей V и II, где встречаются фигуративные точки других проб этой свиты. Алевролит селявской свиты попадает в поле VI, вероятно, по причине сниженных за счет карбонатизации концентраций кремнезема и соотношения SiO_2/Al_2O_3 , а также повышенных концентраций оксида калия ввиду присутствия в нем заметного количества КПШ (см. рис. 5е). На диаграмме $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Fe_2O_3^*/K_2O)$ алевролиты данного кластера попадают в поле вакк (из-за значительной алевритовой примеси?), а карбонатизированный алевролит низовской свиты – в поле аркозов (см. рис. 3в).

При рассмотрении пород, объединенных в кластеры 5, 6 и 7, а также обр. Лр-540 лиозненской свиты из скв. Лепель-1, занимающего промежуточное положение между кластером 5 и подкластером 6б, (см. рис 5а, 5б), можно выделить несколько особенностей. Величина ГМ позволяет отнести их к классам нормосиаллитов, реже суперсиаллитов в случае кластера 5 (ГМ 0.38–0.53, содержание SiO_2 55.3–63.3%, Al_2O_3 от 13.7 до 19.5%) либо к гипогидролизатам, что применимо к кластерам 6 и 7 (ГМ 0.55–0.84, SiO_2 –42.0–56.0%, Al_2O_3 от 16.3 до 23.9%). При это кластер 5 отличается от двух других повышенной щелочностью (4.9–7.2 против 3.2–4.9%). Для пород кластеров 5, 6 и 7 характерно преобладание оксида калия над оксидом натрия ($K_2O_{\text{среднее}} = 4.2 \pm 0.8\%$, $Na_2O_{\text{среднее}} = 0.7 \pm 0.4\%$) и, соответственно,

низкие значения ШМ 0.03–0.36, среднее – 0.17 ± 0.09 . Все перечисленные характеристики, согласно [Юдович, Кетрис, 2000], присущи в большей степени *глинистым породам*, нежели алевролитам. Подтверждает сказанное и положение фигуративных точек этих “алевролитов” на диаграмме $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$, где они попадают в поля сланцев и Fe-сланцев (см. рис. 3в, 3г). Примечательно, что в дальнейшем, например, в монографии, посвященной геохимии фосфора, Я.Э. Юдович с соавторами [2020] при отнесении проб к “глинистым породам” использует следующие критерии: $\text{SiO}_2 \leq 65-67\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, ШМ < 0.5. Практически все образцы пилотной коллекции, отнесенные визуальнo при описании и опробовании кернa к глинистым породам, удовлетворяют и этим критериям.

В отношении минерального состава глинистой составляющей пород, после геохимической аттестации отнесенных нами к мелкозернистым глинистым алевролитам и аргиллитам, можно предполагать следующее. В кластер 5 объединены: 1) щелочные разности с преобладанием среди глинистых минералов иллита ($n = 8$) и наличием в составе часто заметного количества КПШ, так как их фигуративные точки концентрируются в поле VI на графике $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (см. рис. 5г) и соответствующем поле на диаграмме $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ga}/\text{Rb}$ (см. рис. 5д) и отклоняются от линии иллита и мусковита в сторону линии КПШ на диаграмме $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ (см. рис. 5е); 2) породы смешанного состава ($n = 6$) без явного преобладания какого-либо из глинистых минералов – иллита, смектита либо хлорита (поле V на диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$), в которых, вероятно, присутствует каолинит, что можно предполагать по увеличению содержания глинозема относительно существенно иллитовых разностей, снижению $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (см. рис. 5д), отклонения к оси Al_2O_3 (см. рис. 5е).

К существенно иллитовым разностям мы относим все образцы лукомльской и некоторые образцы глусской (Bh-383, 611, 701), лиозненской (Lp-528), низовской (Lp-498) и черницкой (Bo-500) свит, а к разностям со смешанным составом – образцы селявской (Bo-658, 660), черницкой (Bo-608, 614) и котлинской (Bo-515, 521) свит. Примечательно, что многие образцы лукомльской свиты обладают повышенным содержанием MgO (до 2.3–3.5%), что, в свою очередь, согласно представлениям авторов монографии [Юдович, Кетрис, 2000], может быть связано с наличием в их составе Fe-Mg-хлорита, сепиолита, палыгорскита, магнезита и доломита,

амфиболов, пироксенов и вермикулита. На наш взгляд, наиболее вероятными из всех указанных вариантов, учитывая химический состав пород и сведения, приведенные в работе [Jewula et al., 2022], является хлорит и вермикулит – продукты выветривания и преобразования основной кластики. Кроме того, в поле VI диаграммы $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$, в котором находится часть точек пород кластера 5, локализованы продукты аридных кор выветривания докембрия [Юдович, Кетрис, 2000].

Кластер 6 разбивается на два подкластера. В один из них (6а) попадают два образца из котлинской свиты (Lp-321 и Lp-329), которые, наряду с глинистыми породами кластера 7, характеризуются наименьшими значениями НКМ среди вендских пелитолитов (< 0.2, см. рис. 5б) и величиной ФМ, сопоставимой с таковой у части образцов с глинистой составляющей смешанного состава (см. рис. 5г). При этом указанные образцы попадают в поле II на диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ и ближе прочих расположены к оси глинозема на диаграмме $\text{K}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ (см. рис. 5е). Они также отвечают полю разностей с преобладанием каолинита на диаграмме $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Ga}/\text{Rb}$ (см. рис. 5д). Все перечисленные особенности позволяют предполагать, что в составе пород кластера 6а преобладают смектиты и каолинит.

Состав пород подкластера 6б ($n = 6$) отличается от состава пород кластера 5 повышенной фемичностью при пониженной общей нормированной щелочности. Их фигуративные точки попадают в поля III и IV диаграммы $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$, что позволяет предполагать преобладание в их составе хлорита и присутствие иллита. В этот подкластер попадают практически все образцы лиозненской свиты, в том числе карбонатизированные разности с содержанием CaO от 4.8 до 10.8%, MgO – до 4.1, ППП порядка 10–11%. К нему принадлежат также глинистые породы глусской (Bh-672), низовской (Bh-675), черницкой (Lp-410, 419) и селявской (Bo-661) свит. Однако если принимать во внимание данные, приведенные в работе [Jewula et al., 2022], согласно которым содержание хлорита в глинистых породах волынского и редкинського региояруса невелико, то повышенную фемичность скорее следует связывать не только с наличием хлорита, но и бертьерина (каолинит-серпентина), а также гематита и гетита. На последнее могут указывать достаточно высокие для рассматриваемой

выборки ППП (до 15.5–17% в образцах Во-672 и Во-675; глусская и низовская свиты соответственно) сочетающиеся с повышенными относительно остальной выборки концентрациями Fe_2O_3^* (11.6–12.7%).

Оставшиеся два образца алевролитов котлинской свиты (Lp-321, Lp-329), объединенные в кластер 7, отличаются наибольшими значениями ГМ (0.55 и 0.59) и наименьшими – щелочности, фемичности и калиевого модуля (см. рис. 5) среди вендских тонкозернистых пород. Однако, как и в случае образцов кластера 6б, мы предполагаем, что в составе образцов Lp-321 и Lp-329 есть бертьерин, а повышенная фемичность – признак его преобладания среди глинистых минералов.

При нормировании содержания основных породообразующих оксидов на их содержание в УСС, достаточно хорошо заметны отличия между рифейскими алевролитами и вендскими тонкозернистыми породами. Первые характеризуются пониженным содержанием оксида алюминия – 0.2...0.7 УСС, титана – <0.6 УСС, суммарного железа – <0.4 УСС (в алевролитах руднянской свиты – $n \cdot 0.01$ УСС) (рис. 6а, 6б). Спектры распределения породообразующих оксидов вендских пород при этом весьма похожи друг на друга – концентрации кремнезема и глинозема в них близки к таковым в УСС (1...1.5), либо незначительно ниже, за исключением образца Во-685 низовской свиты (0.6 УСС). Содержание оксида титана составляет ~1.5...2.7 УСС, MgO – 0.6...1.8 УСС, K_2O – 1...2 УСС, Na_2O – <0.5, чаще <0.2 УСС. Более заметны вариации Fe_2O_3^* – от 0.6 УСС в уже упомянутом обр. Во-685 низовской свиты до 3.1...3.3 УСС в глинистых породах котлинской свиты с предполагаемым повышенным содержанием бертьерина, чаще 1.2...3.1 УСС. Наиболее существенны вариации содержания MnO – от 0.14...2.2 до 2.9...9.8 с наибольшими содержаниями в карбонатизированных разностях, CaO – 0.05...3.1 с максимумами в тех же образцах, и P_2O_5 – до 1...3.2...18.5 (!) УСС, максимум в обр. Во-685 низовской свиты.

Следует подчеркнуть, что в вендских алевролитах и глинистых породах содержание CaO коррелирует с содержанием P_2O_5 (коэффициент корреляции $r_{0.05(\text{CaO}-\text{P}_2\text{O}_5)} = 0.76$). Однако эта корреляция становится геохимически незначимой ($r_{0.05(\text{CaO}-\text{P}_2\text{O}_5)} = 0.21$), если исключить из выборки образцы Во-732, 711, 608 и Lp-360 с заметно более высокими (аномальными), чем кларковые (кларк P_2O_5 для пелитов по [Юдович и др., 2020] равен $0.140 \pm 0.005\%$)

концентрациями P_2O_5 (более 0.48%), а также образец Во-685 низовской свиты. Последний отличается высокими концентрациями оксидов Ca , Mn и Mg . Вероятно, заметная часть фосфора в породах с вышекларковыми концентрациями P_2O_5 входит в аксессуарный апатит, тогда как в разностях с около- и нижекларковыми содержаниям можно наблюдать корреляцию фосфора с железом ($r_{0.05} = 0.41$) и с Mg ($r_{0.05} = 0.62$). Подобные корреляционные связи могут указывать на присутствие фосфора в сорбированной форме на смектитах или хлорите и на гидроксидах железа [Юдович и др., 2020].

Таким образом, собственно алевролитами в составе нашей пилотной коллекции являются почти все алевролиты рифея и некоторые образцы, отобранные из котлинской и низовской свит, тогда как остальные вендские “алевролиты” следует отнести к глинистым породам. В случае рифейских образований мы склонны полагать, что визуально определенные как алевролиты породы являются крупнозернистыми алевролитами либо тонкозернистыми песчаниками существенно кварцевого или полевошпатово-кварцевого состава, так как во многом схожи с аналогичными песчаниками по геохимическому облику. На наш взгляд, все перечисленное позволяет рассматривать среднерифейские алевролиты и песчаники совместно при дальнейших исследованиях.

Применительно к вендским алевролитам можно предполагать, что они являются мелкозернистыми глинистыми разностями судя по их геохимическим особенностям, более близким к другим тонкозернистым образованиям венда, идентифицированных нами по различным критериям в качестве аргиллитов. Известно, что глинистая фракция является основным концентратом ряда редких и рассеянных элементов [Taylor, McLennan, 1985; Geochemistry ..., 2003 и др.], а глинистые породы считаются наиболее корректно отражающими состав питающих провинций на значительных площадях палеоводосборов [Taylor, McLennan, 1985; Cullers et al., 1987, 1988; Cullers, 1988; Интерпретация ..., 2001 и др.], что в определенной степени “развязывает нам руки” в дальнейших реконструкциях палеоклимата и петрофонда, то есть позволяет делать это без какой-либо доли условности, как это было бы с алевролитами.

Следует подчеркнуть, что в выборке тонкозернистых пород есть ряд образцов с существенной долей CaO , иногда и MgO , и высокими ППП.

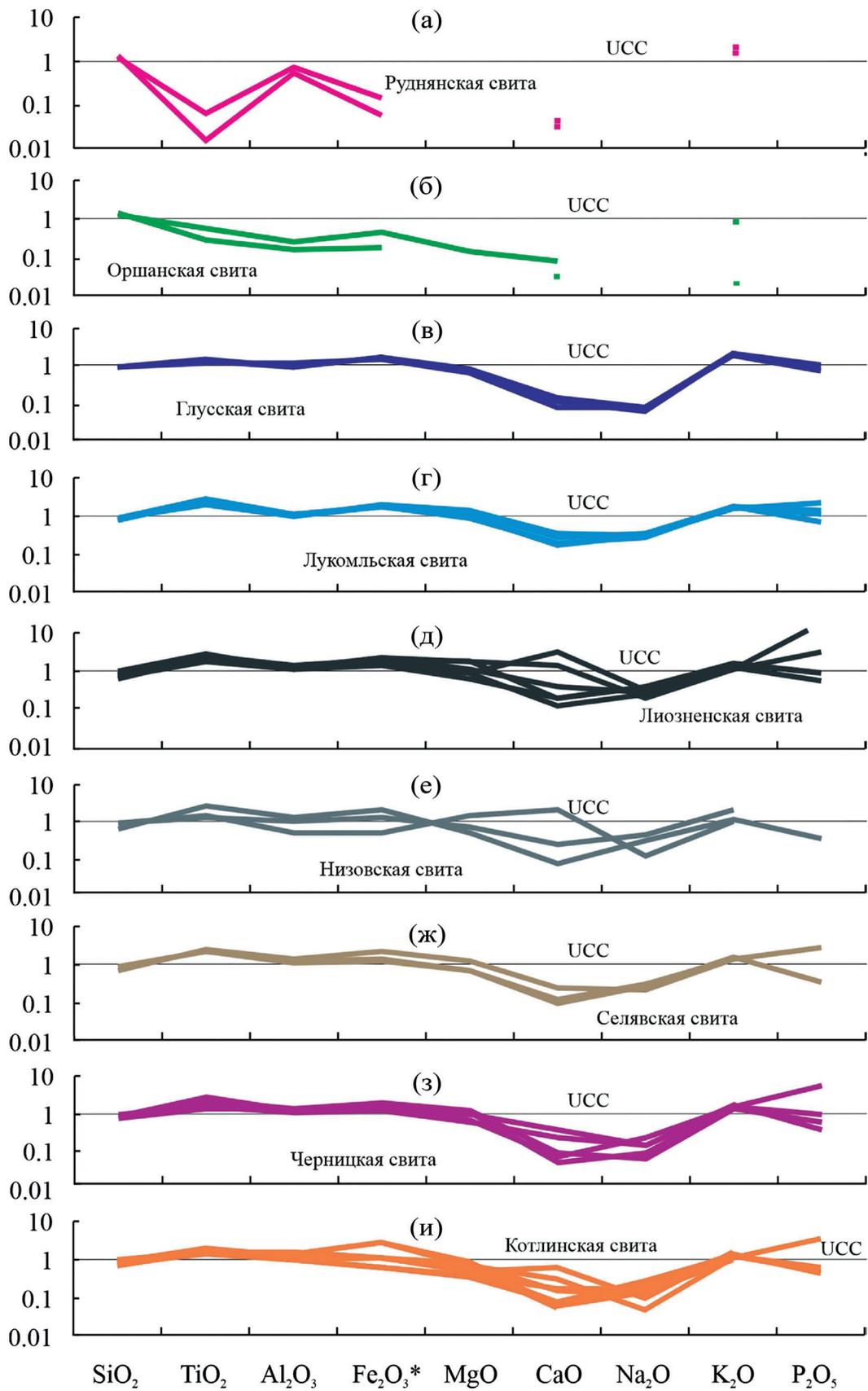


Рис. 6. Нормированное к УСС распределение основных породообразующих оксидов в глинистых породах и алев-ролитах рифея и венда.

Кроме того, в некоторых образцах нашей коллекции присутствует заметное количество оксида фосфора, вероятно, находящегося в породах в составе аксессуарных минералов. Эти образцы в дальнейших исследованиях будут использованы с осторожностью либо исключены из рассмотрения. В целом изменчивое содержание глинистой фракции, наличие карбонатной и фосфатной примеси подталкивают нас к использованию такого геохимического приема, как анализ факторов/коэффициентов обогащения (enrichment factor, EF; $EF = (X/Al)_{\text{обр}} / (X/Al)_{\text{референтный.объект}}$, где X – концентрация элемента [van der Weijden, 2002], для которого производится расчет фактора обогащения) при рассмотрении распределения редких и рассеянных элементов в глинистых породах и алевролитах венда. В качестве референтного объекта для глинистых пород и глинистых мелкозернистых алевролитов мы используем постархейский австралийский средний сланец (PAAS [Taylor, McLennan, 1985]) с поправками для редкоземельных элементов (РЗЭ), Sc и Y по [Pourmand et al., 2012] и для Nb по [Barth et al., 2016]

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕДКИХ И РАССЕЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Алевролиты рифея и песчаники рифея и венда

Все те гипер-, супер- и нормосилиты – песчаники верхнего рифея и венда, а также среднерифейские алевролиты, что при литохимической аттестации отнесены нами к кластерам 1, 2 и 3 (соответственно кварцевые, олигомиктовые и аркозовые разности) демонстрируют схожие черты в распределении редких и рассеянных элементов (рис. 7), вне зависимости от предполагаемого литотипа (песчаник/алевролит) или типа цемента (карбонатизированные/не карбонатизированные разности). Это еще раз подтверждает предположение о том, что их следует рассматривать совместно.

Для песчаников и алевролитов характерно обогащение Co (2.4...19.3 UCC), но обеднение (как правило, <0.1 UCC) другими элементами-сидерофилами (V, Cr, Ni), а также сульффилами (Pb, за редким исключением – Cu, Zn) и некоторыми литофильными элементами, такими как Cs, Sr, Sn, Ga, Sc. При этом заметны несколько особенностей распределения элементов,

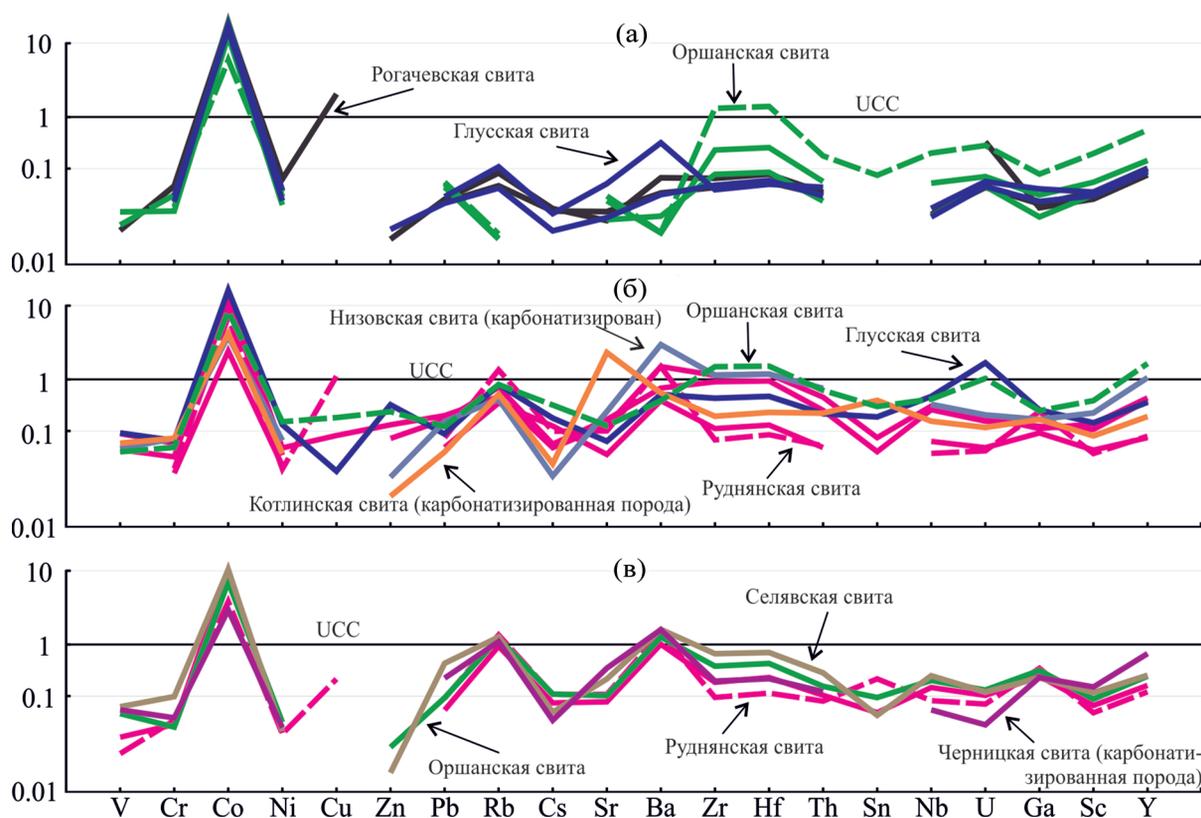


Рис. 7. Нормированное к UCC распределение редких и рассеянных элементов (кроме РЗЭ) в алевролитах рифея (пунктирные линии), песчаниках рифея и венда (сплошные линии). а – предполагаемые кварцевые, б – полевошпатово-кварцевые, в – аркозовые разности.

вполне объяснимые изменением минералогического состава. Первая – вариация содержания Rb, Nb и Ba от <0.1 UCC в предполагаемых кварцевых песчаниках до 1.0 UCC и немногим более в аркозах, что объясняется увеличением доли щелочных ПШ в них. Вторая – вариация концентраций Zr, Hf, Th и Y, не зависящая от возраста и предполагаемого петротипа, и, вероятно, отражающая изменчивое количество акцессорных минералов в породах. Обогащение некоторых образцов Cu, Zn и Sn мы склонны объяснять наличием пирита, возможно даже пиритового цемента, U – особенностями окислительно-восстановительных условий в системе “придонная вода–осадок”.

Аргиллиты и глинистые мелкозернистые алевролиты венда

При рассмотрении факторов обогащения тонкозернистых обломочных пород венда (рис. 8) в первую очередь следует отметить общие черты и наличие некоторых “аномалий” в выборке. Отметим, что последние в основном отвечают выпадающим и экстремальным значениям, а распределения редких и рассеянных элементов не всегда симметричны, поэтому далее в тексте мы нередко будем использовать термин “медианное значение”, более уместный для таких распределений. Всем образцам свойственно обеднение Cr (EF = 0.34...0.78), Ni (0.32...1.08), Pb (0.21...0.88) и Cs (0.12...0.94), и незначительное

обогащение Ga (<1.5). В целом, значения факторов обогащения перечисленными элементами для всех вендских свит сопоставимы.

Упомянутые в предыдущем разделе образцы Во-732 и Во-711 (лиозненская свита), а также Во-608 (черницкая свита) с высокими концентрациями P₂O₅ обогащены, в том числе умеренно, в сравнении с РААС, но весьма значительно по сравнению с другими образцами глинистых пород (см. рис. 8), средними и тяжелыми РЗЭ (соответственно СРЗЭ и ТРЗЭ; мы, вслед за авторами работы [Tostevin et al., 2016], понимаем под легкими РЗЭ (ЛРЗЭ) – La, Ce, Pr и Nd, СРЗЭ – Sm, Eu, Gd, Tb и Dy, ТРЗЭ – Ho, Er, Tm, Yb и Lu) и Y. При этом для образца Во-711, характеризующегося максимальным содержанием P₂O₅ (~2.8%), можно дополнительно наблюдать обогащение ЛРЗЭ, Sc и U. Из этой закономерности выбивается только обр. Lp-360 (котлинская свита, P₂O₅ = 0.52%), который лишен указанных выше черт, но при этом единственный среди всей выборки умеренно обогащен медью (EF_{Cu} = 3.4) и оловом (EF_{Sn} = 2.5). Объяснить подобную особенность можно присутствием в породах, например, сульфидов (пирита, халькопирита либо реже встречающихся минералов). Образец Во-685 низовской свиты, характеризующийся высокими концентрациями CaO, MnO и MgO, отличается и величинами EF = 2.5...5 для Co, Ba, Th, U, Nb и РЗЭ, и EF > 8 (!) для Zr и Hf. Далее речь пойдет о выборке, из которой

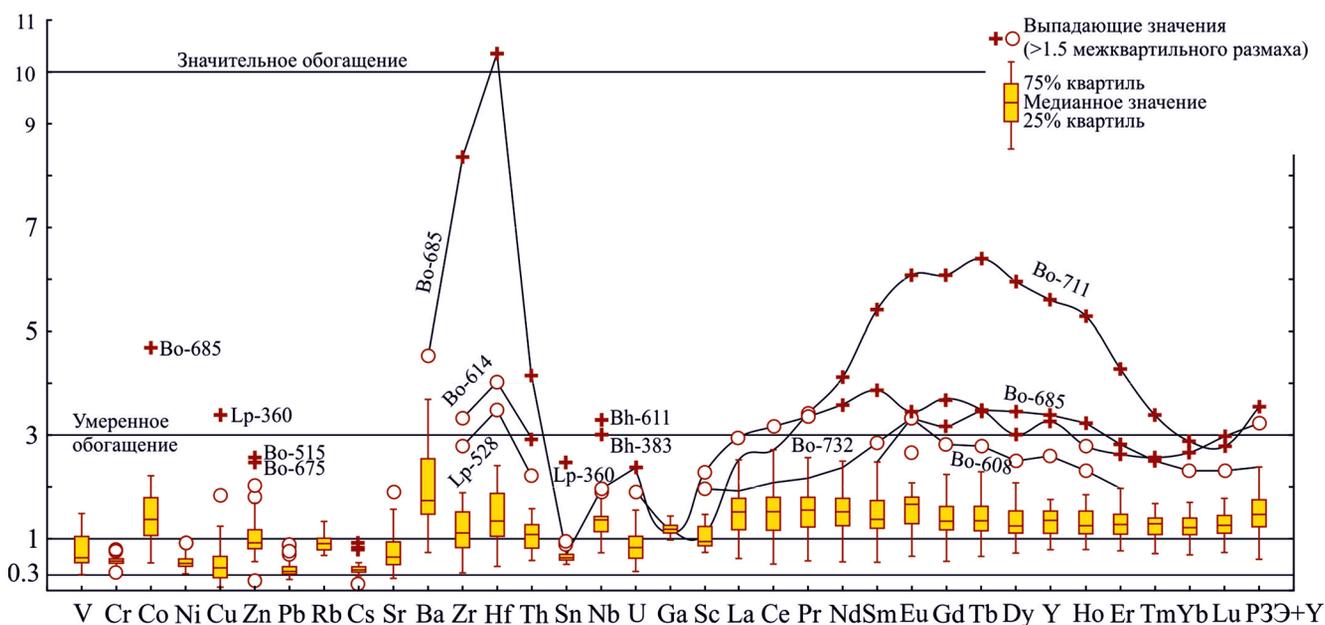


Рис. 8. Значения факторов обогащения редкими и рассеянными элементами глинистых пород и алевролитов венда (вся выборка). Градация “умеренное–значительное обогащение” приведена по [Tribovillard et al., 2006].

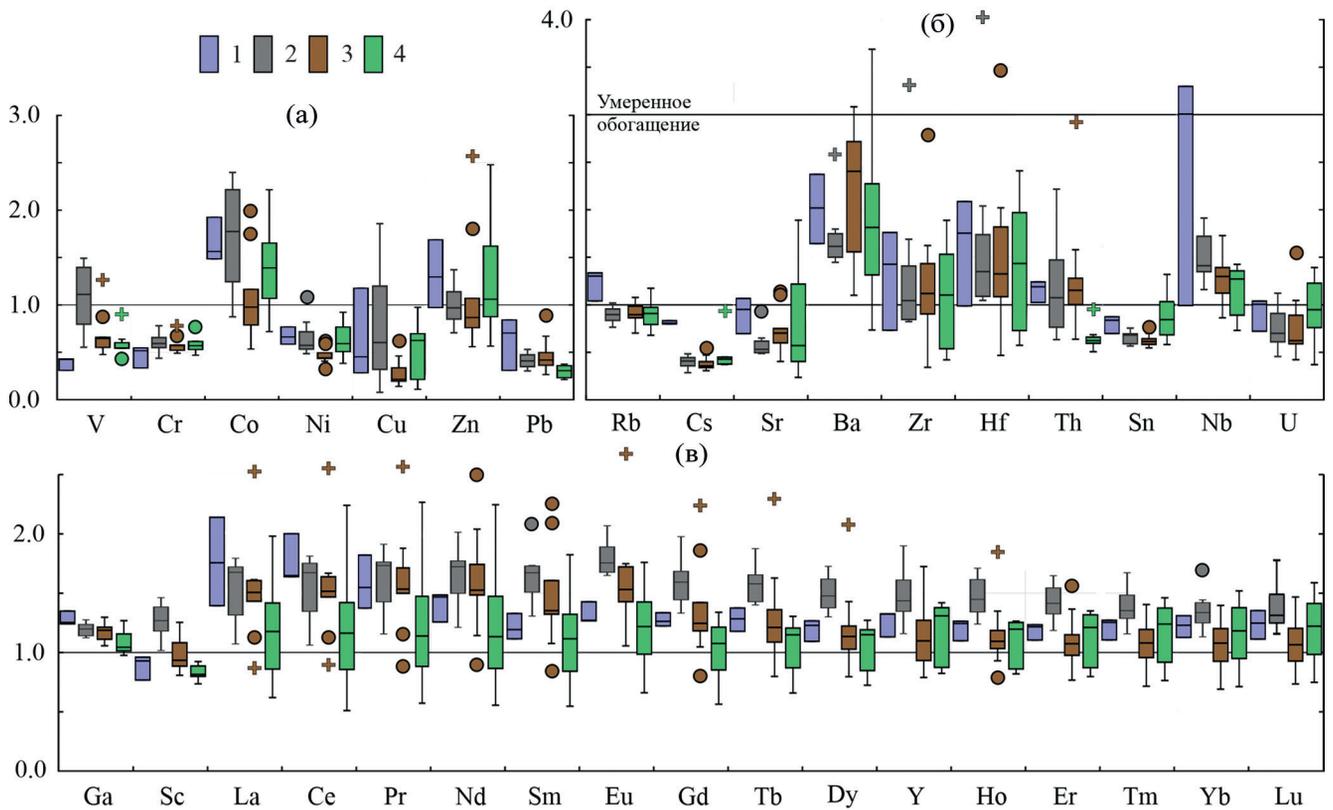


Рис. 9. Значения факторов обогащения редкими и рассеянными элементами глинистых пород и алевролитов венда (выборка без учета образцов с высоким содержанием CaO и P₂O₅, см. текст). 1 – глусская свита (n = 3); 2 – лукомская и лиозненская свиты (n = 8); 3 – редкинский стратиграфический уровень (n = 9); 4 – котлинская свита (n = 8).

исключены все перечисленные образцы (рис. 9, табл. 3).

Также обращают на себя внимание образцы тонкозернистых обломочных пород Во-614 (черницкая свита) и Лр-528 (лиозненская свита), обогащенные в 2.2–4 раза по сравнению с PAAS Zr, Hf и Th, образцы Вh-611 и Вh-383 (глусская свита), содержащие заметное количество Nb, а также образцы Во-675 (низовская свита) и Во-515 (котлинская свита) обогащенные Zn (см. рис. 8). Носителями Zr, Hf и Th в перечисленных образцах, вероятнее всего, являются акцессорные минералы. На это указывает положительная значимая корреляция Zr, Hf и Th с титаном (см. табл. 3). Содержание Nb (и, весьма ожидаемо, Rb) находится в прямой корреляции с концентрацией калия (КПШ и иллита).

Тонкозернистым обломочным породам глусской свиты свойственны (см. рис. 9) наименьшие медианные величины EF_V (<0.5). Они также отличаются отчетливым, хотя и незначительным, обогащением рубидием и умеренно обогащены Nd. По таким показателям,

как EF_{Zr} и EF_{Hf}, породы этой свиты характеризуются наибольшими медианными значениями (в среднем в 1.5 раза, тогда как другие свиты – близко к 1). Породы волынской серии незначительно обогащены V и Sc (EF до 1.5), а также отличаются большими (как правило, не только медианными) значениями EF для СРЗЭ и ТРЗЭ (не так ярко – Yb и Lu) и Y (см. рис. 9в), чем другие тонкозернистые образования венда из нашей пилотной коллекции. Здесь же следует подчеркнуть, что применительно к Ga, Sc, ЛРЗЭ и СРЗЭ существует тренд уменьшения медианных значений от пород волынской серии вверх по разрезу, тогда как для ТРЗЭ и Y указанный тренд нарушен повышением медианных значений для образцов котлинской свиты. При этом носителями ЛРЗЭ в глинистых породах, по всей видимости, являются в основном Ti-содержащие минералы, тогда как для СРЗЭ, Y и ТРЗЭ это не только они, но и фосфаты, а также некоторые глинистые Fe- и Mg-содержащие минералы, о чем может свидетельствовать наличие геохимически значимых корреляций (см. табл. 3).

Таблица 3. Геохимически значимые ($r \geq r_{0,05}$) корреляционные связи для различных компонентов и модулей аргиллитов и глинистых алевролитов венда ($n = 28$)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП	ГМ	ФМ	ТМ	ЖМ	НКМ	ШМ	КМ
SiO ₂																	
TiO ₂	-0.41			-0.81		-0.57	0.56			-0.67	-0.97	-0.88	0.85	-0.48	0.54	0.59	0.55
Al ₂ O ₃	-0.76							-0.49		0.63	0.80	0.47	-0.37		-0.84		-0.81
Fe ₂ O ₃ *	-0.81					0.65			0.42		0.83	0.98		0.87			
MnO																	0.42
MgO									0.55		0.52	0.72	0.63	0.60		0.94	
Na ₂ O																	
K ₂ O			-0.49							-0.55					0.84		0.89
P ₂ O ₅				0.42		0.55					0.62	0.46		0.46	-0.68		-0.67
ППП			0.63												-0.62		-0.62
ГМ			0.80			0.52				0.62	0.89			0.46			
ФМ			0.47			0.72			0.46	0.89				0.78			
ТМ		0.85	-0.37				0.63				0.46	0.78			0.37	0.60	
ЖМ		-0.48				0.60			0.46		-0.62		0.37				0.96
НКМ		0.54	-0.84					0.84		-0.68			0.60				
ШМ							0.94										
КМ		0.55	-0.81		0.42			0.89		-0.67	-0.62				0.96		
V		-0.65	0.42						0.42	0.49	0.61	0.54	0.41				-0.40
Cr		-0.62	0.77					-0.39		0.55	0.61				-0.57		-0.63
Co										-0.45							
Ni		-0.50	0.61			0.51				0.55	0.48	0.48	-0.38		-0.49		-0.44
Cu									0.48					0.47			
Zn										0.61							
Pb										0.58							
Rb							-0.50	0.41									
Sr												-0.45					-0.52
Zr		0.39															0.51
Hf		0.39															0.51

Таблица 3. Окончание

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	MnO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	ППП	ГМ	ФМ	ТМ	ЖМ	НКМ	ШМ	КМ
Th		0.45									0.67	0.47			-0.51		-0.42
Sn	-0.68		0.63	0.44				0.42		0.66				0.45	0.41		0.48
Nb					0.46												
Cs		-0.38	0.44				-0.53						-0.54			-0.52	
U														-0.40			
Ga	-0.88		0.86	0.66		0.43				0.56	0.92	0.74			-0.69		-0.66
Sc	-0.77	0.80	0.52	0.67		0.61			0.49		0.74	0.72	0.50	0.42		0.38	-0.42
ЛРЗЭ		0.47															
СРЗЭ	-0.55	0.64				0.49			0.64		0.50	0.46	0.38				
Y	-0.41	0.55				0.55			0.57		0.39	0.42					
ТРЗЭ	-0.48	0.66		0.40		0.44			0.46		0.48	0.48	0.46			0.38	-0.38

Для пород редкинского региояруса характерны, во-первых, наименьшие среди тонкозернистых обломочных пород венда значения факторов обогащения Co, Ni, Cu, Cs и Sn (за исключением некоторых образцов), во-вторых, наибольшие медианные значения EF_{Ва}. Котлинские глинистые алевролиты и аргиллиты отличаются широким разбросом величин EF (от в той или иной мере деплетированных до незначительно и умеренно обогащенных) для Co, Zn, Sr, Ba, Zr, Hf, Sn, U и РЗЭ.

Природа кластики, слагающей породы венда и рифея

Оценить природу материала (литогенный/петрогенный), слагающего представленные в нашей коллекции образцы песчаников и тонкозернистых обломочных пород, позволяют несколько подходов. Во-первых, в публикации [Юдович, Кетрис, 2000] показано, что если для той или иной выборки между модулями ТМ и ЖМ имеет место положительная корреляция, а между модулями НКМ и ГМ она отрицательная, то указанная выборка представлена породами петрогенными, т.е. прошедшими только один седиментационный цикл (выветривание → транспортировка → захоронение), и наоборот. И действительно, как для алевролитов и песчаников рифея (n = 13, r_{ТМ-ЖМ} = 0.38, r_{НКМ-ГМ} = -0.31), так и для вендских аргиллитов и глинистых алевролитов (n = 34, r_{ТМ-ЖМ} = 0.13, r_{НКМ-ГМ} = -0.60) существуют положительная и отрицательная корреляции между указанными модулями. Однако, на наш взгляд, они удовлетворяют критерию Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис лишь формально, так как только одна из перечисленных корреляционных связей (r_{НКМ-ГМ} = -0.60) для вендских тонкозернистых образований статистически значима.

Во-вторых, по представлениям [McLennan et al., 1993], соотношение в тонкозернистых обломочных породах Zr, Sc и Th также позволяет судить о природе слагающего их материала. По критериям, представленным в этой публикации, можно сделать вывод о том, что в составе всех образцов преобладает материал первого седиментационного цикла (рис. 10), что в отношении глинистых пород волынской и валдайской серий запада ВЕП не противоречит данным [Jewuła et al., 2022]. Исключения составляют несколько образцов песчаников и алевролитов руднянской и оршанской свит среднего рифея – их фигуративные точки на графике Zr/Sc–Th/Sc явно отклоняются от линии тренда вариации состава пород

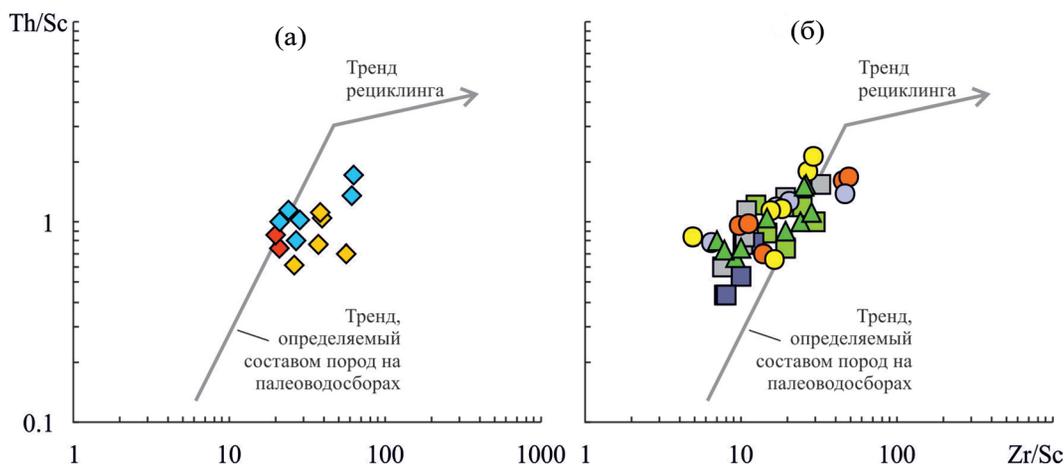


Рис. 10. Распределение точек состава песчаников, алевролитов и аргиллитов рифея (а) и венда (б) на диаграмме Zr/Sc–Th/Sc [McLennan et al., 1993].

Условные обозначения см. рис. 2.

источников сноса, что можно интерпретировать в пользу присутствия в них литогенной компоненты.

ВЫВОДЫ

Результаты, полученные при анализе положения фигуративных точек образцов обломочных пород нашей пилотной коллекции на различных диаграммах и при их геохимической аттестации по методике [Юдович, Кетрис, 2000], а также рассмотрение особенностей распределения редких и рассеянных элементов позволяют сделать следующие выводы.

Породы, визуально определенные при описании керна и отборе образцов как песчаники, являются петрогенными кварцевыми, полевошпатово-кварцевыми разностями и аркозами с различным содержанием литогенной примеси и различными типами цемента (в том числе карбонатным). Наличие литогенной примеси особенно характерно для пород руднянской и оршанской свит. При этом верхнерифейские (крупнозернистые?) алевролиты руднянской и рогачевской свит по своему геохимическому облику весьма похожи на одновозрастные песчаники, что дает основание при дальнейших исследованиях рассматривать их совместно. Каких-либо крупных закономерностей при рассмотрении состава песчаников разного возраста нами не обнаружено. Те же, что были отмечены, в основном связаны, по всей видимости, с вариациями содержания в них КПШ, акцессорных минералов и сульфидов.

Породы вендского возраста, визуально определенные при описании керна и отборе образцов

как алевролиты, в действительности содержат существенное количество глинистой компоненты и представляют собой петрогенные разнородные по составу глинистые (мелкозернистые?) алевролиты и аргиллиты — с преобладанием иллита, иллита и бертьерина, бертьерина, каолинита и смектита. Именно наличие бертьерина и оксигидроксидов железа, а не только хлорита, привело к увеличению фемичности нескольких образцов. В некоторых из тонкозернистых обломочных пород венда присутствует заметное количество сульфидов, карбонатной компоненты и/или акцессорного апатита (образцы с вышекларковым содержанием $P_2O_5 > 0.48\%$), который является носителем U и PЗЭ.

Петрогенный характер материала, слагающего большинство исследованных нами образцов обломочных пород пилотной коллекции, позволяет считать, что выводы относительно основных факторов формирования исходных для них осадков, полученные на основе использования разнообразных приемов и подходов из практики литогеохимических исследований, будут достаточно корректными.

Выявленные литогеохимические особенности песчаников, алевролитов и глинистых пород среднего рифея и венда определяют как возможности, так и некоторые ограничения при использовании их в дальнейших геохимических исследованиях. Например, наличие карбонатного цемента и бертьерина сужает возможность использования таких образцов при работе с диаграммами, “обученными” на петрогенных оксидах, а присутствие акцессорного апатита — ограничивает применение индикаторных

отношений, в формулы которых входят те или иные лантаноиды. В тоже время значительное количество глинистой компоненты в “алевролитах” и их петрогенная природа снимает ряд ограничений. Учитывая геохимические особенности свит, установленные при сопоставлении образцов со средним составом верхней континентальной коры и постархейским средним австралийским сланцем, наиболее подходящими при реконструкциях петрофонда будут индикаторы с использованием V, Cr, Ni, Rb, Zr, Hf, Th, Sc и некоторые РЗЭ, так как они демонстрируют наименьшую/умеренную дисперсию в выборке, то есть вариация их концентраций обусловлена в первую очередь составом петрофонда, а не особенностями среды седиментации.

БЛАГОДАРНОСТИ

При подготовке рукописи были учтены и добавлены в текст с соответствующими ссылками фрагменты, предложенные О.Ф. Кузьменковой и А.Г. Лапцевич. Авторы признательны Г.Д. Стрельцовой и С.С. Манкевичу за помощь при отборе образцов керн, а также анонимным рецензентам, замечания и предложения которых позволили улучшить стиль и подачу материала. Иллюстрации к статье подготовлены Н.С. Глушковой.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены в рамках государственного задания ГИН РАН (FMMG-2023-0004, геохимический анализ образцов пилотной коллекции), ИГГД РАН (FMUW-2021-0003, отбор образцов, их первичное описание, подготовка к аналитическим исследованиям, общая характеристика изученных разрезов) и ИГГ УрО РАН (FUMZ-2023-0008, интерпретация литохимических данных в рамках подходов, развиваемых при исследованиях по указанной теме).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бордон В.Е. Геохимия и металлоносность осадочного чехла Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1977. 216 с.
Голубкова Е.Ю., Кузьменкова О.Ф., Кушим Е.А. и др. 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. и др. Палеонтологическая характеристика верхневендских–нижнекембрийских отложений в разрезе скважины Северо-Полоцкая Восточно-Европейской платформы, Беларусь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2022. Т. 30. № 6. С. 3–20.

Геология Беларуси / Отв. ред. А.С. Махнач, Р.Г. Гарецкий, А.В. Матвеев. Минск: Институт геологических наук НАН Беларуси, 2001. 815 с.

Интерпретация геохимических данных / Отв. ред. Е.В. Скляр. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.

Зайцева Т.С., Кузьменкова О.Ф., Кузнецов А.Б. и др. U–Th–Pb возраст детритового циркона из рифейских песчаников Вольно-Оршанского палеопргиба, Беларусь // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2023. Т. 31. № 5. С. 42–62.

Кузьменкова О.Ф., Лапцевич А.Г., Глаз Н.В. К вопросу о бортниковской свите среднего рифея Беларуси // Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика // Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. СПб.: Свое издательство, 2019. С. 122–124.

Кузьменкова О.Ф., Лапцевич А.Г., Кузнецов А.Б. и др. Актуальные вопросы стратиграфии рифея и венда Вольно-Оршанского палеоавлакогена запада Восточно-Европейской платформы // Этапы формирования и развития протерозойской земной коры: стратиграфия, метаморфизм, магматизм, геодинамика // Материалы VI Российской конференции по проблемам геологии и геодинамики докембрия. СПб.: Свое издательство, 2019. С. 125–127.

Лапцевич А.Г., Голубкова Е.Ю., Кузьменкова О.Ф. и др. Котлинский горизонт верхнего венда Беларуси: литологическое расчленение и биостратиграфическое обоснование // Літасфера. 2023. № 1(58). С. 17–25.

Махнач А.С. Стратиграфическая схема верхнего докембрия Белоруссии // Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности БССР. М.: Недра, 1966. С. 210–236.

Махнач А.С., Веретенников Н.В., Шкуратов В.И. Стратиграфия верхнепротерозойских отложений Белоруссии // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1975. № 3. С. 90–103.

Махнач А.С., Веретенников Н.В., Шкуратов В.И., Бордон В.Е. Рифей и венд Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1976. 360 с.

Махнач А.С., Ольховик Е.Т., Бордон В.Е. Геохимия венда Белоруссии. Минск: Наука и техника, 1982. 150 с.

Палеогеография и литология венда и кембрия запада Восточно-Европейской платформы / Отв. ред. Б.М. Келлер, А.Ю. Розанов. М.: Наука, 1980. 118 с.

Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов / Отв. ред. В.Н. Шванов. СПб.: Недра, 1998. 352 с.

- Стратиграфические схемы докембрийских и фанерозойских отложений Беларуси. Объяснительная записка. Минск: ГП “БелНИГРИ”, 2010. 282 с.
- Стрельцова Г.Д., Лапцевич А.Г., Кузьменкова О.Ф.* О рифейских отложениях восточной части Беларуси // Материалы VI международной научно-практической конференции “Актуальные проблемы наук о Земле: исследования трансграничных регионов”. Брест: БГУ им. А.С. Пушкина, 2023. С. 200–203.
- Юдович Я.Э.* Хорошо забытое старое: размышления об инфильтрационном эпигенезе // Вестник Института геологии Коми научного центра Уральского отделения РАН. 2007. № 5. С. 25–33.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В.* Геохимия фосфора. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020. 512 с.
- Barth M.G., McDonough W.F., Rudnick R.L.* Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust // *Chem. Geol.* 2000. V. 165. P. 197–213.
- Cullers R.L.* Mineralogical and chemical changes of soil and stream sediment formed by intense weathering of the Danberg granite, Georgia, USA // *Lithos.* 1988. V. 21. P. 301–314.
- Cullers R.L., Barrett T., Carlson R., Robinson B.* Rare-earth element and mineralogic changes in Holocene soil and stream sediment: a case study in the Wet Mountains, Colorado, USA // *Chem. Geol.* 1987. V. 63. P. 275–297.
- Cullers R.L., Basu A., Suttner L.J.* Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root Batholith, Montana, USA // *Chem. Geol.* 1988. V. 70. P. 335–348.
- Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments* / Ed. D.R. Lentz. St. Jones, NL: Geol. Ass. Canada, 2003. GeoText 4. 184 p.
- Herron M.M.* Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // *J. Sed. Petrol.* 1988. V. 58. P. 820–829.
- Jewuła K., Środoń J., Kędzior A. et al.* 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.
- Kuzmenkova O.F., Laptsevich A.G., Streltsova G.D., Minenkova T.M.* Riphean and Vendian of the conjugation zone of the Orshanskaya Depth and the Zlobin Saddle (Bykhovskaya parametric borehole) // Материалы международной научной конференции “Проблемы геологии Беларуси и смежных территорий”, посвященной 100-летию со дня рождения академика НАН Беларуси А.С. Махнач. Минск: СтроймедиаПроект, 2018. P. 101–105.
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Graunov O.V.* Provenances of fine-grained almosiliciclastic material for the Vendian and Early Cambrian sedimentary rocks of the west of the East European Plate: some lithogeochemical constraints // *Stratigraphy and Geological Correlation.* 2024. V. 32. № 1. P. 1–20.
- McLennan S.M.* Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements* / Eds B.R. Lipin, G.A. McKay // *Rev. Mineral. Geochem.* 1989. V. 21. P. 169–200.
- 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 M.J. Johnsson, A. Basu // *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 1993. № 284. P. 21–40.
- 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.
- Paszkowski M., Budzyn B., Mazur S. et al.* 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.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R.* Sand and Sandstone / Second edition. New York, Berlin, Heidelberg, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1976. 560 p.
- Pourmand A., Dauphas N., Ireland T.J.* A novel extraction chromatography and MC–ICP–MS technique for rapid analysis of REE, Sc and Y: Revising CI–chondrite and Post–Archean Australian Shale (PAAS) abundances // *Chem. Geol.* 2012. V. 291. P. 38–54.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the continental crust // *The crust* / Eds R.L. Rudnick, H.D. Holland, K.K. Turekian // *Treatise on geochemistry.* V. 3. Oxford: Elsevier Pergamon, 2003. P. 1–64.
- Roy D.K., Roser B.P.* Climatic control on the composition of Carboniferous–Permian Gondwana sediments, Khalaspir basin, Bangladesh // *Gondwana Res.* 2013. V. 23. P. 1163–1171.
- Srodon J., Gerdes A., Kramers J., Bojanowski M.J.* 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.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.
- Tostevin R., Shields G.A., Tarbuck G.M. et al.* Effective use of cerium anomalies as a redox proxy in carbonate-dominated marine settings // *Chem. Geol.* 2016. V. 438. P. 146–162.
- Tribovillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A.* Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: An update // *Chem. Geol.* 2006. V. 232. P. 12–32.

van de Kamp P.C. Potassium distribution and metasomatism in pelites and shists: how and when? Relation to postdepositional events // *J. Sediment. Res.* 2016. V. 86. P. 683–711.

van der Weijden C.H. Pitfalls of normalization of marine geochemical data using a common divisor // *Mar. Geol.* 2002. V. 184. P. 167–187.

LITHOGEOCHEMISTRY OF UPPER PRECAMBRIAN TERRIGENOUS ROCKS OF BELARUS. COMMUNICATION 1. BULK CHEMICAL COMPOSITION, GENERAL FEATURES AND ANOMALIES

A. V. Maslov¹ *, O. Yu. Melnichuk², A. B. Kuznetsov³, V. N. Podkovyrov³

¹*Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

²*Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch of RAS, Acad. Vonsovsky str., 15, Yekaterinburg, 620110 Russia*

³*Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Makarov emb., 2, St. Petersburg, 199034 Russia*

*e-mail: amas2004@mail.ru

The first of two publications is devoted to the lithogeochemical features study of the pilot collection of the Upper Precambrian sandstones and siltstones samples, selected from four boreholes: Bogushevskaya 1, Bykhovskaya, Lepel 1 and Korminskaya (Belarus). This article analyzes the general features of their bulk chemical composition and shows the possibilities and limitations for further reconstructions. It has been established that the Riphean and the Vendian rocks included in the pilot collection, visually identified as sandstones, are actually quartz, feldspathic-quartz and arkose varieties with different cement types. The Vendian “siltstones” in their geochemical characteristics correspond to coarse- and fine-grained siltstones and, to a greater extent, mudstones with a predominance of illite, as well as various admixtures of berthierine, kaolinite and smectite. Considering the trace elements enrichment factors of these rocks a number of dissimilarities were identified, caused both by the source rocks composition and sedimentary environments changes. The data point position of the studied samples on the Zr/Sc–Th/Sc diagram suggests that the composition of all the Riphean and the Vendian rocks is dominated by first sedimentation cycle material. This suggests that the lithogeochemical characteristics of the rocks of the pilot collection quite correctly reflect similar features of the source rock complexes and can be used to reconstruct the paleogeodynamic and paleoclimatic factors that controlled the accumulation of the Riphean and the Vendian sedimentary sequences of Belarus.

Keywords: Riphean, Vendian, sandstones, siltstones, claystones, lithogeochemical features, East European Platform, Belarus