

УДК 551

## ГЕОХИМИЯ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД ВЕРХНЕГО ВЕНДА–НИЖНЕГО КЕМБРИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МОСКОВСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ (НЕКОТОРЫЕ ТРАДИЦИОННЫЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ)

© 2023 г. А. В. Маслов<sup>а</sup>, \*, В. Н. Подковыров<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Геологический институт РАН,

Пыжневский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

<sup>б</sup>Институт геологии и геохронологии докембрия РАН,

наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

\*e-mail: amas2004@mail.ru

\*\*e-mail: vpodk@mail.ru

Поступила в редакцию 22.09.2022 г.

После доработки 21.12.2022 г.

Принята к публикации 09.01.2023 г.

В статье обсуждаются некоторые геохимические характеристики глинистых пород верхнего венда и нижнего кембрия Московской синеклизы. Показано, что в течение рассматриваемых нами нескольких десятков миллионов лет геологической истории существенного изменения состава глинистых пород не произошло. Исходя из свойственных аргиллитам и аргиллитоподобным глинам величин Zr/Sc и Th/Sc, обоснована петрогенная природа слагающей их тонкой алюмосиликокластики. Этот вывод подтверждается и значениями отношения CIA/WIP. В целом, по одним параметрам своего состава глинистые породы верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы ближе к гранитоидам, по другим – к магматическим породам основного состава. Так, по сравнению со средними позднепротерозойскими базальтами в них содержится заметно больше K<sub>2</sub>O и Rb, Th, Zr, Hf, Nb и Ta, а средние гранитоиды архея обладают заметно более низкими концентрациями TiO<sub>2</sub>, FeO и MgO, Sc, V, Cr, Co и Ni. Положение точек состава глинистых пород верхнего венда и нижнего кембрия на диаграммах La/Sc–Th/Co, La/Th–Th/Yb, Sc–Th/Sc и других графиках подтверждает сказанное. Нормированные на хондрит спектры распределения лантаноидов в глинистых породах близки к спектру лантаноидов PAAS. Высказано предположение, что транспортировка взвешенного материала в область осадконакопления осуществлялась: 1) крупными реками с водосборами, сложенными различными по составу комплексами пород, и 2) реками, дренировавшими водосборы, сложенные преимущественно осадочными породами. Присущие глинистым породам верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы значения CIA<sub>среднее</sub> сопоставимы с теми, что характерны для взвеси современных крупных рек гумидного субтропического и тропического климата, а также рек районов сухого тропического климата. Локализация фигуративных точек аргиллитов и аргиллитоподобных глин на диаграммах SiO<sub>2</sub>–(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + MgO + CaO), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + MgO + CaO) и CIA–WIP позволяет думать, что именно палеоклимат определял основные характеристики их состава. Свойственный для глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы ряд α-коэффициентов достаточно близок к аналогичному ряду для тонких взвесей крупных современных речных систем юга Африки.

**Ключевые слова:** глинистые породы, Московская синеклиза, геохимия, основные особенности накопления осадочных последовательностей верхнего венда и нижнего кембрия.

**DOI:** 10.31857/S0024497X2370009X, **EDN:** BUFBGD

Одним из основных факторов, определяющих облик осадочных ассоциаций является, как известно, климат, в значительной степени контролирующей особенностью дифференциации вещества в экзогенезе [Страхов, 1963, 1968 и др.; Жарков, 1978 и др.; Монин, Шишков, 1979; Сеницын, 1980; Ронов, Балуховский, 1981; Методы ..., 1985; Ясаманов, 1985; Климат ..., 2004; Чумаков, 2015 и др.]. Настоящая публикация продолжает исследование

авторов по проблеме палеоклиматических реконструкций позднего докембрия на основе литогеохимических подходов и методов [Маслов и др., 2003, 2016; Маслов, 2010а, 2010б, 2022; Подковыров и др., 2015, 2022; Котова и др., 2016; Подковыров, Маслов, 2022; Маслов, Подковыров, 2023 и др.]. В ней мы с определенной долей условности попытались применить комплекс приемов, используемых в настоящее время при

исследовании тонкозернистых алюмосиликокластических/пелитовых осадков современных крупных аллювиальных систем Африки, Китая, Индостана и ряда других регионов мира.

Известно, что в континентальных обстановках отложения таких систем, в том числе и тонкозернистые, представлены, как правило, материалом, минеральный и химический состав которого интегрирует параметры и современного и предшествующего (в случаях присутствия на палеоводосборах осадочных или метаосадочных пород) выветривания, а также переработки осадков после их накопления [Gaillardet et al., 1999; Viers et al., 2009; Garzanti et al., 2013a; Dellinger et al., 2014; Garzanti, Resentini, 2016; Guo et al., 2018; Dinis et al., 2020]. Формирование состава тонкозернистых терригенных речных отложений контролируется совокупностью разнообразных (состав пород на палеоводосборах, рециклинг, привнос материала из различных климатических зон, постседиментационные трансформации и др.) факторов [Johnsson, 1993; Fedo et al., 1995; Borges et al., 2008; Jury, 2010; Garzanti et al., 2013a, 2013b, 2014, 2022; Setti et al., 2014; van der Lubbe et al., 2016; Allen, 2017 и др.]. Вычленение последнего климатического сигнала из их общей цепочки, несмотря на довольно длительную уже историю рассмотрения этой проблемы, все еще считается весьма сложной задачей осадочной геохимии [Cox et al., 1995; Gaillardet et al., 1999; Garzanti et al., 2014, 2021, 2022 и др.; Dinis et al., 2020; Cruz et al., 2022]. Тем не менее, речные тонкозернистые алюмосиликокластические отложения (как и тесно связанные с ними осадки приустьевоего взморья, прибрежно- и мелководно-морские отложения), рассматриваются в последние десятилетия как “превосходные архивы среды геологического прошлого”, содержащие в своем минеральном, химическом и изотопном составе соответствующие времени их накопления палеоклиматические записи [Porter, 2001; Yang et al., 2004; Garzanti et al., 2014 и др.; Schatz et al., 2015; Dinis et al., 2017, 2020; Guo et al., 2018; He et al., 2020 и др.]. В связи с этим интерес исследователей к комплексному изучению современных осадков крупных речных систем Африки и ряда других регионов, дренирующих в условиях заметно варьирующего климата разнообразные по составу слагающих их комплексов пород водосборы, в последние годы заметно вырос [Dupré et al., 1996; Le Pera et al., 2001; Singh, 2009; Garzanti et al., 2011, 2013a, 2013b, 2014, 2018, 2021a, 2021b и др.; Garçon, Chauvel, 2014; Just et al., 2014; Setti et al., 2014; van der Lubbe et al., 2014, 2016; Vezzoli et al., 2016; Maharana et al., 2018; Dinis et al., 2020; He et al., 2020; Cruz et al., 2021, 2022 и др.]. Разработанные в рамках этих работ подходы к изучению континентальных осадков и полученные результаты, некоторые из которых рассматриваются нами да-

лее, способствовали формированию новых направлений исследования влияния климата на процессы формирования внутриконтинентальных и прибрежных осадков. Что касается традиционно используемых для этих целей морских осадочных последовательностей, то в последнее время появилась точка зрения, что в морских обстановках современный климатический сигнал может быть потерян и в тонкозернистых/глинистых осадках, так как разделение минералов по морфологии и другим параметрам, смешение материала из областей различного климата, а также аутигенез в той или иной степени изменяют их состав [Thiry, 2000; Borges et al., 2008; Garzanti et al., 2011, 2014 и др.; von Eynatten, 2012, 2016; Dinis et al., 2020 и ссылки в этих работах].

### ОСОБЕННОСТИ ТОНКОЙ ВЗВЕСИ РЕК ЮГА АФРИКИ (КРА ТКЙ ОБЗОР)

Юг Африки характеризуется хорошо выраженными долготными (от субгумидного Мозамбика до гипераридной Намибии) и широтными (от влажной Анголы до засушливой Ботсваны) климатическими градиентами [McCarthy et al., 2000; Jury, 2010; Garzanti et al., 2014]. Текущие здесь реки выносят в прибрежные районы Атлантического и Индийского океанов громадные объемы кластики. Так, только р. Оранжевая каждый год поставляет на атлантическую окраину Африки порядка 60.000.000 т взвешенного и влекомого материала [Compton, Maake, 2007]. Длительная механическая обработка такого материала в речных и прибрежных, в том числе высокоэнергетических литоральных, обстановках как выясняется не сильно меняют его состав и свойства [Garzanti et al., 2015]. В результате мелководно-морские осадки могут сохранять характеристики, приобретенные ими на суше. На это, в частности, указывают результаты исследования отложений, распространенных на юго-восточном побережье Африки [Hahn et al., 2018 и ссылки в этой работе].

Крупнейшая река юга Африки – Замбези (длина 2575 км, площадь водосбора –  $1.4 \times 10^6$  км<sup>2</sup>). Она дренирует кристаллические породы, плато-базальты надсерии Кару, а также течет среди песков пустыни Калахари. В ее верхнем течении в составе тонкой взвеси присутствует много кварца и калиевого полевого шпата, встречаются плагиоклазы. Глинистая фракция включает смектит (преобладает, содержание растет вниз по реке), каолинит и иллит. Содержание большинства редких и рассеянных элементов в этой взвеси вследствие разбавляющего эффекта кварца [Garzanti et al., 2022] обеднено относительно верхней континентальной коры (UCC) и среднего постархейского австралийского глинистого сланца (PAAS). В среднем течении р. Замбези в составе тонкой взвеси увеличивается доля плагиоклаза и оксидов Fe,

снижается количество каолинита; наблюдается рост содержания Fe, Mg, Ca, Na, Sr, Ti, Eu, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu и P, что связано с эрозией основных вулканических пород ниже водопада Виктория. По данным [Garzanti et al., 2022], тонкая (<32 мкм) взвесь в верховьях р. Замбези характеризуется значением химического индекса изменения (CIA) 83; выше водопада Виктория величина CIA равна всего 62. В среднем ее течении значение CIA тонкой взвеси составляет порядка 69, а в нижнем – около 71.

Истоки р. Окаванго (длина 1600 км,  $8 \times 10^5$  км<sup>2</sup>) расположены во влажном поясе, а оканчивается река в пустыне Калахари самой крупной в мире внутриконтинентальной дельтой, состоящей из сезонно затапливаемых равнин, многочисленных проток и болот [Gumbrecht et al., 2004]. Площадь дельты р. Окаванго составляет порядка 15.000 км<sup>2</sup>, увеличиваясь во время паводков до 20.000 км<sup>2</sup> (это примерно 4–5% площади рассматриваемой нами в настоящей работе Московской синеклизы). Тонкая взвесь р. Окаванго содержит много кварца и калиевого полевого шпата; плагиоклаз играет подчиненную роль. Иногда наблюдается кальцит, заимствованный, вероятно, из почв с высоким его содержанием. Среди глинистых минералов преобладает смектит (количество его возрастает вниз по реке), присутствуют каолинит и иллит. Из-за разбавления кварцем большинство редких и рассеянных элементов деплетировано относительно UCC и PAAS [Garzanti et al., 2014].

Река Оранжевая (2430 км,  $\sim 10^6$  км<sup>2</sup>) протекает преимущественно по областям засушливого климата. В ее верховьях на водосборах распространены терригенные породы и базальты надсерии Кару. Главный приток, р. Вааль (1460 км), течет по породам неоархея и палеопротерозоя. Ниже его впадения р. Оранжевая пересекает мезопротерозойские метаосадочные и метавулканические породы [Besker et al., 2006]. В тонкой взвеси р. Оранжевой преобладают продукты эрозии глинистых пород надсерии Кару [Compton, Maake, 2007; Garzanti et al., 2014], и доминирует иллит. Среднее значение CIA для нее, рассчитанное по данным публикаций [Konta, 1985; Савенко, 2006], составляет 57.

Южные притоки р. Лимпопо (длина 1750 км,  $4.4 \times 10^5$  км<sup>2</sup>) дренируют докембрийский кратон Каапвааль, а северные – кратон Зимбабве, осадочные образования и плато-базальты надсерии Кару. В Мозамбике в Лимпопо впадает Слоновая река (560 км), пересекающая палеопротерозойский комплекс Бушвельд. Эти реки несут тонкую взвесь, богатую Fe, Mg, Ca, Sc, Cr, Mn, Co, Ni и Cu, что связано с преимущественным размывом магматических пород основного состава. Взвесь р. Лимпопо также богата Na, K, Sr, Ba и Ti. Значение

CIA для тонкой взвеси Слоновой реки составляет  $\leq 50$  (!), а для такого же материала р. Лимпопо – в среднем 60. Взвесь некоторых притоков р. Лимпопо, размывающих породы кристаллического фундамента, характеризуется величинами CIA  $\sim 70$  [Garzanti et al., 2014].

В Намибии реки, как правило, эфемерны и часто переживают многолетние засухи. Дренируемые ими водосборы сложены плато-базальтами надсерии Кару, метаморфическими мезопротерозойскими породами и осадочными породами неопротерозоя–кембрия. Размываются также разновозрастные гранитные интрузии. В тонкой взвеси преобладает иллит (80–87%), подчиненную роль играют каолинит (9–11%) и смектит (4–9%). Реки северной Намибии эродированы плато-базальты Этендека и кварцевые латиты. Среди глинистых минералов в их тонкой взвеси преобладает смектит. Значения CIA варьируют от 43 до 76, а средние значения химических индексов (CIA<sub>среднее</sub>  $53 \pm 9$ , WIP<sup>1</sup><sub>среднее</sub>  $58 \pm 8$ ) отражают незначительную интенсивность выветривания. В целом, в южной части Африки в тонких речных взвесах наблюдается слабо выраженное деплетирование щелочных и щелочноземельных металлов по сравнению с реками экваториальных районов [Garzanti et al., 2013a, 2013b, 2014].

На примере речных систем юга Африки хорошо видно, что любой крупный водосборный бассейн включает различные комплексы пород-источников тонкой алюмосиликокластики, в том числе осадочные толщи, прошедшие один или несколько циклов осадконакопления. В результате, минеральный и химический состав новообразованного детрита отражает и современный и предыдущий режимы выветривания. Для их разделения авторы публикаций [Garzanti et al., 2014, 2022 и др.] используют результаты анализа величин WIP, CIA и  $\alpha$ . При добавлении в осадок кварца (рециклированный материал, источник его в основном ископаемые дюны Калахари) значения WIP линейно уменьшаются, а величины CIA и  $\alpha$  не меняются [Garzanti et al., 2013a, 2013b]. Для тонкой взвеси рек Окаванго и Замбези такой подход позволяет выявить ассимиляцию неоднократно рециклированного материала (для взвеси первого седиментационного цикла значения CIA/WIP варьируют от 0.6 для рек засушливой Намибии до 1...2 для р. Лимпопо, водосборы которой находятся в основном в субгумидном климате).

При исследовании современных осадков крупных речных систем Африки и других регионов зарубежные авторы часто используют индексы выветривания ( $\alpha_E$ ) для подвижных элементов (E).

<sup>1</sup> WIP – индекс выветривания Паркера ( $100 \times (\text{Na}/0.35 + \text{Mg}/0.9 + \text{K}/0.25 + \text{Ca}/0.7)$ ) [Parker, 1970].

Впервые эти параметры появились в публикации [Gaillardet et al., 1999]. Они рассчитываются на основе сравнения концентраций подвижных элементов с концентрацией какого-либо немобильного элемента (Al, Ti, Th, Sm или Nd) с аналогичными свойствами в образце и в верхней континентальной коре (UCC). Позднее в работе [Garzanti et al., 2010] было показано, что индексы выветривания, рассчитываемые не по Al, сильно зависят от процессов гидравлической сортировки, поэтому Э. Гарзанти с соавторами предложили рассчитывать такие индексы только с использованием Al ( $\alpha^{AlE} = [Al/E]_{образец}/[Al/E]_{UCC}$ ) [Garzanti et al., 2013a, 2013b; Guo et al., 2018; Маслов, Подковыров, 2023]. При значениях  $\alpha^{AlE} > 1$  содержание элемента E обеднено относительно UCC, при  $\alpha^{AlE} < 1$  — обогащено. Тонкая речная взвесь в реках юга Африки наиболее сильно деплетирована на Na (величины  $\alpha^{AlNa}$  в ней в засушливой Намибии варьируют от 2 до 5; во взвеси рек Лимпопо и Замбези они составляют 3...10, а во взвеси Верхней Замбези и Окаванго — 13...28) [Garzanti et al., 2013a]. Значения  $\alpha^{AlSr}$  в среднем выше, чем  $\alpha^{AlK}$  и  $\alpha^{AlCa}$ . Величины  $\alpha^{AlBa}$ ,  $\alpha^{AlMg}$  и  $\alpha^{AlRb}$  редко превышают 2, указывая на незначительное деплетирование названных элементов. Таким образом, наблюдается достаточно типичная для многих районов последовательность подвижности различных компонентов осадков:  $\alpha^{AlNa} \gg \alpha^{AlSr} > \alpha^{AlK} > \alpha^{AlCa} > \alpha^{AlBa} > \alpha^{AlMg} \geq \alpha^{AlRb} \geq \alpha^{AlCs}$  [Gaillardet et al., 2003; Bouchez et al., 2011; Garzanti et al., 2014].

С учетом всего сказанного выше в настоящей работе на основе данных о содержании порообразующих оксидов (банк данных “PRECESED”, ИГГД РАН, г. Санкт-Петербург) и впервые полученных сведений о распределении редких и рассеянных элементов в глинистых породах верхнего венда—нижнего кембрия Московской синеклизы мы вновь обращаемся к реконструкции состава пород на палеоводосборах, а также анализу взаимоотношений процессов выветривания и рециклинга при формировании указанной осадочной последовательности. К сожалению, эти, весьма актуальные в настоящее время в мире вопросы осадочной геологии, в отечественной литературе практически не рассмотрены. Данная публикация — попытка в какой-то мере восполнить указанный пробел.

#### ЛИТОСТРАТИГРАФИЯ ВЕРХНЕГО ВЕНДА—НИЖНЕГО КЕМБРИЯ, СОСТАВ ГЛИНИСТЫХ ПОРОД И ОБСТАНОВКИ ИХ НАКОПЛЕНИЯ

Валдайская серия верхнего венда, в соответствии с работой [Вендская ..., 1985], объединяет плетневскую, усть-пинезскую, любимскую и

решминскую свиты (рис. 1). Плетневская свита (мощность до 50 и более м) сложена гравелитами, грубо- и мелкозернистыми пестроцветными песчаниками, алевролитами и темно-серыми черными аргиллитами. Она несогласно перекрывает кристаллические породы фундамента Восточно-Европейской платформы (ВЕП) и рифейские отложения авлакогенов, но принадлежность ее к верхнему венду дискуссионна. Усть-пинезская свита (300—400 м) представлена темными зеленовато-серыми и серыми, а также шоколадно-коричневыми аргиллитами, среди которых можно видеть прослои и пакеты сероцветных алевролитов и песчаников. Свита трансгрессивно перекрывает породы фундамента ВЕП, рифея и плетневской свиты. Плетневская и усть-пинезская свиты отвечают редкинскому горизонту верхнего венда. Любимская свита (до 480 м) объединяет песчаники и алевролиты, гравелиты и конгломераты, а также аргиллиты зеленовато- и темно-серой или пестрой окраски. В центральной части Московской синеклизы она залегает согласно на породах усть-пинезской свиты, а к ее бортам переходит на породы кристаллического фундамента, срезая подстилающие образования [Вендская ..., 1985]. Решминская свита (до 230 м и более) сложена красно- и пестроцветными песчаниками, алевролитами, аргиллитами и аргиллитоподобными глинами. В нашей выборке решминская свита образцами не представлена. Любимская и решминская свиты принадлежат котлинскому горизонту. На решминской свите несогласно залегают породы некрасовской свиты (10...20—100 м) ровенского горизонта балтийской серии. Свита сложена пестро- и красноцветными песчаниками, пачками переслаивания алевролитов и глинистых пород [Государственная ..., 2016]. Образцами в нашей коллекции она не представлена.

В Объяснительной записке к стратиграфической схеме вендских отложений Московской синеклизы [Кузьменко, Бурзин, 1996] усть-пинезская свита была разделена на три свиты — гаврилов-ямскую, непейцинскую и макарьевскую, а нижняя подсвита любимской свиты включена в состав макарьевской. Примерно также принимается верхний венд в Объяснительной записке к Государственной геологической карте масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение) листа О-37 (Ярославль) [Государственная ..., 2016] (см. рис. 1).

Венд согласно перекрыт лежской свитой (40...>100 м) нижнего кембрия [Государственная ..., 2016], представленной зеленовато-, голубовато- и темно-серыми, а также красноцветными глинистыми породами; в нижней ее части можно видеть алевролиты и песчаники с глауконитом. На лежской свите согласно залегает галичская свита (20...100 и более м) нижнего кембрия, объединяющая зеленовато- и голубовато-серые ар-

Вендская ..., 1985			Государственная ..., 2016		
Верхний венд	Ровенский горизонт	Некрасовская свита	Верхний венд	Лонтоваский горизонт	Галичская свита
	Котлинский горизонт	Решминская свита		Ровенский горизонт	Лежская свита
		Любимская свита		Котлинский горизонт	Некрасовская свита
	Редкинский горизонт	Усть-пинезская свита		Редкинский горизонт	Решминская свита
Редкинский горизонт			Любимская свита		
			Макарьевская свита		
	Плетеневская свита	Непейцинская свита			
Гаврилов-ямская свита					
Плетеневская свита					

**Рис. 1.** Стратиграфическое расчленение верхнего венда и нижнего кембрия Московской синеклизы, по данным [Вендская ..., 1985; Государственная ..., 2016]. Возраст границы венда и кембрия указан в млн лет. Серые прямоугольники справа – интервалы разреза, глинистые породы которых охарактеризованы аналитическими данными.

гиллиты и аргиллитоподобные глины, а в нижней части алевролиты и песчаники с глауконитом.

Авторы объяснительной записки к карте докембрийских формаций Русской платформы и ее обрамления [Карта ..., 1983] отметили, что породы решминской свиты содержат трещины усыхания, глиняные катуны, аутигенный барит, псевдоморфозы по галиту, характеризуются загипсованностью отдельных горизонтов и косой слоистостью. Очевидно, что решминский уровень вряд ли сложен бассейновыми образованиями.

По данным Е.М. Аксенова [1985 и ссылки там], накопление усть-пинезской и любимской свит происходило преимущественно в мелководно-морских обстановках. Границы современного распространения названных свит являются почти повсеместно эрозионными. Для решминского времени характерна прибрежно- и мелководно-морская седиментация, а также накопление континентальных осадков. Это дает основание думать, что область осадконакопления указанного времени мере могла быть похожа на громадную дельту р. Окаванго, или несколько таких дельт. Наличие в породах нижнего кембрия глауконита предполагает их мелководно-морской генезис.

По представлениям авторов работы [Кузьменко и др., 1996], в начале гаврилов-ямского времени на большей части территории Московской синеклизы установился бассейновый режим и накапливались преимущественно тонкозернистые терригенные осадки. В непейцинское время произошло некоторое сокращение акватории, однако, в течение всего названного времени осадконакопление происходило в нормально-морских

условиях. В любимское время, имело место, по-видимому, опреснение бассейна, а в северо-восточных районах морской режим сменился болотно-лагунными обстановками. В решминское время эти обстановки доминировали и в центральных районах синеклизы. На некрасовское время пришлось новая трансгрессия моря.

Обстановки седиментации на территории Московской синеклизы в течение позднего венда достаточно подробно рассмотрены Т.Н. Херасковой с соавторами [2005а]. Так, для гаврилов-ямской свиты ими выделено несколько фаций – туффито-песчано-алевролитовая, туфоаргиллитовая, алевролит-туффито-глинистая, туфо-туфопелитовая и туфовая, туфо-туфопелито-глинистая сероцветная и песчаная. Не имея возможности привести описание фаций полностью, остановимся только на некоторых из них. Так, туффито-песчано-алевролитовая фация представлена чередованием пестроцветных песчаников и алевролитов, обладающих разнообразными потоковыми текстурами. Песчаная фация сложена монотонными сероцветными часто грубозернистыми песчаниками с примесью гальки и гравия. Формирование рассматриваемых образований происходило, вероятно, в зоне прибрежного мелководья. Разрезы непейцинской и макарьевской свит представлены туффито-туфо-пелито-алевролитовая и туффито-аргиллитовой фациями. Для первой из них характерны горизонтально- и волнисто-слоистые текстуры, а песчаный и алевритовый материал часто слагает маломощные линзочки, образование которых Т.Н. Хераскова с соавторами [2005а] связывают с деятельностью небольших струй

течений. Хорошая окатанность обломочного материала может указывать и на дальний перенос кластики и на неоднократное переотложение осадка на мелководье. Любимская и решминская свиты также представлены двумя фациями — песчано-алевролитно-туфопелитовой и туфово-туфопелито-аргиллитовой. Первая фация характерна для внутрибассейновых поднятий и подводных конусов выноса. Присутствующих в ее разрезах песчаники и алевролиты обладают волнисто- и косослоистыми текстурами, а также волновой рябью. Вторая фация тяготеет к депрессиям бассейна. Алевролиты и мелкозернистые песчаники в ее разрезах появляются только вблизи внутрибассейновых поднятий. Для них в основном характерны горизонтальные и субгоризонтальные текстуры, иногда можно видеть пологую коволнистую слоистость.

В соответствии с данными, приведенными в монографии [Гражданкин и др., 2010], последовательность гаврилов-ямской и нижней подсвиты непейцинской свит сложена пачками тонкослоистых аргиллитов с прослоями вулканических туфов и тонко переслаивающимися алевролитами и аргиллитами, среди которых встречаются прослой песчаников. Макарьевская свита распространена в основном в северо-восточной части Московской синеклизы и сложена пачками тонкослоистых аргиллитов и алевролитов, чередующимися с пачками песчаников. На различных горизонтах непейцинской и макарьевской свит трансгрессивно залегают пестроцветные отложения любимской свиты. В нижней ее части на южном, юго-западном и северо-западном крыльях Московской синеклизы залегают кварцевые песчаники, образование которых возможно связано с многократным перемывом донных осадков в обстановках обширной песчаной отмели.

Аргиллиты усть-пинезской свиты сложены каолинитом, смешанослойными образованиями типа иллит-сметтит и хлоритом [Аксенов, Волкова, 1969; Кузьменко и др., 1994; Хераскова и др., 2005а]. В составе любимской, решминской и не-красовской свит преобладают иллитовые глины [Хераскова и др., 2005а]. Аргиллиты лежской и галичской свит также имеют преимущественно иллитовый состав с примесью смектитового компонента [Хераскова и др., 2005б, 2006]. По представлениям И.М. Горохова с соавторами [2005], источниками существенной части тонкой алюмосиликокластики для глинистых пород верхнего венда Московской синеклизы выступали осадочные породы рифея.

По данным [Пиррус, 1980], основными компонентами глинистых пород верхнего венда являются иллит и хлориты, каолинит и смешанослойные (иллит-сметтит) образования. Базальные уровни котлинского горизонта характеризуются

присутствием заметного количества каолинита, что, возможно, связано с процессами глубокого гумидного выветривания в областях сноса. Анализ средних содержаний глинистых минералов “в отдельных разрезах” позволил Э.А. Пиррусу установить, что в начале позднего венда хлорит в область седиментации поступал с северо- и юго-востока, смешанослойные образования — с востока, а каолинит — с запада. В ровенское время каолинит поступал с запада и северо-запада, а хлорит — с юго-востока. Сходные пути миграции глинистых минералов присущи и лонтоваскому времени. Все сказанное дало возможность Э.А. Пиррусу [1980] считать, что в позднем венде и раннем кембрии к западу от Московской синеклизы существовал обширный, слабо расчлененный континент/суша, в пределах которого в условиях гумидного климата были проявлены процессы химического выветривания. Названный континент/суша выступал, по всей видимости, основным источником “фронтального потока” каолинита.

Минеральный состав глинистых пород верхнего венда в краевых частях Московской синеклизы, особенно там, где венд залегает на кристаллическом фундаменте и корях выветривания на нем [Тихомирова и др., 1971; Савко, 1988], несколько отличается от рассмотренного нами выше. Указывается также на уменьшение количества каолинита в осадках от южного крыла названной структуры к ее центральной части [Савко, 1988].

Детальное исследование минерального состава глинистых пород верхнего венда и кембрия западных районов ВЕП (Литва, Польша, Западная Белоруссия, Подолия и др.) предпринято авторами работы [Jewuła et al., 2022]. По данным рентгеноструктурного анализа ими выполнен количественный анализ состава глин и аргиллитов. В результате установлено, что в глинистых породах в основном присутствуют кварц, ортоклаз и микроклин, Na- и Ca-плагиоклаз, слюды  $2M_1$  и триоктаэдрическая, гематит, гетит, каолинит, иллит  $1M_d$ , иллит-сметтит, пирит и бертьерин. Показано, что содержание каолинита в глинистых породах увеличивается от волынского уровня (среднее для всех регионов ~10%) к редкинскому (~16%), а затем снижается (в глинах кембрия его около 8%). Специально отмечено, что и традиционные геохимические и новые, предложенные авторами, минералогические индикаторы позволяют предполагать накопление рассматриваемых отложений в условиях выраженного химического выветривания с образованием в корях выветривания каолинита — индикатора жаркого гумидного климата. Об этом же свидетельствует и состав мезо- и неопротерозойских палеопочв, развитых на волыньских базальтах и породах кристаллического фундамента [Kremer et al., 2018; Liivamagi et al.,

2018, 2021]. В их низах, как правило, преобладал диоктаэдрический смектит, а в верхах – каолинит и гематит. Повышенное содержание каолинита в глинистых породах может быть следствием эрозии именно верхних горизонтов палеопочв [Lii-vamagi et al., 2021; Jewuła et al., 2022] или обусловлено *in situ* “каолиновым выветриванием” вендских осадков [Bojanowski et al., 2020; Dudzisz et al., 2021; Jewuła et al., 2022].

Расчет значений гидролизатного модуля (ГМ [Юдович, Кетрис, 2000]) и химического индекса изменения (CIA [Nesbitt, Young, 1982]) позволил нам судить о палеоклимате времени формирования названных образований [Подковыров и др., 2022]. Так, средние значения CIA в глинистых породах отвечают интервалу 72...77, т.е. источники тонкой алюмосиликокластики находились, вероятно, в областях относительно теплого климата.

### ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБСУЖДЕНИЕ

Опробование глубоких скважин Гаврилов Ям 1–5, Орехово 3, Даниловская 11, Красавино 2 и других, вскрывших отложения валдайской и балтийской серий в центральной части Московской синеклизы (рис. 2), выполнено А.В. Сочавой и В.Н. Подковыровым в 1989 и 1992–1994 гг. Стратиграфическое расчленение верхневендских отложений было принято ими в соответствии с представлениями, изложенными в монографии [Вендская ..., 1985]. “Встроить” отобранные тогда образцы в современные схемы расчленения венда (см., например, [Государственная ..., 2016]) сейчас, к сожалению, невозможно. Поэтому мы оперируем далее принятыми тогда названиями свит.

Определение содержания петрогенных оксидов в глинистых породах выполнено в конце 1980-х–начале 1990-х гг. методом “мокрой химии” в ЦЛ Северо-Западного ПГО (г. Красное Село). Содержание редких и рассеянных элементов в образцах из этой коллекции установлено в ЦЛ ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург) методом ИСП МС.

#### Общие литогеохимические особенности глинистых пород

В настоящей работе использованы данные о валовом химическом составе (основные породообразующие оксиды) 98 образцов глинистых пород и содержания редких и рассеянных элементов в 39 из них. Для представительных образцов аргиллитов усть-пинежской, любимской, лежской и галичской свит эти сведения отчасти приведены в табл. 1. Дать полную характеристику указанным выборкам из-за ограниченности объема журнальной статьи трудно, поэтому ниже мы остановимся только на основных моментах.



Рис. 2. Основные тектонические элементы Восточно-Европейской платформы (по [Бискэ, 2019; Чистякова и др., 2020; Подковыров и др., 2022] с изменениями) и положение скважин (звездочки), вскрывших верхний венд и нижний кембрий в Московской синеклизе. I – Белорусская антеклиза; II – Тимано-Печорская плита.

Скважины: 1 – Даниловская 11; 2 – Орехово 3; 3 – Гаврилов Ям 1, 2, 3, 4 и 5; 4 – Галичская; 5 – Медведская 1; 6 – Красавино 2; 7 – Марьино 1.

Среднее содержание  $\text{SiO}_2$  в глинистых породах усть-пинежской, любимской и галичской свит (мы рассматриваем здесь и далее в основном данные для свит, охарактеризованных числом образцов  $n > 2$ ) с учетом значений стандартных отклонений сопоставимо (соответственно  $57.85 \pm 3.27$ ,  $59.81 \pm 2.96$  и  $60.65 \pm 2.66$  мас. %). Это же относится и к  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $18.82 \pm 1.57$ ,  $18.14 \pm 1.15$  и  $17.54 \pm 1.10$  мас. %),  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  (суммарное железо в виде  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),  $\text{MgO}$  ( $2.27 \pm 0.45$ ,  $2.28 \pm 0.52$  и  $2.50 \pm 0.21$  мас. %) и  $\text{CaO}$  ( $0.61 \pm 0.50$ ,  $0.38 \pm 0.24$  и  $0.34 \pm 0.22$  мас. %). В то же время аргиллиты галичской свиты имеют более низкое  $\text{Na}_2\text{O}$  среднее, чем глинистые породы верхнего венда ( $0.70 \pm 0.09$  против  $1.27 \pm 0.41$ , усть-пинежский, и  $1.26 \pm 0.21$ , любимский уровни, мас. %). Среднее содержание  $\text{K}_2\text{O}$  в них несколько выше ( $4.76 \pm 0.22$  мас. %), чем в аргиллитах усть-пинежской ( $3.86 \pm 0.46$  мас. %) и любимской свит ( $3.81 \pm 0.29$  мас. %).

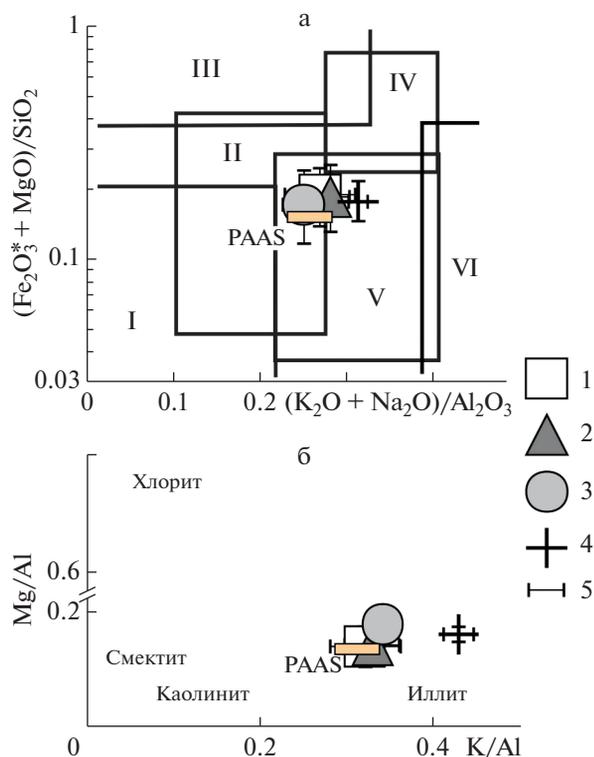
На диаграмме  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$  (диаграмма НКМ–ФМ [Юдович, Кетрис, 2000]) средние точки состава глинистых

**Таблица 1.** Содержание основных породообразующих оксидов (мас. %) и редких и рассеянных элементов (г/т) в представительных образцах глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы

Компонент	Свита										
	Усть-пинезская									Любимская	
	Образец										
	970-3	970-4	970-12	970-16	970-27	972-23	930-9	931-14	939-7	931-30	972-4
SiO <sub>2</sub>	57.35	57.72	58.20	56.70	55.43	60.65	62.89	59.65	58.38	63.33	57.47
TiO <sub>2</sub>	0.61	0.65	0.79	0.92	0.81	0.80	1.00	0.83	0.92	0.95	0.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.86	19.07	19.69	19.36	19.28	19.68	17.34	17.89	19.72	17.36	18.31
FeO*	7.34	6.63	6.64	8.06	7.92	5.54	7.02	7.58	6.75	5.95	8.04
MnO	0.03	0.03	0.04	0.11	0.12	0.06	0.05	0.12	0.05	0.03	0.06
MgO	2.10	2.19	1.91	1.73	2.07	1.84	2.09	3.01	2.46	2.40	2.30
CaO	0.39	0.39	0.45	0.41	0.57	0.38	0.29	0.39	0.50	0.41	1.39
Na <sub>2</sub> O	1.23	1.23	1.08	0.95	1.05	1.10	1.47	1.88	1.66	1.17	1.42
K <sub>2</sub> O	4.22	4.00	3.41	3.52	3.81	3.79	3.90	4.39	4.80	3.94	3.71
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06	0.02	0.02	0.02	0.07	0.05	0.09	0.13	0.12	0.11	0.70
ппп	7.31	7.58	7.29	7.74	8.37	5.61	3.37	3.63	4.13	3.85	5.30
Сумма	101.84	101.91	101.05	100.31	99.85	99.64	99.56	99.79	99.49	99.55	99.63
Sc	15.00	15.20	13.80	16.60	14.70	15.90	14.70	12.90	18.40	12.90	16.60
V	114.00	156.00	110.00	124.00	127.00	118.00	112.00	116.00	160.00	99.40	117.00
Cr	70.60	81.50	79.20	86.80	87.20	78.60	73.90	78.60	81.00	83.70	81.40
Co	26.60	17.60	14.00	16.50	16.00	14.30	14.00	21.20	23.10	21.30	21.30
Ni	28.70	37.90	23.40	36.00	30.10	31.80	32.10	38.50	47.80	40.70	38.50
Rb	156.00	166.00	156.00	174.00	187.00	167.00	168.00	160.00	146.00	134.00	166.00
Sr	85.80	74.20	82.90	92.50	110.00	93.60	93.80	78.70	153.00	68.20	94.70
Y	27.70	29.20	27.20	37.50	28.60	27.90	31.30	25.60	35.20	25.80	39.70
Zr	143.00	146.00	185.00	185.00	162.00	164.00	215.00	154.00	163.00	245.00	243.00
Nb	15.40	15.40	19.60	20.40	19.50	16.70	19.40	16.60	19.20	18.30	20.60
Cs	7.35	8.60	7.69	8.57	9.49	8.37	7.73	8.15	8.32	5.77	7.44
Ba	403.00	337.00	401.00	374.00	336.00	311.00	339.00	384.00	2000.0	382.00	361.00
La	42.70	45.30	45.10	54.50	56.00	45.70	51.50	41.90	49.00	36.10	53.70
Ce	83.30	88.30	84.00	112.00	110.00	90.30	104.00	83.70	101.00	70.40	113.00
Pr	9.32	10.60	9.80	13.60	12.90	10.70	12.40	9.67	12.40	8.25	13.90
Nd	32.40	38.80	33.10	50.30	44.90	38.70	44.20	34.00	48.50	30.00	54.50
Sm	5.55	7.31	5.66	10.00	7.59	7.22	8.04	6.11	11.10	5.43	12.20
Eu	1.07	1.29	1.05	1.89	1.30	1.33	1.41	1.15	2.57	1.05	2.27
Gd	4.95	6.00	4.82	8.56	6.15	6.09	6.34	5.11	9.78	4.77	10.30
Tb	0.81	0.92	0.79	1.33	0.93	0.94	1.00	0.80	1.51	0.77	1.53
Dy	4.97	5.40	5.01	7.63	5.35	5.55	5.86	4.67	7.95	4.64	8.35
Ho	1.06	1.11	1.06	1.49	1.11	1.10	1.20	0.99	1.44	0.97	1.55
Er	3.26	3.18	3.26	4.15	3.31	3.28	3.54	2.91	3.76	2.95	4.29
Tm	0.50	0.48	0.49	0.62	0.49	0.49	0.51	0.44	0.52	0.45	0.61
Yb	3.32	3.17	3.17	3.88	3.20	3.27	3.46	2.92	3.21	3.05	3.96
Lu	0.52	0.46	0.48	0.58	0.49	0.46	0.52	0.44	0.51	0.47	0.59
Hf	4.46	4.51	5.87	6.01	5.29	5.08	6.49	4.58	4.87	7.51	6.59
Pb	17.60	53.40	22.90	24.20	15.20	20.00	6.09	7.88	26.30	30.70	26.30
Th	11.00	11.60	12.90	14.50	13.00	12.40	14.00	12.00	13.10	11.50	14.00
U	2.26	3.72	2.47	2.69	2.45	2.24	2.59	1.93	1.72	2.42	3.40

Таблица 1. Окончание

Компонент	Свита										
	Любимская					Лежская			Галичская		
	Образец										
	972-6	972-13	972-42	972-45	972-49	930-48	930-49	930-52	971-4	971-7	971-9
SiO <sub>2</sub>	56.34	57.33	62.62	59.00	61.26	63.12	65.99	62.71	57.72	56.19	62.61
TiO <sub>2</sub>	0.82	0.90	0.93	0.94	0.91	0.97	0.87	0.93	1.02	0.80	0.68
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.26	18.08	18.79	21.14	18.35	15.91	14.98	16.64	18.87	18.89	16.25
FeO*	10.71	11.07	5.66	5.51	6.42	8.02	5.00	7.25	7.78	9.21	7.36
MnO	0.05	0.05	0.05	0.04	0.05	0.07	0.05	0.05	0.10	0.02	0.03
MgO	2.59	2.21	1.42	1.79	1.68	2.63	1.88	2.37	2.58	2.85	2.47
CaO	0.33	0.21	0.26	0.25	0.27	0.54	1.12	0.24	0.88	0.26	0.26
Na <sub>2</sub> O	1.20	1.20	1.05	1.14	1.23	0.26	0.86	0.65	0.80	0.80	0.56
K <sub>2</sub> O	3.86	3.85	3.24	3.81	3.48	3.69	3.39	4.53	4.67	5.16	4.51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.26	0.08	0.07	0.04	0.02	0.02
ппп	5.33	4.57	5.48	5.89	5.83	4.03	5.28	4.07	5.04	5.31	4.75
Сумма	99.56	99.54	100.01	99.58	100.14	99.55	100.46	99.79	99.82	99.73	99.69
Sc	17.30	16.00	18.60	17.30	14.20	14.50	10.70	14.00	14.50	14.70	13.30
V	135.00	131.00	120.00	123.00	108.00	95.80	61.50	123.00	135.00	131.00	117.00
Cr	87.50	86.10	82.10	85.90	77.50	81.90	46.30	84.90	82.70	89.30	79.70
Co	25.50	19.70	17.00	24.90	15.60	34.80	50.70	25.70	20.70	60.40	39.00
Ni	40.50	39.00	25.60	39.00	24.30	44.80	28.40	40.30	36.60	46.50	38.10
Rb	180.00	187.00	153.00	178.00	155.00	146.00	93.90	175.00	170.00	180.00	154.00
Sr	90.40	91.90	75.00	86.20	80.90	93.00	74.40	80.80	67.40	73.90	61.90
Y	36.00	33.40	39.70	34.20	34.40	40.60	26.90	35.30	31.70	29.00	30.10
Zr	164.00	161.00	240.00	222.00	227.00	280.00	403.00	189.00	182.00	145.00	220.00
Nb	18.30	18.00	21.40	21.70	19.60	21.10	16.20	19.00	17.80	16.70	17.20
Cs	8.94	9.39	8.05	9.75	7.52	7.45	4.05	8.33	8.07	8.63	7.16
Ba	358.00	373.00	321.00	346.00	336.00	407.00	324.00	380.00	400.00	380.00	427.00
La	60.10	54.90	52.00	52.30	50.60	54.30	33.20	48.40	45.60	45.80	41.20
Ce	127.00	111.00	103.00	101.00	104.00	107.00	69.30	97.30	91.40	87.80	84.10
Pr	15.20	12.80	12.20	11.80	12.40	14.20	8.18	11.80	10.80	10.40	10.10
Nd	54.80	45.50	44.00	42.30	45.30	57.20	30.70	43.70	38.50	37.40	37.30
Sm	9.17	7.62	8.61	7.73	8.69	13.70	5.66	8.29	7.04	6.76	7.09
Eu	1.57	1.37	1.60	1.40	1.56	2.70	1.03	1.54	1.31	1.25	1.35
Gd	6.92	6.33	7.54	6.64	7.18	11.60	4.88	7.22	5.89	5.62	5.89
Tb	1.08	1.03	1.25	1.07	1.13	1.54	0.77	1.12	0.94	0.88	0.93
Dy	6.56	6.19	7.55	6.49	6.60	8.18	4.72	6.53	5.68	5.29	5.48
Ho	1.35	1.26	1.54	1.31	1.30	1.51	0.96	1.28	1.16	1.07	1.12
Er	3.92	3.72	4.53	3.92	3.79	4.30	2.97	3.84	3.49	3.22	3.26
Tm	0.57	0.54	0.67	0.58	0.56	0.62	0.45	0.56	0.53	0.47	0.50
Yb	3.69	3.58	4.54	3.82	3.65	4.02	3.04	3.59	3.38	3.10	3.25
Lu	0.52	0.54	0.68	0.57	0.53	0.60	0.47	0.52	0.51	0.47	0.47
Hf	5.16	4.82	7.20	6.92	6.79	8.30	11.30	5.83	5.71	4.54	6.58
Pb	44.40	32.80	27.40	48.00	39.30	47.00	36.40	31.30	28.00	35.80	35.00
Th	14.50	14.70	13.80	15.00	13.40	12.60	9.46	12.80	12.50	12.40	11.60
U	2.50	2.64	3.06	3.45	2.85	3.23	2.57	2.78	2.63	2.23	2.39



**Рис. 3.** Положение усредненных точек состава глинистых пород различных литостратиграфических подразделений верхнего венда и нижнего кембрия на диаграммах  $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$  (а) и  $\text{K}/\text{Al} - \text{Mg}/\text{Al}$  (б).

1–4 – средние составы аргиллитов (1 – усть-пинезжская свита; 2 – любимская свита; 3 – лежская свита; 4 – галичская свита); 5 – величина стандартного отклонения ( $\pm 1\sigma$ ).

а – I–VI – поля состава глинистых пород: I – преимущественно каолиновые, 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.

пород (здесь и везде далее мы используем аналитические данные только для пород с содержанием  $\text{SiO}_2 < 66$  мас. %) различных литостратиграфических подразделений верхнего венда и нижнего кембрия Московской синеклизы сосредоточены в области перекрытия ее классификационных полей II (преимущественно смектитовые с примесью каолинита и иллита глины) и V (хлорит-смектит-иллитовые глины) или вблизи указанной области (рис. 3а). Это несколько контрастирует с представлениями о существенной доле каолинита в составе рассматриваемых нами образований. Распределение средних точек аргиллитов и аргиллитоподобных глин на диаграмме  $\text{K}/\text{Al} - \text{Mg}/\text{Al}$  [Turgeon, Brumsack, 2006] указывает на преобладание в их составе, по-видимому, иллита при подчиненной роли каолинита; в породах галич-

ской свиты роль иллита выше, чем в подстилающих образованиях (см. рис. 3б). Все сказанное предполагает, что в течение рассматриваемого нами интервала времени длительностью в несколько десятков миллионов лет существенного изменения состава глинистых пород не произошло.

Сопоставление содержания породообразующих оксидов в глинистых породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы со средним постархейским австралийским глинистым сланцем (PAAS [Taylor, McLennan, 1985]) показывает, что среднее содержание  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  в аргиллитах усть-пинезжской свиты сопоставимо с PAAS. Среднее содержание  $\text{TiO}_2$  несколько, а  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{CaO}$  заметно ниже, чем в PAAS. Среднее содержание  $\text{FeO}^*$  (суммарное железо в виде  $\text{FeO}$ ) составляет  $1.17 \pm 0.27$  PAAS. Примерно такое же распределение породообразующих оксидов характерно для глинистых пород любимской свиты. Лежские аргиллиты обладают несколько меньшим, чем в PAAS, средним содержанием  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.88 PAAS). Существенно меньше, чем в PAAS здесь  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{среднее}}$  (0.49 PAAS), а величина  $\text{MgO}_{\text{среднее}}$ , напротив, несколько выше (1.18 PAAS). Распределение других оксидов напоминает то, что мы уже видели для аргиллитов верхнего венда. Наконец, глинистые породы галичской свиты содержат в среднем сопоставимое с PAAS количество  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Среднее содержание  $\text{FeO}^*$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  в них несколько выше, чем в PAAS (соответственно  $1.14 \pm 0.15$ ,  $1.14 \pm 0.10$  и  $1.29 \pm 0.06$ ), а содержание  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  и  $\text{P}_2\text{O}_5$  несколько или существенно ниже, чем в PAAS ( $0.87 \pm 0.14$ ,  $0.26 \pm 0.17$ ,  $0.58 \pm 0.08$  и  $0.25 \pm 0.15$ ).

К сожалению, сейчас трудно судить о том, какие конкретно комплексы пород размывались во время накопления осадочных последовательностей верхнего венда–нижнего кембрия, поэтому все возможные выводы здесь и далее мы делаем, используя, как обычно, в качестве референтных средние данные о химическом составе архейских гранитов и позднепротерозойских базальтов [Condie, 1993]. Это позволяет видеть, что исследуемые нами глинистые породы отличаются от архейских гранитоидов заметно более высокими содержаниями  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  и  $\text{MgO}$ , тогда как содержание  $\text{Na}_2\text{O}$  в гранитоидах выше. Сравнение с составом базальтов демонстрирует, что глинистым породам свойственны существенно более низкие содержания  $\text{CaO}$  и, наоборот, заметно более высокие концентрации  $\text{K}_2\text{O}$ . Таким образом, по одним параметрам состава аргиллиты верхнего венда и нижнего кембрия ближе к гранитоидам, по другим – к магматическим породам основного состава.

Глинистые породы усть-пинезжской, любимской и галичской свит обладают сопоставимыми

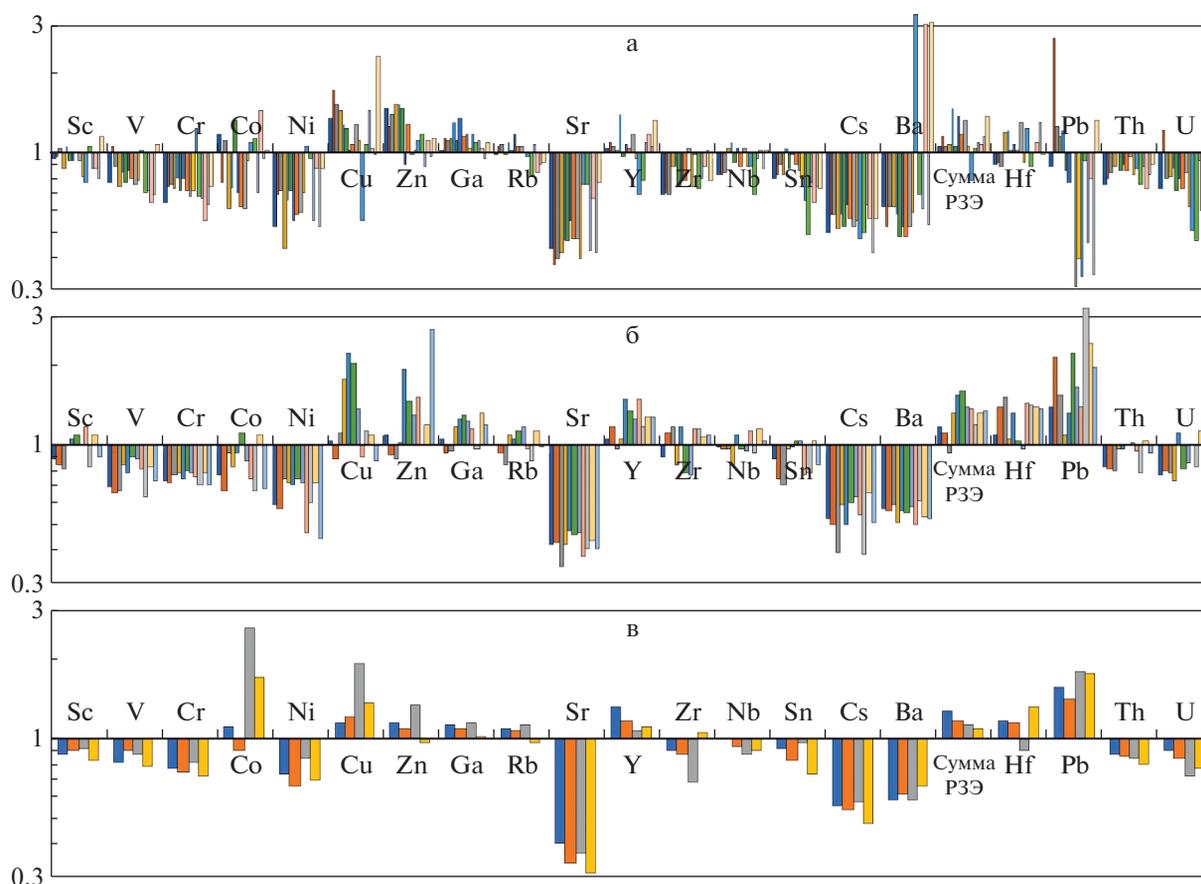


Рис. 4. Сопоставление содержания редких и рассеянных элементов в аргиллитах усть-пинежской (а), любимской (б) и галичской (в) свит с их концентрациями в PAAS, по [Taylor, McLennan, 1985]. Количество столбиков в ячейках элементов соответствует количеству проанализированных образцов.

средними концентрациями Sc, Cr (его максимальное содержание при этом заметно выше в аргиллитах усть-пинежского уровня), Rb, Y, Zr, Cs, Th и суммы редкоземельных элементов (P3Э). В то же время для глинистых пород усть-пинежской свиты присущи более высокие, чем аргиллитам двух других свит, средние концентрации Sr ( $103.54 \pm 27.31$  г/т, против  $84.25 \pm 7.66$  и  $71.00 \pm 8.17$  г/т), а аргиллиты галичской свиты обладают более высоким средним содержанием Co ( $36.45 \pm 17.75$  против  $20.95 \pm 5.49$  и  $19.04 \pm 3.58$  г/т). Сумма P3Э в глинистых породах усть-пинежской свиты составляет (среднее значение)  $214.12 \pm 29.77$ , для аргиллитов любимской свиты этот параметр равен  $236.75 \pm 33.48$ , а для галичских аргиллитов —  $215.87 \pm 14.43$  г/т.

Сравнение содержаний редких и рассеянных элементов в аргиллитах усть-пинежской и любимской свит с содержаниями их в PAAS (рис. 4а, 4б) показало, что в породах обеих свит содержится в той или иной мере меньше, чем в PAAS, V, Cr, Co, Ni, Sr, Sn, Cs, Ba, Th и U. Содержания Cu, Zn и Ga, напротив, выше. Аргиллиты любимской сви-

ты отличаются от усть-пинежских более высокими, чем в PAAS, концентрациями Y, суммы P3Э, Hf и Pb. Глинистые породы галичской свиты обладают несколько повышенными против PAAS средними концентрациями Co, Cu и Pb; напротив, среднее содержание Sr, Cs и Ba составляет в них от 0.36 до 0.61 PAAS (см. рис. 4в).

Еще один важный инструмент литогеохимических исследований — сопоставление содержаний породообразующих оксидов и редких и рассеянных элементов в глинистых породах с содержанием их в верхней континентальной коре (УСС [Rudnick, Gao, 2003]). Повышенными против УСС в породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы являются содержания  $K_2O$ , Rb, Cs, Be, легких редких земель (ЛР3Э), Eu, тяжелых редких земель (ТР3Э) и Y, Nb, Ta,  $FeO^*$ , Co, Ni и Cu. Существенно более низкими концентрациями характеризуются  $Na_2O$  и CaO. Заметные вариации присущи Ba, а также MnO и  $P_2O_5$ . По сравнению со средними позднепротерозойскими базальтами в аргиллитах содержится заметно больше  $K_2O$  и Rb, Th, Zr, Hf, Nb и Ta. На-

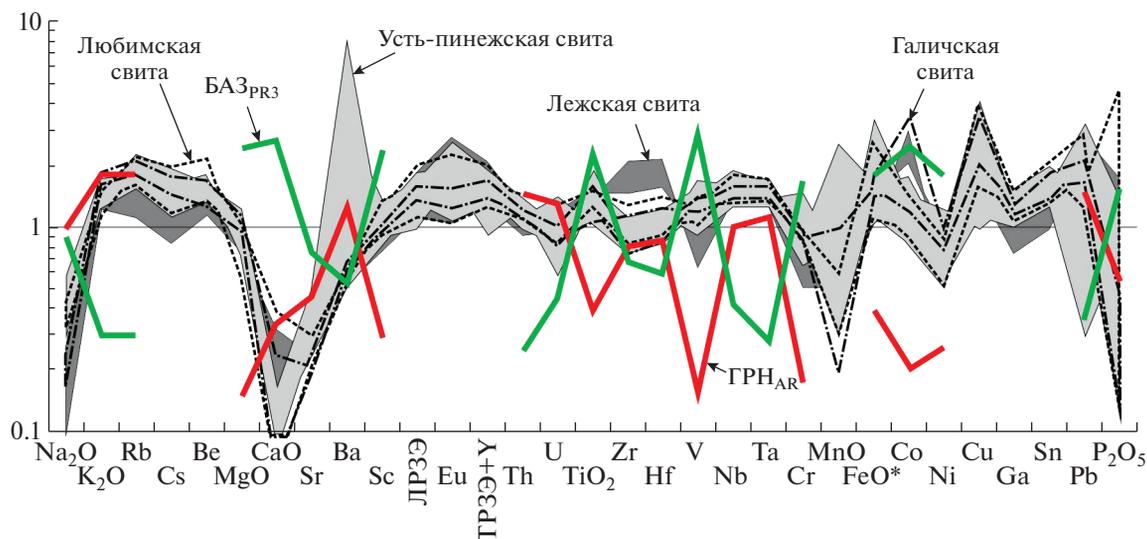


Рис. 5. Нормированные на содержание в верхней континентальной коре (UCC) концентрации ряда породообразующих оксидов и редких и рассеянных элементов в глинистых породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы, а также в средних гранитах архея (ГРН<sub>AR</sub>) и базальтах верхнего протерозоя (БАЗ<sub>PR3</sub>), по [Condie, 1993].

против, в базальтах существенно выше концентрации  $TiO_2$ ,  $MgO$  и  $CaO$ ,  $Sc$ ,  $V$  и  $Cr$ . Средние гранитоиды архея по сравнению с рассматриваемыми нами аргиллитами обладают заметно более низкими концентрациями  $TiO_2$ ,  $FeO$  и  $MgO$ ,  $Sc$ ,  $V$ ,  $Cr$ ,  $Co$  и  $Ni$  (рис. 5).

Нормированные на хондрит [Taylor, McLennan, 1985] спектры распределения РЗЭ в глинистых породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы весьма близки к аналогичному спектру PAAS (рис. 6а). Так,  $(La/Yb)_{\text{среднее}}$  для аргиллитов усть-пинежской свиты составляет  $9.91 \pm 0.99$ , тогда как для PAAS этот параметр равен 9.15. Глинистые породы любимской, лежской и галичской свит имеют  $(La/Yb)_{\text{среднее}}$  соответственно  $9.34 \pm 1.10$ , 8.25 и  $9.19 \pm 0.59$ . Деpletирование ТРЗЭ в них практически не наблюдается. Средние величины отрицательной  $Eu$  аномалии варьируют от  $0.61 \pm 0.01$  (любимская свита) до  $0.66 \pm 0.16$  (усть-пинежская свита). В PAAS величина  $Eu/Eu^*$  равна 0.65. Интересно, что распределение ЛРЗЭ в глинистых породах принципиально не отличается от их распределения в средних архейских гранитоидах, тогда как распределение ТРЗЭ сопоставимо с тем, что характерно для позднепротерозойских базальтов.

#### *Тип алюмосиликокластики, слагающей глинистые породы*

В работе [Подковыров и др., 2022] мы уже рассмотрели вопрос о типе слагающей глинистые породы верхнего венда и нижнего кембрия алюмосиликокластики (петрогенная/литогенная). Анализ соотношения в глинистых породах

усть-пинежской свиты литохимических модулей показал, что между ТМ и ЖМ корреляция положительная (коэффициент корреляции,  $r = 0.20$ ), а между НКМ и ГМ<sup>2</sup> отрицательная ( $r = -0.38$ ). Таким образом, в соответствии с представлениями [Юдович, Кетрис, 2000], аргиллиты данного уровня мы посчитали сложенными в основном слабо преобразованным процессами седиментогенеза материалом. Аргиллиты любимской и галичской свит, обладающие отрицательной корреляцией между обоими парами модулей ( $r_{\text{ТМ-ЖМ}} = -0.11$ ,  $r_{\text{НКМ-ГМ}} = -0.21$  и  $r_{\text{ТМ-ЖМ}} = -0.06$ ,  $r_{\text{НКМ-ГМ}} = -0.56$ ), содержат, по всей видимости, существенную долю заметно преобразованного по сравнению с материнскими породами материала [Подковыров и др., 2022]. Вместе с тем, при анализе указанных соотношений мы не учитывали критические значения коэффициентов корреляции для того или иного уровня значимости.

Если же использовать такой подход, то величину  $r_{\text{ТМ-ЖМ}}$  для глинистых пород усть-пинежской свиты нельзя считать значимой, а вместе с этим под вопросом оказывается и петрогенный характер материала, слагающего аргиллиты. Такой же вывод можно сделать для значений  $r_{\text{ТМ-ЖМ}}$  и  $r_{\text{НКМ-ГМ}}$ , характеризующих глинистые породы любимской и галичской свит. Все сказанное предполагает, что соотношения различных литохимических модулей в нашем случае не позволяет

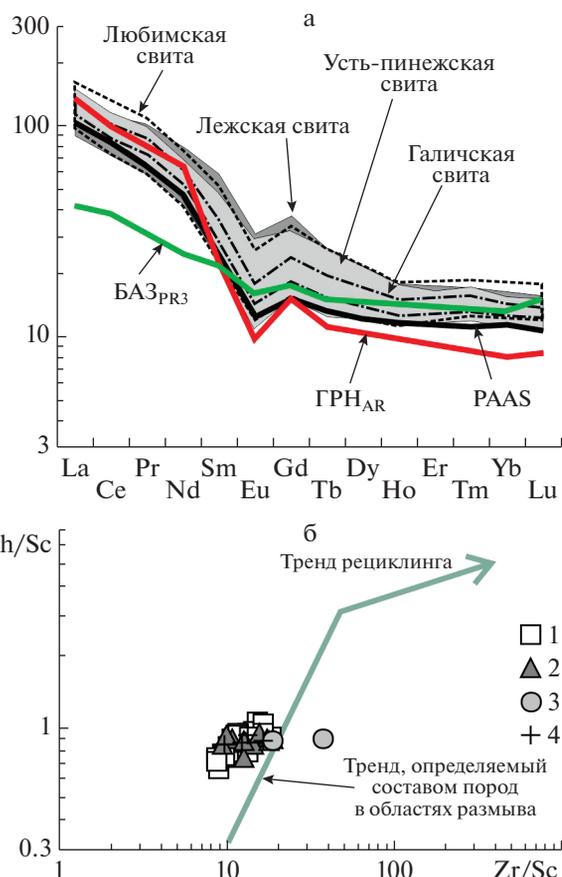
<sup>2</sup> ТМ – титановый модуль  $TiO_2/Al_2O_3$ , ЖМ – железный модуль  $(Fe_2O_3^* + MnO)/(Al_2O_3 + TiO_2)$ , НКМ – модуль нормированной щелочности  $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ , ГМ – гидрозатратный модуль  $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3^* + MnO)/SiO_2$  [Юдович, Кетрис, 2000]. Все модули рассчитываются по мас. %.

корректно судить о типе слагающей рассматриваемые глинистые породы алюмосиликокластики. Но, как известно, есть и другой подход к решению этой задачи. Он основан на анализе собственных глинистым породам величин  $Zr/Sc$  и  $Th/Sc$  [McLennan et al., 1993]. Рассматриваемые нами аргиллиты и аргиллитоподобные глины характеризуются значениями обоих названных параметров, характерными для пород, состав которых контролируется составом пород в областях размыва (см. рис. 6б). Этот вывод имеет существенное значение для дальнейших построений. Достаточно компактное расположение фигуративных точек глинистых пород разных литостратиграфических подразделений на графике  $Zr/Sc$ – $Th/Sc$  предполагает значительное сходство их состава.

#### Источники тонкой алюмосиликокластики

На большинстве традиционно используемых для реконструкции состава пород-источников тонкой алюмосиликокластики дискриминантных диаграмм ( $La/Sc$ – $Th/Co$ ,  $La/Th$ – $Th/Yb$ ,  $Sc$ – $Th/Sc$  и др., обзор см. [Маслов и др., 2020]) фигуративные точки глинистых пород верхнего венда и нижнего кембрия расположены примерно посередине между референтными точками гранитоидов архея и позднепротерозойских базальтов (рис. 7а–7в), что, как и соотношение с  $PAAS$  и  $UCC$  (см. выше), позволяет предполагать примерно равный вклад тех и других в состав исследуемой нами выборки. Распределение точек аргиллитов на диаграмме  $Cr/Th$ – $Th/Sc$  (см. рис. 7г) указывает на все же, по-видимому, большую долю (до 70–90%) в их составе продуктов разрушения кислых магматических пород, а также сланцев и гнейсов метаморфогенно-осадочного происхождения. Анализ соотношений основных породообразующих оксидов в глинистых породах предполагают участие в формировании их также и продуктов эрозии осадочных и метаосадочных пород [Подковыров и др., 2022].

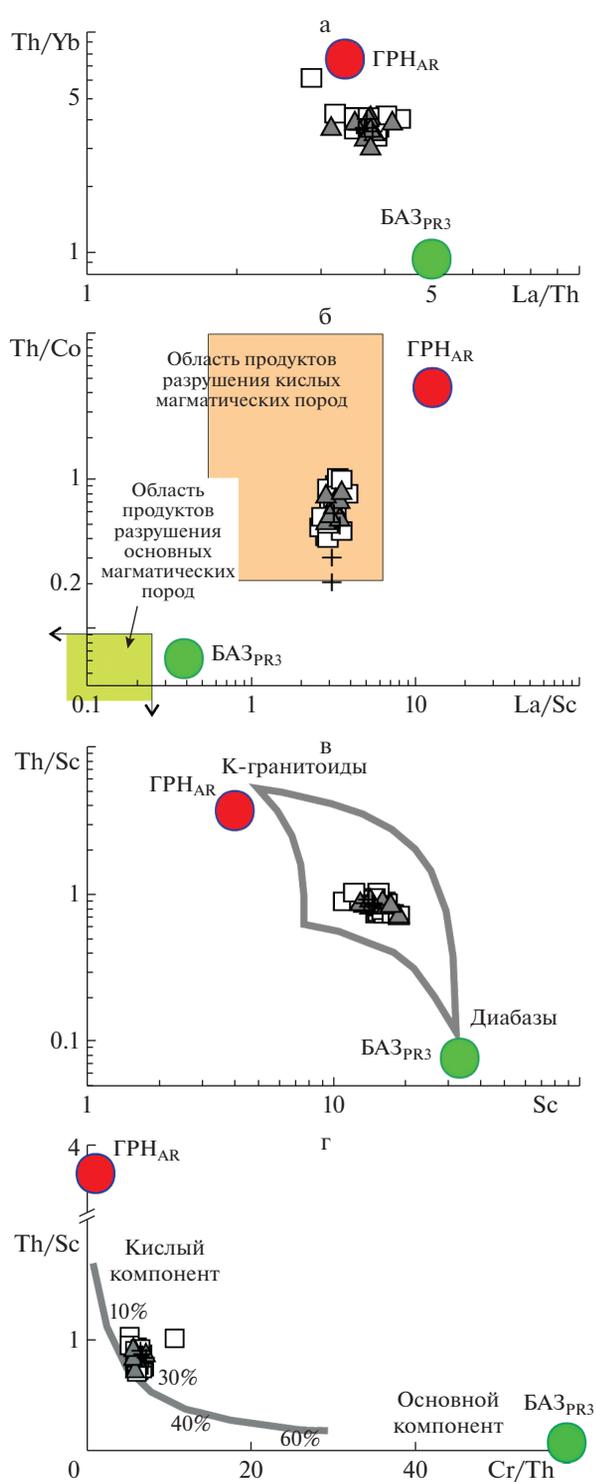
Сказанное подтверждает представления И.М. Горохова с соавторами [2005] о заметном вкладе в состав глин верхнего венда и нижнего кембрия продуктов разрушения подстилающих их осадочных пород рифея. На всех графиках (см. рис. 7) точки состава глинистых пород разных свит имеют компактное расположение. Это дает основание считать, что состав размывавшихся на водосборах на протяжении позднего венда и раннего кембрия комплексов пород не претерпел каких-либо заметных изменений. Такой же вывод был сделан нами [Подковыров и др., 2022] на основе анализа литохимических данных.



**Рис. 6.** Нормированные на хондрит спектры распределения редкоземельных элементов в глинистых породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы, а также в  $PAAS$  [Taylor, McLennan, 1985], средних гранитах архея ( $ГРН_{AR}$ ) и базальтах верхнего протерозоя ( $БАЗ_{PR3}$ ), по [Condie, 1993] (а), и распределение точек состава глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия на диаграмме  $Zr/Sc$ – $Th/Sc$  (б). 1 – усть-пинезская свита; 2 – любимская свита; 3 – лежская свита; 4 – галичская свита.

#### Типы речных систем, транспортировавших в бассейн тонкую алюмосиликокластику

На диаграммах  $(La/Yb)_N$ – $Eu/Eu^*$  и  $(La/Yb)_N$ – $Th$  [Маслов, Шевченко, 2019] с полями состава тонкой алюмосиликокластики, характерной для приустьевых областей разных типов современных рек (по [Bayon et al., 2015]), фигуративные точки глинистых пород усть-пинезской, любимской, лежской и галичской свит сосредоточены в полях крупных рек (категория 1) и рек, дренирующих водосборы, сложенные преимущественно осадочными породами (категория 2) (рис. 8). Сказанное позволяет считать, что водосборы таких речных систем были достаточно большими, т.е. могли быть сложены различными по составу комплексами пород, что характерно и для речных систем юга Африки.

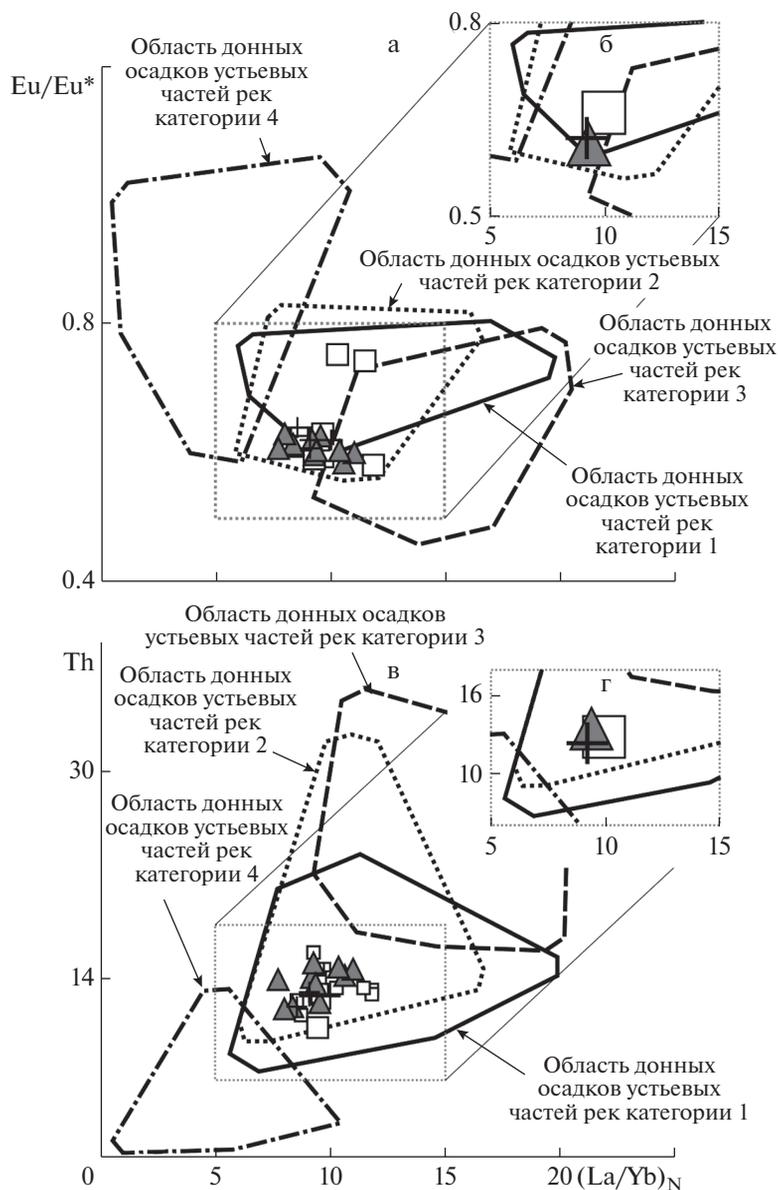


**Рис. 7.** Локализация точек состава глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы, а также референтных точек средних гранитов архея (ГРН<sub>АР</sub>) и базальтов верхнего протерозоя (БАЗ<sub>ПРЗ</sub>), по [Condie, 1993], на диаграммах La/Th–Th/Yb [McLennan et al., 1980] (а), La/Sc–Th/Co [Cullers, 2002] (б), Sc–Th/Sc [Fedo et al., 1997; Bhat, Ghosh, 2001] (в) и Cr/Th–Th/Sc [Condie, Wronkiewicz, 1990; Bracciali et al., 2007] (г).

Условные обозначения см. рис. 6.

Установление категорий речных систем, транспортировавших в область осадконакопления тонкую алюмосиликокластику, дает возможность, в соответствии с предложенным в публикации [González-Álvarez, Kerrich, 2012] подходом, сопоставить свойственные последней значения CIA с теми, что характерны тонкозернистым осадкам различных современных крупных речных систем. Конечно, такой подход не лишен своих подводных камней [Маслов, 2021 и ссылки там], так как крупные реки могут пересекать несколько климатических поясов, а вариации CIA, как и других подобных индексов, быть связаны с влиянием на процессы осадконакопления тектоники, различной длительности пребывания обломочного материала на водосборах и, как мы видели выше на примере речных систем юга Африки, различным составом пород на водосборах, дренируемых разными участками речной системы (в верховьях – кристаллические комплексы, в среднем течении – осадочные породы или базальтовые плато и т.п.) и др.

Известно, что в современных крупных речных системах значения CIA для взвешенного материала варьируют от ~51 (р. Святого Лаврентия, зона тундры и тайги) и 54–64 (реки умеренного гумидного климата, Дунай, Миссисипи и др.) до 90–95 (реки тропического климата, Конго, Нигер и др.) [McLennan, 1993; González-Álvarez, Kerrich, 2012]. Средние для глинистых пород разных свит верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы значения CIA варьируют в интервале 72–76 (рис. 9). Такие величины индекса химического изменения характерны для взвеси современных крупных рек гумидного субтропического и тропического, а также рек районов сухого тропического климата (Хуанхэ, Ориноко, Нил и др.). Индивидуальные образцы аргиллитов усть-пинежской свиты демонстрируют более широкий разброс значений CIA (56–77), чем это характерно для глинистых пород перекрывающих ее литостратиграфических подразделений (например, любимская свита – 67–77). Возможно, данное обстоятельство связано с недостаточно интенсивным и недостаточно равномерным преобразованием водосборов той эпохи процессами химического выветривания. Тонкие взвеси крупных речных системы юга Африки характеризуются, в отличие от глинистых пород венда–нижнего кембрия Московской синеклизы, значительным разбросом минимальных и максимальных величин CIA. Так, для системы р. Замбези этот разброс составляет 62–83, для р. Окаванго – 57–80, для р. Лимпопо – 47–79. Это существенно больше, чем средние оценки CIA [McLennan, 1993] для рек разного климата, и связано с масштабами их водосборов, расположенных в разных климатических поясах, и различным составом слагающих их комплексов пород.

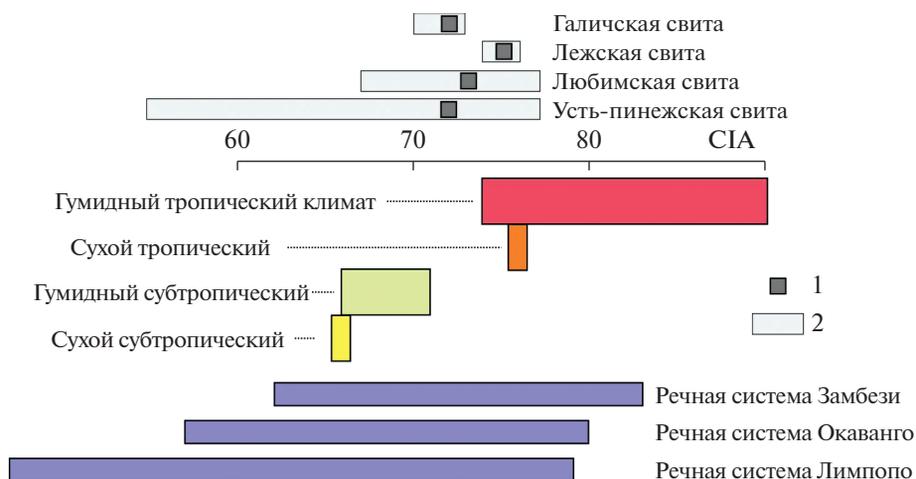


**Рис. 8.** Положение индивидуальных (а, в) и усредненных (б, г) точек состава глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия на диаграммах  $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$  и  $(La/Yb)_N - Th$ . Условные обозначения см. рис. 6.

*Соотношение процессов выветривания и рециклинга*

Еще один вопрос, который можно рассмотреть с учетом подходов, разработанных при исследовании осадков современных речных систем юга Африки, это соотношение процессов выветривания и рециклинга при формировании глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы. Так, в работах [Garzanti et al., 2014, 2022 и др.] показано, что добавление кварца к референтному составу UCC ведет к постепенному росту содержания  $SiO_2$  в песках, а выветривание – к снижению содержания подвижных ме-

таллов относительно и Si и Al и в песках и в илах. В нашем случае фигуративные точки аргиллитов и аргиллитоподобных глин верхнего венда и нижнего кембрия на диаграммах  $SiO_2 - (Na_2O + K_2O + MgO + CaO)$ ,  $Al_2O_3 - (Na_2O + K_2O + MgO + CaO)$  и CIA–WIP (рис. 10а, 10б, 10г) расположены вблизи или непосредственно на трендах выветривания. Несколько иначе выглядит их распределение на диаграммах  $SiO_2 - Al_2O_3$  [Garzanti et al., 2014] и  $Al_2O_3/SiO_2 - CPA$  [Bosq et al., 2020] (см. рис. 10в, 10д), но и здесь в первом случае очевидно отсутствие влияния процессов рециклинга на состав глинистых пород, а во втором – заметное отличие их



**Рис. 9.** Сопоставление средних, минимальных и максимальных величин CIA, свойственных глинистым породам верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы со значениями данного параметра, характерными для тонкой взвеси современных рек разных климатических обстановок, по данным [McLennan, 1993]. Величины CIA для тонких взвесей речных систем юга Африки заимствованы из работы [Garzanti et al., 2014]. 1 – среднее значение CIA; 2 – минимальное и максимальное значения CIA.

состава от УСС, обусловленное, скорее всего, процессами выветривания. Свойственные глинистым породам средние значения CIA/WIP (усть-пинезжская свита –  $1.40 \pm 0.20$ , любимская свита –  $1.45 \pm 0.16$ , лежская свита – 1.73 и галичская свита –  $1.33 \pm 0.07$ ), являются еще одним аргументом в пользу вывода о том, что состав слагающей их тонкой алюмосиликокластики слабо отличается от состава материнских пород.

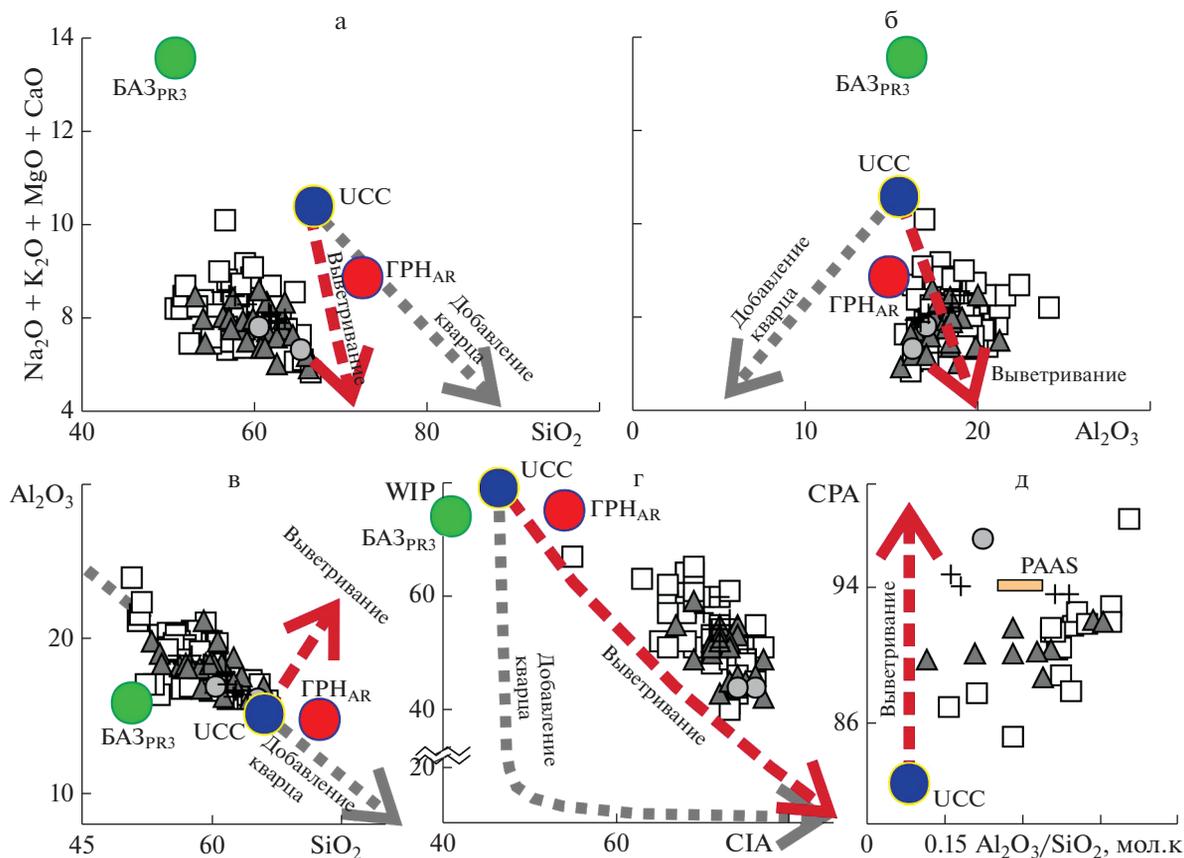
Наконец, на рис. 11, построенном в отличие от аналогичных иллюстраций, приведенных в работе [Garzanti et al., 2014], только по аналитическим данным для фракции < 32 мкм пелитовых илов ряда рек юга Африки и содержаниям Na, Ca, Sr, Mg, K, Rb, Ba и Cs в глинистых породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы, хорошо видно, что большинство тонких взвесей современных африканских речных систем, кроме, по-видимому, р. Лимпопо, отличаются от глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия существенно более высокими величинами  $\alpha^{Al}Na$ . Напротив, значения  $\alpha^{Al}Ca$  в глинистых породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы варьируют в интервале 3.1–20.1. Это заметно выше, чем характерно для тонких речных взвесей современных рек юга Африки, но обусловлено изначальным дефицитом CaO в составе аргиллитов. Если исключить из рассмотрения данный параметр, то весь остальной ряд  $\alpha$ -коэффициентов для глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия окажется близок к аналогичному ряду для африканских рек. Свойственный ему небольшой максимум  $\alpha^{Al}Sr$  (2.7–5.8) сближает этот ряд с теми, что характерны для взвеси рр. Лимпопо и Замбези.

## ВЫВОДЫ

Приведенный выше фактический материал и его обсуждение позволяют сделать ряд выводов. Во-первых, очевидно, что в течение рассматриваемых нами нескольких десятков миллионов лет геологической истории существенного изменения состава формировавшихся на территории современной Московской синеклизы глинистых пород не произошло.

Во-вторых, по одним параметрам состав аргиллитов верхнего венда и нижнего кембрия ближе к гранитоидам, по другим – к магматическим породам основного состава. Это указывает на участие в их составе продуктов эрозии и тех и других породных ассоциаций, а также подстилающих осадочных и метаосадочных пород. В пользу данного вывода свидетельствуют и особенности распределения в глинистых породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы также редких и рассеянных элементов. Так, по сравнению со средними позднепротерозойскими базальтами в них содержится заметно больше  $K_2O$  и Rb, Th, Zr, Hf, Nb и Ta, тогда как в базальтах существенно выше концентрации  $TiO_2$ , MgO и CaO, Sc, V и Cr. Средние гранитоиды архея по сравнению с аргиллитами обладают заметно более низкими концентрациями  $TiO_2$ , FeO и MgO, Sc, V, Cr, Co и Ni.

В-третьих, нормированные на хондрит спектры распределения РЗЭ в глинистых породах близки к спектру лантаноидов PAAS ( $(La/Yb)_{\text{среднее}}$  варьирует в них от 9.91 до 8.25). Параметр  $Eu/Eu^*_{\text{среднее}}$  составляет от 0.61 до 0.66. Все это также предполагает присутствие в составе аргиллитов материала разрушения и кислых магмати-



**Рис. 10.** Распределение индивидуальных точек состава глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия, а также референтных точек верхней континентальной коры (UCC) [Rudnick, Gao, 2003], средних гранитов архея (ГРН<sub>AR</sub>) и базальтов верхнего протерозоя (БАЗ<sub>PR3</sub>), по [Condie, 1993], на диаграммах SiO<sub>2</sub>–(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + MgO + CaO) (а), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + MgO + CaO) (б), SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в), CIA–WIP (г), все по [Garzanti et al., 2014], и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>–CPA (д) [Bosq et al., 2020].  
Условные обозначения см. рис. 6.

ческих пород и пород основного состава. Положение точек состава глинистых пород верхнего венда и нижнего кембрия на дискриминантных диаграммах La/Sc–Th/Co, La/Th–Th/Yb, Sc–Th/Sc и других графиках подтверждает сказанное, а распределение фигуративных точек аргиллитов на диаграмме Cr/Th–Th/Sc позволяет считать, что доля в их составе продуктов разрушения кислых магматических пород могла составлять до 70–90%.

В-четвертых, данные по соотношению в глинистых породах верхнего венда и нижнего кембрия Московской синеклизы не позволяют сделать определенного вывода о характере слагающей их алюмосиликокластики (петрогенная? литогенная?). Но в пользу в целом незначительного отличия ее от состава материнских пород свидетельствуют свойственные аргиллитам и аргиллитоподобным глинам величины Zr/Sc и Th/Sc, ведущие к размещению на графике с указанными отношениями фигуративных точек исследуемых нами глинистых пород у тренда, определяемого составом пород на палеоводосборах.

В-пятых, распределение точек состава аргиллитов верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы на диаграммах (La/Yb)<sub>N</sub>–Eu/Eu\* и (La/Yb)<sub>N</sub>–Th с полями состава тонкой алюмосиликокластики, характерной для приустьевых областей разных типов современных рек, дает основание предполагать, что транспортировка взвешенного материала в область осадконакопления осуществлялась крупными реками (водосборы которых должны быть сложены различными по составу комплексами пород, что характерно и для речных систем юга Африки) и реками, дренировавшими водосборы, сложенные преимущественно осадочными породами. Свойственные глинистым породам верхнего венда и нижнего кембрия Московской синеклизы значения CIA<sub>среднее</sub> сопоставимы, как будто бы, с теми, что характерны для взвеси современных крупных рек гумидного субтропического и тропического климата, а также рек районов сухого тропического климата. В то же время разброс минимальных и максимальных значений CIA в тонкой взвеси крупных

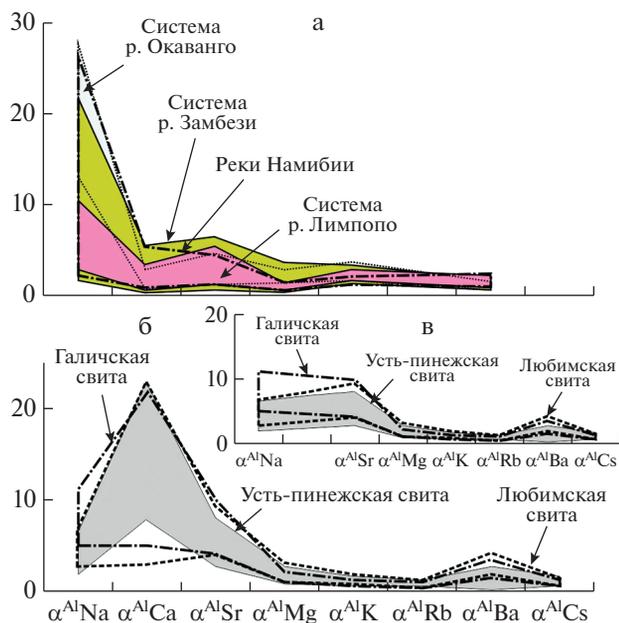


Рис. 11. Значения  $\alpha^{Al}E$  во фракции <32 мкм пелитовых осадков речных систем юга Африки (а), по [Garganti et al., 2014], и в глинистых породах верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы (б, в).

речных систем юга Африки существенно шире, чем свойственно глинистым породам усть-пинежско–галичской осадочной последовательности. Это указывает на зависимость данного параметра в последнем случае и от климата, и от состава водосборов (для верхневендско–нижнекембрийских отложений – это не так). Локализация фигуративных точек аргиллитов и аргиллитоподобных глин верхнего венда и нижнего кембрия на диаграммах  $SiO_2-(Na_2O + K_2O + MgO + CaO)$ ,  $Al_2O_3-(Na_2O + K_2O + MgO + CaO)$  и CIA–WIP у трендов выветривания позволяет думать, что именно палеоклимат определял основные характеристики их состава. Свойственные им значения CIA/WIP – еще один аргумент в пользу вывода о петрогенной природе слагающей их тонкой алюмосиликокластики.

В-шестых, большинство тонких взвесей речных систем юга Африки (по-видимому, за исключением только р. Лимпопо) отличаются от глинистых пород верхнего венда–нижнего кембрия Московской синеклизы существенно более высокими величинами  $\alpha^{Al}Na$ . Это предполагает, что материнские для них породы претерпели в целом более сильное химическое выветривание, чем те, что являлись источниками тонкой алюмосиликокластики для рассматриваемых нами в данной работе глинистых пород. Напротив, значения  $\alpha^{Al}Ca$  в глинистых породах заметно выше (3.1–20.1), чем характерно для тонких речных взвесей, но связано это с изначальным дефицитом CaO в составе аргиллитов. Если же, как предлагается вы-

ше, исключить из рассмотрения такой параметр, как  $\alpha^{Al}Ca$ , то остальной ряд  $\alpha$ -коэффициентов для глинистых пород венда–нижнего кембрия Московской синеклизы окажется подобен аналогичному ряду для африканских рек. Даже максимум  $\alpha^{Al}Sr$  (2.7–5.8) сближает этот ряд с теми, что характерны для тонкой взвеси рр. Лимпопо и Замбези.

Конечно, к прямым сопоставлениям осадков и осадочных пород (аргиллиты верхнего венда и нижнего кембрия Московской синеклизы находятся на ранней стадии катагенеза, а осадки африканских рек не прошли и диагенеза) следует, как считают многие специалисты, относиться с большой осторожностью, так как глинистые минералы довольно чутко реагируют на изменения параметров среды при литогенезе. Нас, как представляется, “спасает” при таком подходе как минимум одно обстоятельство – существенное сходство, при всем разнообразии отдельных характеристик, содержания и особенностей распределения основных породообразующих оксидов, а также редких и рассеянных элементов в референтных объектах/глинистых породах/глинистых сланцах (NASC, PAAS, RPSC и др.) и наших образцах.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне признательны анонимным рецензентам, советы и пожелания которых способствовали более точной формулировке ряда положений работы и сделанных в ней выводов.

## ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены в рамках государственного задания ГИН РАН и ИГГД РАН (темы 0135-2019-0043 И FMUW-2021-0003).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов Е.М. Венд Восточно-Европейской платформы // Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы / Под ред. Б.С. Соколова, М.А. Федонкина. М.: Наука, 1985. С. 3–34.
- Аксенов Е.М., Волкова С.А. Вулканогенно-осадочные горизонты редкинской свиты валдайской серии // Докл. АН СССР. 1969. Т. 188. № 3. С. 635–638.
- Бискэ Ю.С. Геология России. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2019. 228 с.
- Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы / Под ред. Б.С. Соколова, М.А. Федонкина. М.: Наука, 1985. 238 с.
- Горохов И.М., Фелицын С.Б., Турченко Т.Л. и др. Минералогическое, геохимическое и изотопно-геохронологическое исследование верхневендских аргиллитов

- Московской синеклизы // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2005. Т. 13. № 5. С. 21–41.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Лист О-37 (Ярославль). Объяснительная записка. СПб.: МПР РФ, ФГУП “ВСЕГЕИ”, 2016. 356 с.
- Гражданкин Д.В., Маслов А.В., Крупенин М.Т., Ронкин Ю.Л. Осадочные системы сыльвицкой серии (верхний венд Среднего Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 280 с.
- Жарков М.А. История палеозойского соленакопления. Новосибирск: Наука, 1978. 172 с.
- Карта докембрийских формаций Русской платформы и ее складчатого обрамления (со снятыми фанерозойскими отложениями). Масштаб 1 : 2500000. Объяснительная записка / Ред. Ю.Р. Беккер. Л.: ВСЕГЕИ, 1983. 172 с.
- Климат в эпохи крупных биосферных перестроек / Под ред. М.А. Семихатова, Н.М. Чумакова. М.: Наука, 2004. 299 с.
- Котова Л.Н., Подковыров В.Н., Граунов О.В. Литохимия тонкозернистых обломочных пород венда Непско-Жуинского региона Сибирской платформы // Литосфера. 2016. № 1. С. 74–87.
- Кузьменко Ю.Т., Бурзин М.Б. Стратиграфическая схема вендских отложений Московской синеклизы. Объяснительная записка. М., 1996. 46 с.
- 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.
- Кузьменко Ю.Т., Кукин А.Я., Пименов Ю.Т. Геологическое строение и перспективы нефтегазоносности верхнего протерозоя г. Москвы // Литология и полез. ископаемые. 1994. № 1. С. 100–118.
- Маслов А.В. Венд Среднего Урала: палеоклиматические реконструкции на основе химических индексов изменения состава пород // Литосфера. 2022. Т. 22. № 2. С. 153–178.
- Маслов А.В. Возможные “актуальные климатические образы” отложений различных литостратиграфических единиц рифея и венда Урала // Геологический вестник. 2021. № 1. С. 38–45.
- Маслов А.В. Гляциогенные и связанные с ними осадочные образования: основные литохимические особенности. Сообщение 1. Поздний архей, протерозой // Литология и полез. ископаемые. 2010а. № 4. С. 423–445.
- Маслов А.В. Гляциогенные и связанные с ними осадочные образования: основные литохимические особенности. Сообщение 2. Палеозой, кайнозой // Литология и полез. ископаемые. 2010б. № 5. С. 496–518.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З. Литологические, литохимические и геохимические индикаторы палеоклимата (на примере рифея Южного Урала) // Литология и полез. ископаемые. 2003. № 5. С. 427–446.
- Маслов А.В., Мельничук О.Ю., Мизенс Г.А. и др. Реконструкция состава пород питающих провинций. Статья 2. Лито- и изотопно-геохимические подходы и методы // Литосфера. 2020. Т. 20. № 1. С. 40–62.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н. Индексы химического выветривания и их использование для палеоклиматических реконструкций (на примере разреза венда-нижнего кембрия Подольского Приднестровья) // Литология и полез. ископаемые. 2023. № 3. С. 249–273.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Граунов О.В. Изменения палеоклимата в позднем докембрии (по данным изучения верхнедокембрийского разреза Южного Урала) // Литология и полез. ископаемые. 2016. № 2. С. 129–149.
- Маслов А.В., Шевченко В.П. Систематика редких земель и Th во взвеси и донных осадках устьевых зон разных категорий/классов рек мира и ряда крупных рек Российской Арктики // Геохимия. 2019. Т. 64. № 1. С. 59–78.
- Методы реконструкции палеоклиматов. М.: Наука, 1985. 198 с.
- Монин А.С., Шишков Ю.Л. История климата. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 407 с.
- Пиррус Э.А. Глинистые минералы в вендских и кембрийских породах и их значение для палеогеографии и стратиграфии // Палеогеография и литология венда и кембрия запада Восточно-Европейской платформы. М.: Наука, 1980. С. 97–113.
- Подковыров В.Н., Котова Л.Н., Голубкова Е.Ю., Ивановская А.В. Литохимия тонкозернистых обломочных пород венда Непско-Жуинского региона Сибирской платформы // Литология и полез. ископаемые. 2015. № 4. С. 337–349.
- Подковыров В.Н., Маслов А.В. Условия образования протолитов метapelитов верхнего рифея и венда Бодайбинской зоны Байкало-Патомского складчатого пояса // Геохимия. 2022. Т. 67. № 9. С. 842–863.
- 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.
- Ронов А.Б., Балуховский А.Н. Климатическая зональность материков и общая тенденция изменения климата в позднем мезозое и кайнозое // Литология и полез. ископаемые. 1981. № 5. С. 118–136.
- Савенко В.С. Химический состав взвешенных наносов рек мира. М.: ГЕОС, 2006. 174 с.
- Савко А.Д. Глинистые породы верхнего протерозоя и фанерозоя Воронежской антеклизы. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1988. 192 с.
- Синицын В.М. Введение в палеоклиматологию. Л.: Недра, 1980. 248 с.
- Страхов Н.М. К теории геохимического процесса в гумидных зонах // Геохимия осадочных пород и руд. М.: Наука, 1968. С. 102–133.
- Страхов Н.М. Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 534 с.
- Тихомирова Н.Н., Толстихина М.М., Утсал К.Р. Глинистые минералы девонских отложений Пачелмского прогиба // Изв. вузов. Геология и разведка. 1971. № 3. С. 36–41.
- Хераскова Т.Н., Андреева Н.К., Воронцов А.К., Кагарманьян Н.А. История развития и геодинамика осадочного бассейна Московской синеклизы в позднем венде // Литосфера. 2005а. № 1. С. 16–40.
- Хераскова Т.Н., Андреева Н.К., Воронцов А.К., Кагарманьян Н.А. Развитие осадочного бассейна Московской синеклизы в раннем палеозое // Литология и полез. ископаемые. 2005б. № 2. С. 172–191.
- Хераскова Т.Н., Волож Ю.А., Заможняя Н.Г. и др. Строение и история развития западной части Восточно-Европейской платформы в рифее–палеозое по данным

- геотрансекта ЕВ-1 (Лодейное Поле–Воронеж) // Литосфера. 2006. № 2. С. 65–94.
- Чистякова А.В., Веселовский Р.В., Семёнова Д.В. и др. Стратиграфическая корреляция пермо–триасовых разрезов Московской синеклизы: первые результаты U–Pb-датирования обломочного циркона // Докл. РАН. Науки о Земле. 2020. Т. 492. № 1. С. 23–28.
- Чумаков Н.М. Оледенения Земли: история, стратиграфическое значение и роль в биосфере. М.: ГЕОС, 2015. 160 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
- Ясаманов Н.А. Древние климаты Земли. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 294 с.
- Allen P.A. Sediment routing systems: the fate of sediment from source to sink. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 407 p.
- Bavinton O.A. The nature of sulfidic metasediments at Kambalda and their broad relationships with associated ultramafic rocks and nickel ores // Econ. Geol. 1981. V. 76. P. 1606–1628.
- Bayon G., Toucanne S., Skonieczny C. et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited // Geochim. Cosmochim. Acta. 2015. V. 170. P. 17–38.
- Becker T., Schreiber U., Kampunzu A.B., Armstrong R. Mesoproterozoic rocks of Namibia and their plate tectonic setting // J. Afr. Earth Sci. 2006. V. 46. P. 112–140.
- Bhat M.I., Ghosh S.K. Geochemistry of the 2.51 Ga old Rampur group pelites, western Himalayas: implications for their provenance and weathering // Precambrian Res. 2001. V. 108. P. 1–16.
- Bojanowski M.J., Goryl M., Kremer B. et al. Pedogenic siderites fossilizing Ediacaran soil microorganisms on the Baltica paleocontinent // Geology. 2020. V. 48. P. 62–66.
- Borges J.B., Huh Y., Moon S., Noh H. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East // Chem. Geol. 2008. V. 254. P. 52–72.
- Bosq M., Bertran P., Degeai J.-P. et al. Geochemical signature of sources, recycling and weathering in the Last Glacial loess from the Rhône Valley (south-east France) and comparison with other European regions // Aeolian Res. 2020. V. 42. 100561.  
<https://doi.org/1016/j.aeolia.2019.100561> v2
- Bouchez J., Gaillardet J., France-Lanord C. et al. Grain size control of river suspended sediment geochemistry: clues from Amazon River depth profiles // Geochem. Geophys. Geosyst. 2011. V. 12. Q03008.  
<https://doi.org/10.1029/2010GC003380>
- Bracciali 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 J. Arribas, S. Critelli, M.J. Johnsson // Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 2007. V. 420. P. 73–93.
- Compton J.S., Maake L. Source of the suspended load of the upper Orange River, South Africa // S. Afr. J. Geol. 2007. V. 110. P. 339–348.
- Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chemical Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
- Condie K.C., Wronkiewicz D.A. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. V. 97. P. 256–267.
- Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mud-rock chemistry in the southwestern United States // Geochim. Cosmochim. Acta. 1995. V. 59. P. 2919–2940.
- Cruz A., Dinis P.A., Gomes A., Leite P. Influence of Sediment Cycling on the Rare-Earth Element Geochemistry of Fluvial Deposits (Caculuar–Mucope, Cunene River Basin, Angola) // Geosciences. 2021. V. 11. 384.  
<https://doi.org/10.3390/geosciences11090384>
- Cruz A.T., Dinis P.A., Lucic M., Gomes A. Spatial variations in sediment production and surface transformations in subtropical fluvial basins (Caculuar River, south-west Angola): Implications for the composition of sedimentary deposits // Depositional Rec. 2022. V. 00. P. 1–16.  
<https://doi.org/10.1002/dep2.208>
- Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chemical Geol. 2002. V. 191. P. 305–327.
- Dellinger M., Gaillardet J., Bouchez J. et al. Lithium isotopes in large rivers reveal the cannibalistic nature of modern continental weathering and erosion // Earth Planet. Sci. Lett. 2014. V. 401. P. 359–372.
- Dinis P., Garzanti E., Hahn A. et al. Weathering indices as climate proxies. A step forward based on Congo and SW African river muds // Earth-Sci. Rev. 2020. V. 201. 103039.
- Dinis P., Garzanti E., Vermeesch P., Huvi J. Climatic zonation and weathering control on sediment composition (Angola) // Chemical Geol. 2017. V. 467. P. 110–121.
- Dudzisz K., Lewandowski M., Werner T. et al. Paleolatitude estimation and premises for geomagnetic field instability from the Proterozoic drilling core material of the southwestern part of the East European Craton // Precambrian Res. 2021. V. 357. 106135.
- Dupré B., Gaillardet J., Rousseau D., Allègre C.J. Major and trace elements of river-borne material: The Congo Basin // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. V. 60. P. 1301–1321.
- Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // Geology. 1995. V. 23. P. 921–924.
- Fedo C.M., Young G.M., Nesbitt H.W. Paleoclimatic control on the composition of the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada: a greenhouse to icehouse transition // Precambrian Res. 1997. V. 86. P. 201–223.
- Gaillardet J., Dupré B., Allègre C.J. Geochemistry of large river suspended sediments: silicate weathering or recycling tracer? // Geochim. Cosmochim. Acta. 1999. V. 63. P. 4037–4051.
- Gaillardet J., Viers J., Dupré B. Trace elements in river waters // Surface and Ground Water, Weathering, Erosion and Soils / Eds H.D. Holland, K.K. Turekian, J.I. Drever // Treatise on Geochemistry. V. 5. Oxford: Pergamon, 2003. P. 225–272.
- Garçon M., Chauvel C. Where is basalt in river sediments, and why does it matter? // Earth Planet. Sci. Lett. 2014. V. 407. P. 61–69.
- Garzanti E., Andò S., France-Lanord C. et al. Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments. 1. Bedload sand (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh) // Earth Planet. Sci. Lett. 2010. V. 299. P. 368–381.

- Garzanti E., Andò S., France-Lanord C. et al.* Mineralogical and chemical variability of fluvial sediments. 2. Suspended-load silt (Ganga-Brahmaputra, Bangladesh) // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2011. V. 302. P. 107–120.
- Garzanti E., Bayon G., Dennielou B. et al.* The Congo deep-sea fan: mineralogical, REE, and Nd-isotope variability in quartzose passive-margin sand // *J. Sediment. Res.* 2021a. V. 91. P. 433–450.
- Garzanti E., Pastore G., Resentini A. et al.* The segmented Zambezi sedimentary system from source to sink: 1. Sand petrology and heavy minerals // *J. Geol.* 2021b. V. 129. P. 343–369.
- Garzanti E., Bayon G., Dinis P. et al.* The Segmented Zambezi Sedimentary System from Source to Sink: 2. Geochemistry, Clay Minerals, and Detrital Geochronology // *J. Geol.* 2022. V. 130. № 3. <https://doi.org/10.1086/719166>
- Garzanti E., Padoan M., Setti M. et al.* Provenance versus weathering control on the composition of tropical river mud (southern Africa) // *Chemical Geol.* 2014. V. 366. P. 61–74.
- Garzanti E., Padoan M., Setti M. et al.* Weathering geochemistry and Sr–Nd isotope fingerprinting of equatorial upper Nile and Congo muds // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2013a. V. 14. P. 292–316.
- Garzanti E., Padoan M., Andò S. et al.* Weathering at the equator: petrology and geochemistry of East African Rift sands // *J. Geol.* 2013b. V. 121. P. 547–580.
- Garzanti E., Resentini A.* Provenance control on chemical indices of weathering (Taiwan river sands) // *Sediment. Geol.* 2016. V. 336. P. 81–95.
- Garzanti E., Resentini A., Andò S. et al.* Physical controls on sand composition and relative durability of detrital minerals during ultra-long distance littoral and aeolian transport (Namibia and southern Angola) // *Sedimentology.* 2015. V. 62. P. 971–996.
- Garzanti E., Vermeesch P., Rittner M., Simmons M.* The zircon story of the Nile: time-structure maps of source rocks and discontinuous propagation of detrital signals // *Basin Res.* 2018. V. 30. P. 1098–1117.
- González-Álvarez I., Kerrich R.* Weathering intensity in the Mesoproterozoic and modern large-river systems: A comparative study in the Belt–Purcell Supergroup, Canada and USA // *Precambrian Res.* 2012. V. 208–211. P. 174–196.
- Gumbricht T., McCarthy T.S., Merry C.L.* The topography of the Okavango Delta, Botswana, and its tectonic and sedimentological implications // *S. Afr. J. Geol.* 2001. V. 104. P. 243–264.
- Guo Y., Yang S., Su N. et al.* Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2018. V. 227. P. 48–63.
- Hahn A., Miller C., Andó S. et al.* The provenance of terrigenous components in marine sediments along the east coast of southern Africa // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2018. V. 19. <https://doi.org/10.1029/2017GC007228>
- He J., Garzanti E., Dinis P. et al.* Provenance versus weathering control on sediment composition in tropical monsoonal climate (South China) – 1. Geochemistry and clay mineralogy // *Chemical Geol.* 2020. V. 558. 119860.
- Jewuła K., Srodon 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.
- Johnsson M.J.* The system controlling the composition of clastic sediments // *Processes controlling the composition of clastic sediments / Eds M.J. Johnsson, A. Basu // Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 1993. V. 284. P. 1–19.
- Jury M.* Climate and weather factors modulating river flows in southern Angola // *Int. J. Climatol.* 2010. V. 30. P. 901–908.
- Just J., Schefuß E., Kuhlmann H. et al.* Climate induced sub-basin source-area shifts of Zambezi River sediments over the past 17 ka // *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 2014. V. 410. P. 190–199.
- Konta J.* Mineralogy and chemical maturity of suspended matter in major rivers sampled under the SCOPE/UNEP Project // *Mitt. Geol.-Palaont. Inst. Univ. Hamburg.* 1985. H. 58. S. 569–592.
- Kremer B., Kazmierczak J., Srodon J.* Cyanobacterial-algal crusts from Late Ediacaran paleosols of the East European Craton // *Precambrian Res.* 2018. V. 305. P. 236–246.
- Le Pera E., Arribas J., Critelli S., Tortosa A.* The effects of source rocks and chemical weathering on the petrogenesis of siliciclastic sand from the Neto River (Calabria, Italy): implications for provenance studies // *Sedimentology.* 2001. V. 48. P. 357–378.
- Liivamagi S., Srodon J., Bojanowski M.J. et al.* 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.
- Liivamagi S., Srodon J., Bojanowski M.J. et al.* 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.
- Maharana C., Srivastava D., Tripathi J.K.* Geochemistry of sediments of the Peninsular rivers of the Ganga basin and its implication to weathering, sedimentary processes and provenance // *Chemical Geol.* 2018. V. 483. P. 1–20.
- McCarthy T.S., Cooper G.R.J., Tyson P.D., Ellery W.N.* Seasonal flooding in the Okavango Delta Botswana – recent history and future prospects // *S. Afr. J. Sci.* 2000. V. 96. P. 25–33.
- McLennan S.M.* Weathering and global denudation // *J. Geol.* 1993. V. 101. P. 295–303.
- 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. V. 284. P. 21–40.
- McLennan S.M., Nance W.B., Taylor S.R.* Rare earth element–thorium correlations in sedimentary rocks, and the composition of the continental crust // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1980. V. 44. P. 1833–1839.
- Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature.* 1982. V. 299. P. 715–717.
- Parker A.* An index of weathering for silicate rocks // *Geol. Mag.* 1970. V. 107. P. 501–504.
- Porter S.C.* Chinese loess record of monsoon climate during the last glacial–interglacial cycle // *Earth-Sci. Rev.* 2001. V. 54. P. 115–128.
- Roser B.P., Korsch R.J.* Provenance signatures of sandstone–mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // *Chemical Geol.* 1988. V. 67. P. 119–139.
- 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.

- Schatz A.-K., Qi Y., Siebel W. et al. Tracking potential source areas of Central European loess: examples from Tokaj (HU), Nussloch (D) and Grub (AT) // *Open Geosciences*. 2015. V. 7. P. 678–720.
- Setti M., López-Galindo A., Padoan M., Garzanti E. Clay mineralogy in southern Africa river muds // *Clay Miner.* 2014. V. 49. P. 717–733.
- Singh P. Major, trace and REE geochemistry of the Ganga River sediments: influence of provenance and sedimentary processes // *Chemical Geol.* 2009. V. 266. P. 242–255.
- Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution: An Examination of The Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.
- Thiry M. Palaeoclimatic interpretation of clay minerals in marine deposits: An outlook from the continental origin // *Earth-Sci. Rev.* 2000. V. 49. P. 201–221.
- Turgeon S., Brumsack H.-J. Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian-Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria-Marche basin of central Italy // *Chemical Geol.* 2006. V. 234. P. 321–339.
- van der Lubbe H.J.L., Frank M., Tjallingii R., Schneider R.R. Neodymium isotope constraints on provenance, dispersal, and climate-driven supply of Zambezi sediments along the Mozambique Margin during the past ~45000 years // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2016. V. 17. P. 181–198.
- van der Lubbe H.J.L., Tjallingii R., Prins M.A. et al. Sedimentation patterns off the Zambezi River over the last 20000 years // *Mar. Geol.* 2014. V. 355. P. 189–201.
- Vezzoli G., Garzanti E., Limonta M. et al. Erosion patterns in the Changjiang (Yangtze River) catchment revealed by bulk-sample versus single-mineral provenance budgets // *Geomorphology*. 2016. V. 261. P. 177–192.
- Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database // *Sci. tot. Env.* 2009. V. 407. P. 853–868.
- von Eynatten H., Tolosana-Delgado R., Karius V. Sediment generation in modern glacial settings: grain-size and source-rock control on sediment composition // *Sediment. Geol.* 2012. V. 280. P. 80–92.
- von Eynatten H., Tolosana-Delgado R., Karius V. et al. Sediment generation in humid Mediterranean setting: grain-size and source-rock control on sediment geochemistry and mineralogy (Sila Massif, Calabria) // *Sediment. Geol.* 2016. V. 336. P. 68–80.
- Yang S.Y., Li C.X., Yang D.Y., Li X.S. Chemical weathering of the loess deposits in the lower Changjiang Valley, China, and paleoclimatic implications // *Quat. Int.* 2004. V. 117. P. 27–34.

## Geochemistry of Upper Vendian and Lower Cambrian Clay Rocks of the Moscow Syncline (Some Traditional and Modern Approaches)

A. V. Maslov<sup>1, \*</sup>, V. N. Podkovyrov<sup>2, \*\*</sup>

<sup>1</sup>*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Precambrian Geology and Geochronology of the Russian Academy of Sciences, Makarov emb., 2, Saint-Petersburg, 199034 Russia*

\*e-mail: amas2004@mail.ru

\*\*e-mail: vpodk@mail.ru

The article discusses some geochemical characteristics of Upper Vendian and Lower Cambrian clay rocks that form the base of the Moscow syncline. It is shown that during the several tens of millions of years of geological history we are considering, there was no significant change in the composition of clay rocks. Based on the Zr/Sc and Th/Sc values characteristic of argillites and argillite-like clays, the petrogenic nature of the fine-grained aluminosiliciclastics composing them is substantiated. This conclusion is also confirmed by the values of the CIA/WIP ratio. In general, according to some parameters of their composition, the Upper Vendian and Lower Cambrian clay rocks of the Moscow syncline are closer to granitoids, according to others, to basic igneous rocks. Thus, compared with the average Late Proterozoic basalts, they contain noticeably more K<sub>2</sub>O and Rb, Th, Zr, Hf, Nb, and Ta, while the average Archean granitoids have noticeably lower concentrations of TiO<sub>2</sub>, FeO, and MgO, Sc, V, Cr, Co, and Ni. The position of the data points for Upper Vendian and Lower Cambrian clay rocks on the La/Sc–Th/Co, La/Th–Th/Yb, Sc–Th/Sc and other plots confirms what has been said. Chondrite-normalized lanthanide distribution spectra in clay rocks are close to the PAAS lanthanide spectrum. It has been suggested that the transportation of suspended material to the area of sedimentation was carried out by: 1) large rivers with source areas composed of rock complexes of different composition, and 2) rivers that drained provenances composed mainly of sedimentary rocks. The average CIA values inherent in the Upper Vendian and Lower Cambrian clay rocks of the Moscow syncline are comparable to those typical for the suspended particulate matter of modern large rivers of a humid subtropical and tropical climate, as well as rivers of dry tropical climate regions. The localization of the data points of argillites and argillite-like clays on the SiO<sub>2</sub>–(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + MgO + CaO), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + MgO + CaO) and CIA–WIP diagrams suggests that it was the paleoclimate that determined the main characteristics of their composition. The series of  $\alpha$ -coefficients characteristic of clay rocks of the Upper Vendian–Lower Cambrian of the Moscow syncline is quite close to the similar series for fine-grained suspended particulate matter of modern large river systems in southern Africa.

**Keywords:** clay rocks, Moscow syncline, geochemistry, main features of accumulation of Upper Vendian and Lower Cambrian sedimentary sequences.